

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ FARKLI DUVAR TİPLERİNDEKİ YIĞMA  
BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE ANALİTİK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ali KAYA

MART 2023  
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ FARKLI DUVAR TİPLERİNDEKİ YIĞMA  
BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE ANALİTİK İNCELENMESİ**

**Ali KAYA**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02 / 2023**

**Tezin Savunma Tarihi : 21 / 03 / 2023**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Süleyman ADANUR**

**Trabzon 2023**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Farklı Duvar Tiplerindeki Yığma Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik İncelenmesi” isimli bu çalışmayı bana önererek çalışmaların her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman ADANUR'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK ve Prof. Dr. Levent GÜMÜŞEL'e ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca çok büyük desteklerini gördüğüm, bilgi ve deneyimlerinden fazlasıyla istifade ettiğim değerli hocam Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'a teşekkür ederim. Çalışmam sırasında desteklerini eksik etmeyen Araş. Gör. Ali Fuat GENÇ, Araş. Gör. Fezayil SUNCA, Araş. Gör. Y. Emrahan AKBULUT, Araş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN, Araş. Gör. F. Yesevi OKUR, Araş. Gör. Zafer YILMAZ, Dr. Araş. Gör. Safa NAYIR, İnş Müh. Mustafa YILMAZ, İnş. Müh. Ali SARIKOÇ'a ve adını yazamadığım daha birçok arkadaşıma teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında desteklerini arkamda hissettiğim annem Lütfiye Kaya'ya ve babam Nevzat KAYA'ya, çalışmam boyunca beni sürekli teşvik edip en umutsuz olduğum anlarda bile bana olan inancını kaybetmeyip desteğini esirgemeyen eşim Betül KAYA'ya ve ailemin bütün fertlerine minnettar olduğumu belirtir, çalışmamın yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Ali KAYA  
Trabzon 2023

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Farklı Duvar Tiplerindeki Yığma Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Süleyman ADANUR’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/03/2023

Ali KAYA

## İÇİNDEKİLER

|                                                                          | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ .....                                                              | III             |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                                | IV              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                         | V               |
| ÖZET .....                                                               | IX              |
| SUMMARY .....                                                            | X               |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                     | XI              |
| TABLolar DİZİNİ.....                                                     | XVII            |
| SEMBOLLER DİZİNİ .....                                                   | XIX             |
| 1. GENEL BİLGİLER .....                                                  | 1               |
| 1.1. Giriş.....                                                          | 1               |
| 1.2. Yığma Yapı Malzemeleri.....                                         | 8               |
| 1.2.1. Doğal Taşlar.....                                                 | 8               |
| 1.2.2. Tuğla .....                                                       | 9               |
| 1.2.3. Gaz Beton ve Bims Beton.....                                      | 10              |
| 1.2.4. Harçlar.....                                                      | 11              |
| 1.3. Yığma Yapı Türleri.....                                             | 12              |
| 1.3.1. Donatısız yığma yapılar .....                                     | 13              |
| 1.3.2. Donatılı Yığma Yapılar.....                                       | 14              |
| 1.3.3. Sarılmış Yığma Yapılar .....                                      | 16              |
| 1.3.4. Öngermeli ve Ardgermeli Yığma Yapılar .....                       | 17              |
| 1.4. Yığma Yapılarda Hasar ve Göçme Mekanizmaları .....                  | 18              |
| 1.4.1. Kesme Çatlakları.....                                             | 20              |
| 1.4.2. Kayma Çatlakları .....                                            | 20              |
| 1.4.3. Eğilme Çatlakları .....                                           | 22              |
| 1.5. Hasar Tespiti ve Sınıflandırılması .....                            | 22              |
| 1.6. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....                       | 27              |
| 1.6.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemleri..... | 28              |
| 1.6.1.1. Titreştiriciler .....                                           | 28              |
| 1.6.1.2. İvmeölçerler .....                                              | 29              |
| 1.6.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme.....                      | 30              |
| 1.6.2. Çevresel Titreşim Yöntemi .....                                   | 33              |

|          |                                                                   |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1.6.2.1. | Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi (GFOA).....   | 34 |
| 1.6.3.   | Zorlanmış Titreşim Yöntemi.....                                   | 36 |
| 1.7.     | Modal Güvence Kriteri ve Koordinat Modal Güvence Kriteri.....     | 37 |
| 1.8.     | Analitik Modelleme .....                                          | 39 |
| 1.8.1.   | Geometri ve Malzemenin İdealleştirilmesi.....                     | 39 |
| 1.8.1.1. | Detaylı Mikro Model .....                                         | 42 |
| 1.8.1.2. | Basitleştirilmiş Mikro Modelleme .....                            | 42 |
| 1.8.1.3. | Makro Modelleme.....                                              | 44 |
| 1.8.2.   | Davranışın İdealleştirilmesi .....                                | 45 |
| 1.8.2.1. | Elastik (Doğrusal) Davranış.....                                  | 45 |
| 1.8.2.2. | Plastik Davranış .....                                            | 46 |
| 1.8.2.3. | Elastik Ötesi (Doğrusal Olmayan) Davranış.....                    | 46 |
| 1.9.     | Deneyel Dinamik Testler.....                                      | 46 |
| 1.9.1.   | Yarı-Statik Testler.....                                          | 47 |
| 1.9.2.   | Benzeşik Dinamik Test .....                                       | 48 |
| 1.9.3.   | Sarsma Masası Testi .....                                         | 49 |
| 1.10.    | Yığma Yapıların Güçlendirilmesi.....                              | 50 |
| 1.11.    | Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar .....               | 52 |
| 1.12.    | Literatür Özeti ve Tezin Amacı .....                              | 63 |
| 2.       | YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....                               | 66 |
| 2.1.     | Giriş.....                                                        | 66 |
| 2.1.1.   | Deneyel Program.....                                              | 67 |
| 2.1.2.   | Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....               | 70 |
| 2.1.2.1. | Harçta Kullanılan Malzemelerin Karışımları ve Özellikleri.....    | 70 |
| 2.1.2.2. | Donatı Özellikleri.....                                           | 73 |
| 2.1.2.3. | Duvar Birim Elemanları.....                                       | 73 |
| 2.1.2.4. | Beton Özellikleri.....                                            | 74 |
| 2.1.3.   | Deney Modellerine Ait Geometrik Özellikler ve Üretim .....        | 75 |
| 2.1.4.   | Deney Numunelerinin Ölçeklendirilmesi .....                       | 77 |
| 2.1.5.   | İlave Kat Kütleleri.....                                          | 80 |
| 2.2.     | Tuğla Bina Modelleri.....                                         | 81 |
| 2.2.1.   | Ön deney Modeli.....                                              | 81 |
| 2.2.1.1. | Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları.....              | 82 |
| 2.2.1.2. | Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi ..... | 88 |
| 2.2.1.3. | Sarsma Masası Deneyleri.....                                      | 94 |

|              |                                                                                  |     |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.1.3.1.   | Sarsma Masası Deney Kurulumu.....                                                | 95  |
| 2.2.1.3.2.   | Deney Sonuçları.....                                                             | 102 |
| 2.2.1.3.2.1. | Deney Sonrası Hasar Tespitleri .....                                             | 102 |
| 2.2.1.3.2.2. | Görsel Tespitler.....                                                            | 103 |
| 2.2.1.3.2.3. | Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....              | 106 |
| 2.2.1.3.2.4. | Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi.....                                        | 111 |
| 2.2.1.4.     | Sayısal Simülasyon .....                                                         | 117 |
| 2.2.1.4.1.   | Giriş.....                                                                       | 117 |
| 2.2.1.4.1.1. | The Bullet Constraints Builder (BCB) Programı.....                               | 119 |
| 2.2.1.4.1.2. | Fracture Modifier (FM).....                                                      | 123 |
| 2.2.1.4.1.3. | Görelî Yer Değiştirme Görseli.....                                               | 123 |
| 2.2.1.4.1.4. | Bullet Physics Engine .....                                                      | 124 |
| 2.2.1.4.1.5. | Blender Yazılımı .....                                                           | 125 |
| 2.2.1.4.2.   | Yığılma Yapının Modellenmesi.....                                                | 126 |
| 2.2.1.4.2.1. | Basınç ve Çekme Dayanımı.....                                                    | 126 |
| 2.2.1.4.2.2. | Kesme Dayanımı.....                                                              | 126 |
| 2.2.1.4.2.3. | Eğilme Dayanımı .....                                                            | 127 |
| 2.2.1.4.2.4. | Duvarın Yoğunluğu .....                                                          | 127 |
| 2.2.1.4.2.5. | Sürtünme Katsayısı .....                                                         | 127 |
| 2.2.1.4.3.   | Analiz ve Sonuçlar .....                                                         | 128 |
| 2.2.2.       | Tuğla Bina Modeli .....                                                          | 136 |
| 2.2.2.1.     | Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları.....                             | 136 |
| 2.2.2.2.     | Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi .....                | 139 |
| 2.2.2.3.     | Sarsma Masası Deneyleri.....                                                     | 142 |
| 2.2.2.3.1.   | Sarsma Masası Deney Kurulumu.....                                                | 143 |
| 2.2.2.3.2.   | Deney Sonuçları.....                                                             | 148 |
| 2.2.2.3.2.1. | Deney Sonrası Hasar Tespitleri .....                                             | 148 |
| 2.2.2.3.2.2. | Görsel Tespitler.....                                                            | 148 |
| 2.2.2.3.2.3. | Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....              | 150 |
| 2.2.2.3.2.4. | Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi.....                                        | 156 |
| 2.2.2.4.     | Onarım-Güçlendirme Çalışmaları.....                                              | 161 |
| 2.2.2.4.1.   | Güçlendirilmiş Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi ..... | 166 |
| 2.2.2.4.2.   | Sarsma Masası Deneyleri.....                                                     | 169 |
| 2.2.2.4.2.1. | Sarsma Masası Deney Kurulumu.....                                                | 169 |

|                |                                                                     |     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.2.4.2.2.   | Deney Sonuçları.....                                                | 172 |
| 2.2.2.4.2.2.1. | Deney Sonrası Hasar Tespitleri .....                                | 172 |
| 2.2.2.4.2.2.2. | Görsel Tespitler.....                                               | 173 |
| 2.2.2.4.2.2.3. | Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... | 174 |
| 2.2.2.4.2.2.4. | Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi.....                           | 179 |
| 2.2.2.4.3.     | Sayısal Simülasyon (LP ile Güçlendirilmiş Model) .....              | 184 |
| 2.2.2.4.3.1.   | LP ile Güçlendirilmiş Yığma Yapının Modellenmesi .....              | 184 |
| 2.2.2.4.3.2.   | Analiz ve Sonuçlar .....                                            | 185 |
| 2.3.           | Bims Bina Modeli .....                                              | 189 |
| 2.3.1.         | Modelin Geometrik-Malzeme Özellikleri ve İnşa Aşamaları.....        | 189 |
| 2.3.2.         | Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi .....   | 192 |
| 2.3.3.         | Sarsma Masası Deneyleri.....                                        | 195 |
| 2.3.3.1.       | Sarsma Masası Deney Kurulumu.....                                   | 195 |
| 2.3.3.2.       | Deney Sonuçları.....                                                | 198 |
| 2.3.3.2.1.     | Deney Sonrası Hasar Tespitleri .....                                | 198 |
| 2.3.3.2.2.     | Görsel Tespitler.....                                               | 198 |
| 2.3.3.2.3.     | Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... | 200 |
| 2.3.3.2.4.     | Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi.....                           | 204 |
| 2.4.           | Gaz Beton Modeli .....                                              | 210 |
| 2.4.1.         | Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları .....               | 210 |
| 2.4.2.         | Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi .....   | 213 |
| 2.4.3.         | Sarsma Masası Deneyleri.....                                        | 216 |
| 2.4.3.1.       | Sarsma Masası Deney Kurulumu.....                                   | 216 |
| 2.4.3.2.       | Deney Sonuçları.....                                                | 218 |
| 2.4.3.2.1.     | Deney Sonrası Hasar Tespitleri .....                                | 218 |
| 2.4.3.2.2.     | Görsel Tespitler.....                                               | 218 |
| 2.4.3.2.3.     | Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... | 221 |
| 2.4.3.2.4.     | Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi.....                           | 226 |
| 2.5.           | Modal Güvence Kriteri (MGK)'nin Hasarla Değişimi .....              | 231 |
| 3.             | SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                          | 233 |
| 4.             | KAYNAKLAR .....                                                     | 239 |
| ÖZGEÇMİŞ       |                                                                     |     |

Doktora Tezi

## ÖZET

### LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ FARKLI DUVAR TİPLERİNDEKİ YIĞMA BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE ANALİTİK İNCELENMESİ

Ali KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Süleyman ADANUR  
2023, 259 Sayfa

Depremlerin en fazla etkilediği yapı türlerinden biri yığma yapılarıdır. Aynı zamanda yığma yapılar bina stoklarının büyük bir kısmını oluşturdıklarından, bu yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi önemlidir. Doğal afetlerin en büyük zarara sebep olanı şüphesiz depremlerdir. Geçmişten günümüze kadar yaşanmış olan yıkıcı depremler, günümüzde ve gelecekte de tedbirlerin alınması zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle mevcut yapının dinamik davranışlarının belirlenmesi alınacak önlemleri ve güçlendirme tekniklerini belirlemede son derece önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, farklı hasar durumlarını dikkate alarak, farklı yığma birim ile inşa edilmiş yarı ölçekli yığma yapıların sismik performansını değerlendirmektir. Sarsma masası deneyi farklı yükleme koşulu ile yapılmıştır. Farklı hasar durumlarını elde etmek için, yapıya artımlı olarak sismik uyarılar uygulanmıştır. Her yükleme sonrası, hasar durumları ve ilgili hasar şablonları karşılaştırmalı olarak incelendi. Hasarı deneysel olarak gözlemlemek için, sismik yüklemeler öncesi ve sonrası yapılan ortam titreşim testleri sonucu, yapının hasarsız ve hasarlı durumları için modal parametreler tanımlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, sayısal yazılımlarda yapılan simülasyonlarda karşılaştırıldı ve benzer sonuçlar elde edildi. Bu çalışma kapsamında hasarlı tuğla model için LP malzeme ile güçlendirme çalışmasının sonuçları da verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel modal analiz, Dinamik davranış, Yığma, Sarsma masası, Deprem simülasyonu, Dinamik karakteristikler, Lifli polimer kompozit malzeme, Blender.

PhD. Thesis

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF MASONRY BUILDINGS CONSTRUCTED WITH DIFFERENT MASONRY UNITS RETROFITTING WITH FIBER REINFORCED POLYMERS

Ali KAYA

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Suleyman ADANUR  
2023, 259 Pages

One of the building types most affected by earthquakes is masonry structures. At the same time, since masonry structures constitute a large part of the building stocks, it is important to determine the dynamic behavior of these structures. Undoubtedly, earthquakes are the most damaging of natural disasters. The destructive earthquakes that have been experienced from the past to the present reveal the necessity of taking precautions today and in the future. For this reason, determining the dynamic behavior of the existing structure is extremely important in determining the measures to be taken and strengthening techniques.

The aim of this study is to evaluate the seismic performance of semi-scale masonry structures built with different masonry units, taking into account different damage situations. The shaking table test was carried out with different loading conditions. Incremental seismic excitations were applied to the structure to obtain different damage states. After each loading, damage cases and related damage patterns were examined comparatively. In order to observe the damage experimentally, modal parameters were defined for the undamaged and damaged conditions of the structure as a result of the ambient vibration tests performed before and after seismic loads. Obtained experimental results were compared in simulations made in numerical software and similar results were obtained. Within the scope of this study, the results of the strengthening study with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) for the damaged brick model are also given.

**Key Words:** Experimental modal analysis, Dynamic behavior, Masonry, Shake table, Earthquake simulation, Dynamic characteristics, Fiber reinforced polymer, Blender.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|             |                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | (a) Tek yönlü sismik bir harekete maruz kalmış yığma yapıda oluşacak tipik deformasyon ve hasar şekli [55]; (b) Düzlem dışı yükleme nedeniyle yığma duvar çökmesi ve düzlem yönünde çapraz çatlak [56]..... | 6  |
| Şekil 1.2.  | Donatısız yığma yapılar [71]. .....                                                                                                                                                                         | 13 |
| Şekil 1.3.  | (a) Donatılı boşluklu birim yığma duvar, (b) Donatılı harçlı boşluklu yığma duvar, (c)Donatılı cep tipi duvar [74]. .....                                                                                   | 15 |
| Şekil 1.4.  | Sarılmış yığma duvar örneği [72]. .....                                                                                                                                                                     | 16 |
| Şekil 1.5.  | Tipik bir iki katlı sarılmış yığma binanın bileşenleri [71,73]. .....                                                                                                                                       | 17 |
| Şekil 1.6.  | Öngermeli ve ardgermeli yığma yapım örnekleri [74]. .....                                                                                                                                                   | 18 |
| Şekil 1.7.  | Düzlem içi ve düzlem dışı yönler .....                                                                                                                                                                      | 20 |
| Şekil 1.8.  | Yığma duvarda diyagonal kesme çatlakları .....                                                                                                                                                              | 21 |
| Şekil 1.9.  | Yükleme altında duvarın kesme mekanizması [55]. .....                                                                                                                                                       | 21 |
| Şekil 1.10. | Eğilme ve kayma durumundaki hasar şekilleri [79]. .....                                                                                                                                                     | 22 |
| Şekil 1.11. | Sismik etkinin genliğinin bir fonksiyonu olarak hasar göstergesinin gelişimi [80]. .....                                                                                                                    | 26 |
| Şekil 1.12. | Darbe Çekici ve Başlıkları [57]. .....                                                                                                                                                                      | 29 |
| Şekil 1.13. | Piezoelektrik tipi üçeksenli ivmeölçer .....                                                                                                                                                                | 30 |
| Şekil 1.14. | B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi .....                                                                                                                                                       | 31 |
| Şekil 1.15. | ÇTY'ye göre dinamik karakteristiklerin belirlenmesi .....                                                                                                                                                   | 34 |
| Şekil 1.16. | ZTY yönteminin akış şeması [57]. .....                                                                                                                                                                      | 37 |
| Şekil 1.17. | (a) detaylı mikro modelleme, (b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, (c) Makro modelleme [52]. .....                                                                                                          | 41 |
| Şekil 2.1.  | Sarsma masası deney düzeneğine ait şematik gösterim.....                                                                                                                                                    | 69 |
| Şekil 2.2.  | Harç üretimine ait görseller .....                                                                                                                                                                          | 72 |
| Şekil 2.3.  | Harç numunelerinin eğilmede çekme ve basınç deneylerine ait görseller...                                                                                                                                    | 72 |
| Şekil 2.4.  | Beton numunelerin alınması ve malzeme testi .....                                                                                                                                                           | 75 |
| Şekil 2.5.  | Deney modellerinin geometrik özellikleri .....                                                                                                                                                              | 77 |
| Şekil 2.6.  | Modelin kalıp hazırlanmasına ait görünüşler ve beton dökümü.....                                                                                                                                            | 83 |
| Şekil 2.7.  | İlk duvar birimlerin temele gömülmesi.....                                                                                                                                                                  | 83 |
| Şekil 2.8.  | Yarım ölçekli boşluklu tuğla birim eleman görünüşü ve boyutları (cm).....                                                                                                                                   | 84 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.9.  | Delikli tuğla duvar örümü.....                                                                                                                                                                                                                                | 85  |
| Şekil 2.10. | Döşeme kalıp üretimi.....                                                                                                                                                                                                                                     | 86  |
| Şekil 2.11. | Döşeme donatı uygulaması.....                                                                                                                                                                                                                                 | 87  |
| Şekil 2.12. | Ön deney model döşeme beton dökümü ve inşası tamamlanmış model .....                                                                                                                                                                                          | 87  |
| Şekil 2.13. | Ölçümlere ait ivmeölçer dizilimi .....                                                                                                                                                                                                                        | 89  |
| Şekil 2.14. | DMA ölçümlerine ait görseller .....                                                                                                                                                                                                                           | 91  |
| Şekil 2.15. | Ön deney tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....                                                                                                                                                                                       | 92  |
| Şekil 2.16. | Ön deney tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri.....                                                                                                                                                                                     | 93  |
| Şekil 2.17. | Deney modelinin sarsma masasına taşınması ve montajı .....                                                                                                                                                                                                    | 96  |
| Şekil 2.18. | LPDT ve ivmeölçer konum ve doğrultuları .....                                                                                                                                                                                                                 | 97  |
| Şekil 2.19. | Ön deney için kurulan deney düzeneğine ait görseller .....                                                                                                                                                                                                    | 99  |
| Şekil 2.20. | Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri .....                                                                                                                                                       | 100 |
| Şekil 2.21. | Test numunesinin dış yüzeyinin kümülatif hasar modeli. Siyah ve mavi işaretler, sırasıyla mevcut ve yeni çatlakları temsil eder. ....                                                                                                                         | 104 |
| Şekil 2.22. | DS-4 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli: (a ve b) kuzeye bakan duvarda diyagonal çapraz çatlaklar ve (c ve d) üstte yataya yakın kayma çatlakları doğu ve batıya bakan duvarların bir kısmı .....                                         | 105 |
| Şekil 2.23. | Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) hasarsız durum için, (b) DS-2 için (hafif yapısal hasar) ve (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme).....                                                                                               | 107 |
| Şekil 2.24. | Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) hasarsız durum için (b) DS-2 için (hafif yapısal hasar) ve (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme).....                                                                   | 108 |
| Şekil 2.25. | Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler.....                                                                                                                                                                    | 111 |
| Şekil 2.26. | Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI.....                                                                                                                                                                                | 111 |
| Şekil 2.27. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değiştirmelerin değişimi.....                                                                                                                                                                          | 113 |
| Şekil 2.28. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi .....                                                                                                                                                                                          | 113 |
| Şekil 2.29. | Döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-3 Parkfield Depremi (PGA=0.60g); b. GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.80g)) .....                                                                                           | 114 |
| Şekil 2.30. | Orta yükseklik ve döşemedeki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,: (a) GM-3 Parkfield Depremi için (PGA=0.60g), (b) GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g) ve ( c) GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g))..... | 115 |

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.31   | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 116 |
| Şekil 2.32.  | Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekansların değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                   | 117 |
| Şekil 2.33   | Birden çok sınırlamaya duyulan ihtiyacı gösteren örnek.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 120 |
| Şekil 2.34   | BCB'deki bağlantı tipleri [234]. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 121 |
| Şekil 2.35   | Bağlantı türü 15 sınırlama yapılandırmasının görsel sunumu [244].....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 121 |
| Şekil 2.36.  | GM-6'dan sonra simülasyon ve deney için yığma modelinin hasar koşulları ve çatlama modelleri .....                                                                                                                                                                                                                                             | 129 |
| Şekil 2.37   | Deneyde gözlemlendiği şekliyle burulma hareketinin gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 130 |
| Şekil 2.38   | Göçme durumunun yönü ve şekli .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 130 |
| Şekil 2.39   | Temel kalıp işlemleri ve beton dökümü.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 137 |
| Şekil 2.40.  | Delikli tuğla duvar üretimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 138 |
| Şekil 2.41   | İnşası tamamlanmış tuğla model.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 139 |
| Şekil 2.42.  | DMA ölçümlerine ait görsel .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 140 |
| Şekil 2.43.  | Tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 140 |
| Şekil 2.44.  | Tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 141 |
| Şekil 2.45.  | LPDT ve ivmeölçer konum ve doğrultuları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 143 |
| Şekil 2.46.  | Tuğla modelde kullanılan deney düzeneğine ait görseller.....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 144 |
| Şekil 2.47.  | Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri .....                                                                                                                                                                                                                                        | 146 |
| Şekil 2.48.  | Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 149 |
| Şekil 2.49.  | DS-4 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli.....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 150 |
| Şekil 2. 50. | Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum.....                              | 151 |
| Şekil 2.51   | Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum ..... | 154 |
| Şekil 2.52.  | Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 156 |
| Şekil 2.53.  | Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 156 |
| Şekil 2.54.  | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değiştirmelerin değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                           | 158 |
| Şekil 2.55.  | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 158 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.56. | Döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g)) .....                                                                                                                                                                    | 158 |
| Şekil 2.57. | Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşemedeki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği: (a) GM-1 ERZ-25 Depremi için (PGA=0.13g), (b) GM-5 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.50g) ve ( c) GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.70g)) .....                                                                  | 160 |
| Şekil 2.58. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 160 |
| Şekil 2.59. | Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 161 |
| Şekil 2.60. | Tuğla modelin güçlendirilmesine ait bazı görseller .....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 163 |
| Şekil 2.61. | Güçlendirilmiş model için DMA ölçümlerine ait görseller .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 166 |
| Şekil 2.62. | Güçlendirilmiş tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 167 |
| Şekil 2.63. | Güçlendirilmiş tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 168 |
| Şekil 2.64. | Güçlendirilmiş tuğla modelde kullanılan deney düzeneğine ait görseller.....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 170 |
| Şekil 2.65. | Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 171 |
| Şekil 2.66. | Güçlendirilmiş tuğla modelin hasar modeli .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 173 |
| Şekil 2.67. | Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için (İlave kütsesiz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsesiz), (d) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum.....                              | 175 |
| Şekil 2.68. | Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: a) Hasarsız durum için (İlave kütsesiz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsesiz), (d) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum ..... | 176 |
| Şekil 2.69. | Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 179 |
| Şekil 2.70. | Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI.....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 179 |
| Şekil 2.71. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum göreceli yer değiştirmelerin değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                             | 180 |
| Şekil 2.72. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 180 |
| Şekil 2.73. | Döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-7 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.80g); b. GM-8 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.90g)); c. GM-9 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=1.00g)) .....                                                                                                                   | 181 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 2.74. | Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşemedeki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği, (a) GM-4 ERZ-100 Depremi için (PGA=0.5g), (b) GM-8 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.90g) ve (c) GM-9beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=1.00g)) ..... 182 |
| Şekil 2.75. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi..... 183                                                                                                                                                                                                             |
| Şekil 2.76. | Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri..... 183                                                                                                                                                                                                               |
| Şekil 2.77. | GM-9'dan sonra simülasyon ve deney için yığma modelinin hasar koşulları ve çatlama modelleri ..... 186                                                                                                                                                                              |
| Şekil 2.78. | Bims duvar üretimine ait görseller..... 190                                                                                                                                                                                                                                         |
| Şekil 2.79. | Bims beton kesimine ait görsel ..... 190                                                                                                                                                                                                                                            |
| Şekil 2.80. | Döşeme donatı çalışması..... 191                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2.81. | Bims model ..... 192                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Şekil 2.82. | DMA ölçümlerine ait görsel ..... 193                                                                                                                                                                                                                                                |
| Şekil 2.83. | Bims model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri..... 193                                                                                                                                                                                                                   |
| Şekil 2.84. | Bims modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri..... 194                                                                                                                                                                                                                 |
| Şekil 2.85. | Bims modelin sarsma masasına taşınması ..... 197                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2.86. | Bims modeline ait deney düzeneği ..... 197                                                                                                                                                                                                                                          |
| Şekil 2.87. | Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli. .... 199                                                                                                                                                                                                                               |
| Şekil 2.88. | DS-5 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli..... 199                                                                                                                                                                                                                |
| Şekil 2.89. | Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız-İlave kütsüz durum için, (b) Hasarsız-İlave kütleli durum için, (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli durum için) ..... 201                                                                          |
| Şekil 2.90. | Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) hasarsız-İlave kütsüz durum için (b) Hasarsız-İlave kütleli durum için ve (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme)..... 202                                                                      |
| Şekil 2.91. | Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler..... 204                                                                                                                                                                                      |
| Şekil 2.92. | Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI..... 204                                                                                                                                                                                                  |
| Şekil 2.93. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değiştirmelerin değişimi..... 205                                                                                                                                                                                            |
| Şekil 2.94. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi ..... 206                                                                                                                                                                                                            |
| Şekil 2.95. | Döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g)) ..... 206                                                                                                   |
| Şekil 2.96. | Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotundaki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği, (a) GM-1 ERZ-25 Depremi için (PGA=0.13g), (b) GM-5 beş çevrimli                                                                                            |

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Sinüs Dalgası için (PGA=0.50g) ve ( c) GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.70g)) ..... 207                                                                                                                                                                                                       |
| Şekil 2.97.  | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi..... 208                                                                                                                                                                                                                                  |
| Şekil 2.98.  | Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri..... 209                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2.99.  | Gaz beton kesimine ait görünüşler..... 211                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Şekil 2.100. | Gaz beton duvar üretimi..... 211                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Şekil 2.101. | Döşeme donatı uygulaması ..... 212                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Şekil 2.102. | Gaz beton model ..... 213                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Şekil 2.103. | DMA ölçümlerine ait görsel ..... 214                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Şekil 2.104. | Gaz beton model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri..... 214                                                                                                                                                                                                                                   |
| Şekil 2.105. | Gaz beton modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri..... 215                                                                                                                                                                                                                                 |
| Şekil 2.106. | Gaz beton modeline ait deney düzeneği ..... 217                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Şekil 2.107. | Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli. .... 219                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2.108. | DS-5 tipi hasar durumu için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli ..... 220                                                                                                                                                                                                                       |
| Şekil 2.109. | Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için, (b) GM-4 (ERZ-100) için, (c) GM-6 (Sinüs dalgası 0.7 g) için ve (d) GM-7 (Sinüs dalgası 0.8 g) ..... 221                                                                                                                               |
| Şekil 2.110. | Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) Hasarsız durum için, (b) GM-4 (ERZ-100) için, (c) GM-6 (Sinüs dalgası 0.7 g) için ve (d) GM-7 (Sinüs dalgası 0.8 g)..... 223                                                                                                   |
| Şekil 2.111. | Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler ..... 225                                                                                                                                                                                                          |
| Şekil 2.112. | Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI..... 225                                                                                                                                                                                                                       |
| Şekil 2.113. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değiştirmelerin değişimi..... 227                                                                                                                                                                                                                 |
| Şekil 2.114. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi ..... 227                                                                                                                                                                                                                                 |
| Şekil 2.115. | Döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g); c. GM-7 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA= 0.80 g)) ..... 228                                                                      |
| Şekil 2.116. | Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotundaki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,: (a) GM-5 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.50g), (b) GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.70g) ve ( c) GM-7 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g)) ..... 229 |
| Şekil 2.117. | Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi..... 230                                                                                                                                                                                                                                  |
| Şekil 2.118. | Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri..... 230                                                                                                                                                                                                                                    |
| Şekil 2.119. | Tüm modeller için MGK değerlerinin (%) artan hasar ile değişimi..... 231                                                                                                                                                                                                                                 |

## TABLolar DİZİNİ

|                                                                                                                                         | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 1.1. Tuğla genel malzeme özellikleri [65]. ....                                                                                   | 10                     |
| Tablo 1.2. Hafif beton blok ve bims basınç dayanımları [66].....                                                                        | 10                     |
| Tablo 1.3. Harç sınıfları ve basınç dayanımları [60,70].....                                                                            | 12                     |
| Tablo 1.4. Avrupa Makrosismik Ölçeğinin 12 bölümü [81].....                                                                             | 25                     |
| Tablo 1.5. Yığma binalar için EMS-98 ölçeğine göre belirlenen hasar dereceleri .....                                                    | 26                     |
| Tablo 1.6. B&K 4506 B 003 ve B&K 4507 B 005 tipi üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler [84, 85]. ....             | 30                     |
| Tablo 2.1. Harç üretiminde kullanılan çimento özellikleri .....                                                                         | 70                     |
| Tablo 2.2. Gaz beton örgü harcı malzeme özellikleri .....                                                                               | 71                     |
| Tablo 2.3. Harç karışım oranları (hacimce) .....                                                                                        | 71                     |
| Tablo 2.4. Yığma yapı modellerinde kullanılan harçların bazı özellikleri.....                                                           | 72                     |
| Tablo 2.5. Temellerde ve döşemelerde kullanılan donatıların malzeme özellikleri .....                                                   | 73                     |
| Tablo 2.6. Birim eleman özellikleri .....                                                                                               | 74                     |
| Tablo 2.7. Küp numunelerin mekanik özellikleri .....                                                                                    | 75                     |
| Tablo 2.8. 1:2 ölçekli bir dinamik model için benzerlik ölçeği faktörleri (Ölçek Katsayısı ( $\lambda=2$ )) .....                       | 80                     |
| Tablo 2.9. Ön deney tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler.....                       | 94                     |
| Tablo 2.10. Uygulanan yer hareketleri.....                                                                                              | 100                    |
| Tablo 2.11. Ön deney tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler..... | 110                    |
| Tablo 2.12. Simülasyonda kullanılan duvarın mekanik özellikleri.....                                                                    | 128                    |
| Tablo 2.13. Modelin 2,56. saniyede perspektif ve ortogonal görünümüleri (Çatlak Başlangıç noktası).....                                 | 131                    |
| Tablo 2.14. Modelin 3. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                            | 132                    |
| Tablo 2.15. Modelin 4. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                            | 132                    |
| Tablo 2.16. Modelin 5. Saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                            | 133                    |
| Tablo 2.17. Modelin 6. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                            | 133                    |
| Tablo 2.18. Modelin 7. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                            | 134                    |

|             |                                                                                                                                   |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 2.19. | Modelin 8.36. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri.....                                                                | 134 |
| Tablo 2.20. | Modelin 2,56. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümüleri (Çatlak Başlangıç noktası) .....              | 135 |
| Tablo 2.21. | Tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler .....                                    | 142 |
| Tablo 2.22. | Uygulanan yer hareketleri.....                                                                                                    | 145 |
| Tablo 2.23. | Tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler.....                | 155 |
| Tablo 2.24. | Mbrace Primer astara ait teknik özellikler .....                                                                                  | 165 |
| Tablo 2.25. | Epoksi malzemeye ait teknik özellikler .....                                                                                      | 165 |
| Tablo 2.26. | Karbon takviyeli LP malzemenin teknik özellikleri .....                                                                           | 165 |
| Tablo 2.27. | Güçlendirilmiş tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler.....                      | 169 |
| Tablo 2.28. | Uygulanan yer hareketleri.....                                                                                                    | 171 |
| Tablo 2.29. | Güçlendirilmiş tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler..... | 178 |
| Tablo 2.30. | Modelin hasarsız durumundaki perspektif ve ortogonal görünümüleri.....                                                            | 186 |
| Tablo 2.31. | Modelin 1. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                                  | 187 |
| Tablo 2.32. | Modelin 2. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri .....                                                                  | 187 |
| Tablo 2.33. | Modelin 1. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümüleri.....                                             | 188 |
| Tablo 2.34. | Modelin 2. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümüleri.....                                             | 188 |
| Tablo 2.35. | Bims model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler .....                                     | 195 |
| Tablo 2.36. | Bims model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler.....                 | 203 |
| Tablo 2.37. | Gaz beton model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler.....                                 | 216 |
| Tablo 2.38. | Gaz beton model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız ve hasarlı durum dinamik karakteristikler .....                     | 224 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                   |                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| $A$               | Alan                                                         |
| $a$               | İvme                                                         |
| $a_0, a_n, b_n$   | Fourier serisi katsayıları                                   |
| $A_k$             | Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi |
| ÇTY               | Çevresel Titreşim Yöntemi                                    |
| DI                | Hasar İndeksi                                                |
| DMA               | Deneysel Modal Analiz                                        |
| $E$               | Elastisite modülü                                            |
| $F$               | Kuvvet                                                       |
| $f_{ck}$          | Betonun karakteristik basınç dayanımı                        |
| $f$               | Frekans                                                      |
| $g$               | Yerçekimi ivmesi                                             |
| GFOA              | Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma                  |
| $G_{xx}(j\omega)$ | Etki sinyallerinin GSY fonksiyonu                            |
| $G_{yy}(j\omega)$ | Tepki sinyallerinin GSY fonksiyonu                           |
| $H(j\omega)$      | Frekans davranış fonksiyonu                                  |
| $H_{ik}(i\omega)$ | Transfer matrisi                                             |
| $I$               | Bina önem katsayısı                                          |
| KMGK              | Koordinat Modal Güvence Kriteri                              |
| $l$               | Uzunluk                                                      |
| LPDT              | Lineer Potansiyometrik Cetvel                                |
| $m$               | Kütle                                                        |
| MGK               | Modal Güvence Kriteri                                        |
| $M_M$             | Deney modelinin ağırlığı                                     |
| $M_{m0}$          | Deney modelinin kütlesi                                      |
| $M_{m1}$          | Deney modeline ilave edilecek kat kütlesi                    |
| $M_P$             | Ölçeklendirilmemiş bina ağırlığı                             |
| $M_r$             | Kütle oranı                                                  |
| $n$               | Mod sayısı                                                   |
| $N_m$             | Mod şekli sayısı                                             |

|               |                                                |
|---------------|------------------------------------------------|
| OMA           | Operasyonel Modal Analiz                       |
| PEER          | Pacific Earthquake Engineering Research Center |
| $R_k$         | Artık değer fonksiyonu                         |
| $s$           | Tekil değer                                    |
| $S_{ae}$      | Spektral ivme                                  |
| $S_i$         | Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris |
| $s_{ij}$      | Skaler tekil değerler                          |
| $S_L$         | Ölçek faktörü                                  |
| $t$           | Zaman                                          |
| $T$           | Doğal titreşim periyodu                        |
| $T_m$         | Deprem hakim periyodu                          |
| $U$           | Binaların tasarım yer değiştirmesi             |
| $U_i$         | Tekil vektörleri içeren bütün matris           |
| $u_{ij}$      | Tekil vektörler                                |
| $V$           | Hacim                                          |
| $v$           | Hız                                            |
| $X_i(w)$      | Frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonu      |
| $X_k(t)$      | Zaman tanım alanındaki yapay etki sinyali      |
| $Y_k(t)$      | Zaman tanım alanındaki tepki fonksiyonu        |
| $Y_k(w)$      | Frekans tanım alanındaki etki fonksiyonu       |
| ZTY           | Zorlanmış Titreşim Yöntemi                     |
| $\varepsilon$ | Şekil değiştirme                               |
| $\lambda_k$   | Kutup fonksiyonu                               |
| $\nu$         | Poisson oranı                                  |
| $\xi$         | Sönüm oranı                                    |
| $\rho$        | Kolerasyon faktörü                             |
| $\sigma$      | Gerilme                                        |
| $\phi$        | Mod şekil vektörü                              |
| $\omega$      | Açısal frekans                                 |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

İnsanoğlunun var oluşundan itibaren en önemli ihtiyaçlarının başında barınma gelmektedir. Bu barınma ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli çözümler bularak farklı örgü ve bağlayıcı malzemeler ile taşıyıcı sisteme sahip yapılar inşa edilmiştir. İlk zamanlarda ağaç ürünlerinden inşa edilen basit barınaklar zamanla kendini estetik ve gelişmiş yığma yapılara daha sonra da betonarme ve çelik gibi malzemelerin yapılarda kullanılması ile yerini gelişmiş yapılara bırakmaktadır. Tüm bu süreçte coğrafi konum, ulaşılabilirlik, ihtiyaçlar göz önüne alındığında farklı duvar malzemeleri ile inşa edilmiş yapılar bulunmaktadır. Yığma yapılar, malzemelerinin taş, tuğla, harç gibi malzemelerden yapılan basit yapılar olması nedeniyle insanoğlunun günümüze kadar kullandığı en önemli ve yaygın yapılardandır. Uzun bir süredir insanoğlunun hizmetinde olan ve kendi döneminin özelliklerini, estetik anlayışını yansıtan tarihi yığma yapıların her biri tarih hafızamızın önemli parçalarıdır. Bu nedenle zaman içerisinde hasar gören anıtsal nitelikteki tarihi yığma yapıların onarımı/güçlendirilmesi ve korunması oldukça önemlidir.

Depremler, fırtınalar, volkanik patlamalar, seller veya heyelanlar gibi doğal afetlerin neden olduğu aşırı yükleme, dinamik titreşimler, oturma ve düzlem içi ve düzlem dışı deformasyonlar yığma yapı duvarlarının hasar görmesine neden olabilir. Doğal afetlerin en büyük zarara sebep olanı yer kabuğunda meydana gelen kırılmalardan dolayı oluşan depremlerdir. Yığma yapılarda herhangi bir müdahalede bulunmadan önce mevcut hasar durumunun ve yapısal davranışının belirlenmesinde yapısal analiz önemli bir yer tutmaktadır [1]. Bu nedenle, gelecekteki depremlere karşı kapasitelerini gözden geçirmek ve mevcut yığma yapıları güçlendirmeye yönelik uygun bir yöntem bulmak için mevcut yapıların sismik olarak incelenmesi gerekmektedir. Yığma yapıların yapısal zafiyetleri ve hasar veya göçme biçimleri birçok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [2-9]. Depremin yığma yapılar açısından yıkıcı özelliklerinden birisi tersinir yük oluşturmaları ve yapıda hem basınç hem de çekme kuvvetleri oluşturmalarıdır. Çeşitli ülkelerdeki son depremler yığma köprüler, dini tapınaklar ve diğer anıtsal nitelikteki yapılarda büyük hasar ve tahribata yol açmıştır. Geçmişte yaşanan depremler en çok hasarı yığma yapılara vermiştir. Yapısal onarım ve güçlendirme ihtiyacı, yığma yapıların mekanizmasındaki

zayıflıkları ve deformasyonlarını iyi anlamamıza neden oldu. Deprem esnasında oluşan yatay yüklerin etkisi altında kalan yığma yapılar inşa edildiği duvar malzemesi ve harç malzemelerinin dayanımına bağlı olarak basınç gerilmelerine karşı dayanıklı şekilde tasarlanmasına rağmen çekme dayanımları oldukça düşüktür [10, 11]. Betonarme yapılarda olduğu gibi çekme gerilmelerine karşı koyacak çelik gibi elemanlar olmadığı için sünek davranış gösteremeyerek hasar gerçekleşebilir. Yığma yapılar çerçeveli yapılara göre daha gevrek davranış göstermektedirler. Yığma yapıların dinamik davranışı, malzeme özelliklerine, bina geometrisine, temel durumuna, duvar-zemin, duvar-çatı birleşimlerine ve yatay diyafram rijitliklerine bağlıdır ve belirlenmesi oldukça zordur [12, 13]. Malzeme ve harç özelliklerinden dolayı heterojen bir yapıya sahip olan yığma yapılar, geometrik düzenden dolayı anizotropik özellik göstermektedir diyebiliriz. Öyle ki geometrik düzen yapının mekanik tepkisini etkilemektedir.

Yığma yapıların analizinde, bu yapılar üzerinde deneysel çalışmaların zorluğundan dolayı sayısal ve tahribatsız deneysel analizlerden yararlanılmaktadır. Tamamen tahribatsız deneysel bir yöntem olan deneysel modal analiz (DMA), yığma yapılar için daha uygundur. Deneysel çalışmalarla doğrulanan ve güncellenen sayısal veriler, yığma yapılar için uygun ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Ayrıca yığma yapıların dinamik davranışını araştırmak için bir diğer yöntem de laboratuvar ortamında ölçekli modeller oluşturmaktır. Herhangi bir mühendislik yapısının gerçek deprem davranışını laboratuvar ortamında belirlemek ve incelemek için ölçekli laboratuvar modellerine ve deprem hareketini simüle edebilen ve bunu model yapıya uygulayabilen bir sarsma masasına ihtiyaç vardır. Bu durum kapsamlı laboratuvar olanakları gerektirdiğinden, literatürde sarsma masası kullanılarak yığma yapıların deprem davranışı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. DMA yöntemi, tahribatsız yapısı nedeniyle birçok araştırmacı tarafından yığma yapıların dinamik özelliklerini elde etmek için yapılan çalışmalarda kullanılmıştır [14-18]. Bu yöntem cami, minare, köprü, kilise gibi yığma yapıların olduğu yerlerde rahatlıkla kullanılmaktadır [19-32]. Bu yöntemde incelenecek yapı üzerine hassas ivmeölçerler yerleştirilir. Titreşim sinyalleri bir veri toplama ünitesi yardımıyla toplanır ve güncel yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilir.

Deprem sırasında oluşan yatay yüklerin yapılarda ve yapı elemanlarında oluşturduğu gerilmeleri ve bu yatay dinamik etki karşısında yapının davranışını belirlemek için birçok deneysel yöntem bulunmaktadır. Sarsıntı masası testi ile oluşturulan deprem simülasyonu, yapı ve yapı elemanlarının yer değiştirme ve modal parametrelerini elde etmek için

kullanılan en iyi yöntemlerden biridir [33-37]. Birçok araştırmacı, küçük ölçekli ve tam ölçekli yığma duvar yapılarında performansını, açıklığın etkisini, duvar en boy oranını, farklı diyafram tiplerini vb. incelemiştir. [38-44]. Ayrıca, yığma yapıların hasar mekanizmaları laboratuvarda sarsma masası deneyleri kullanılarak deneysel olarak belirlenebilir. Bu inceleme sonucunda yığma yapıların güçlendirme bölgeleri ve güçlendirme yöntemleri hakkında veri üretilebilir. Yığma bir yapının laboratuvar ortamında üretilmesi ve sarsma masası üzerinde dinamik olarak test edilmesi, işçilik ve çevre koşulları nedeniyle oldukça zordur. Bu nedenlerle yığma yapıların bir bütün olarak laboratuvar ortamında incelenmesi literatürde sınırlıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak yığma duvar veya ölçekli yapılar gibi yapı elemanları üzerinde sarsma masası testleri yapılmaktadır. Bu çalışmada, 1/2 ölçekli yığma binaların dinamik davranışı sarsma masası testleri ile deneysel olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Son yıllarda, sarsma masası deneylerinden elde edilen dinamik özelliklere sahip sayısal modellerin doğrulanması yaygınlaştı. Son on yılda, bilgisayar grafiğinde yeni ortaya çıkan yöntemin araştırılması, yapıların yapısal analizine önemli katkılar sağlamıştır. Literatürde yığma yapıların tepkisini değerlendirmek için kullanılan hesaplamalı modelleme stratejileri, süreklilik ve süreksizlik modelleri olarak kategorize edilebilir [45-48]. Yığma yapıların sismik performansının analizinde genellikle mikro ve makro modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Mikro modelleme yaklaşımı ile modelleme, büyük miktarda hesaplama verisine neden olduğu için analizi zorlaştırır. Bununla birlikte, malzemelerin doğrusal elastik davranışına dayalı makro modelleme yaklaşımları, büyük ve karmaşık yığma yapıların analizini kolaylaştırır ([49]). Makro modellemede birimler, harç ve birim-harç arayüzü homojen bir süreklilik içinde dağıtılır. Xie ve arkadaşlarına göre [48], tarihi yığma kulelerin sismik davranışını daha ayrıntılı incelemek için makro modelleme yaklaşımıyla doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra ölçekli yığma modelin sarsma masası deneyleri ile elde edilen dinamik karakteristikler ve sismik davranış gibi deneysel sonuçlar sayısal analizlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yığma çalışmalarda deneysel analiz ve deprem simülasyonunun bir arada kullanılması bilgisayar grafiklerinde de ele alınmıştır [50]. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında inşa edilen yığma yapının 3 boyutlu modeli, gerçekçi ve doğru bir görsel etki elde etmek için sismik simülasyon etkisi altında deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu 3D simülasyonun ana katkısı, depremin mevcut yığma yapılar üzerindeki etkilerini değerlendirmektir.

Yığma duvarlar farklı iki malzemeden oluşmaktadır; duvar malzemeleri (gaz beton, taş, tuğla, blok) ve harç. Tarihte ilk başlarda ahşap ve taş malzemeden yapılan yığma binalar daha sonra endüstrinin gelişmesi ile özel amaçlar ve ölçüler için farklı malzemelerden yığma yapı inşa edilmeye başlandı. En eski yapı elemanlarından biri olan yığma duvarlar, yalnızca dünyanın dört bir yanındaki muhteşem tarihi yapılarda değil çeşitli yeni modern yapılarda da kullanılmaktadır. Yatay ve düşey yükleri karşılayan yığma duvarlar tuğla, harman tuğlası, gaz beton, taş ve bims beton gibi duvar malzemelerinin bağlayıcı elemanlar ile farklı örgü teknikleri ile örülmesiyle kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Bağlayıcı madde olan harçlar kil, bitüm, kalker, kireç / çimento esaslı harç, tutkal gibi malzemeler olabilir. Tarihi yığma yapılardaki sadeliğe rağmen belirli bir yapım tekniği standartlarının olmaması ve malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenememesi mekanik davranışlarının analizini oldukça zorlaştırmaktadır. Yığma duvar dayanımı duvar malzemesi, harç ve yapım tekniğine bağlı olarak değişmektedir. Duvar malzemelerinin her birinin basınç dayanımları birbirinden farklıdır. Harcın dayanımını ise bileşenlerinin karışım oranına ve mekanik özelliklerine göre farklı sapmalar göstermektedir ([51]). Ayrıca yığma yapıların dayanımı ve göçme modları yükleme yönü ve yük kombinasyonlarına bağlı olarak değişmektedir [52]. Yığma yapıların mekanik özellikleri yüksek birim hacim ağırlığı, düşük çekme dayanımı, düşük kayma mukavemeti ve düşük süneklik gibi ortak özelliklerine bağlıdır [12].

Betonarme yapılarda kullanılan TS-500 standardı gibi TS-2510 kargir “Duvarların Hesap ve Yapım Kuralları” standardı yığma yapılar için kullanılmaktadır. Buna ek olarak yığma yapıların dikkate almak zorunda olduğu “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) (2007)” yönetmeliği ve daha sonrasında çıkan “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) (2018)” yönetmeliği bulunmaktadır. Türkiye’de yaşayan nüfusun büyük bir bölümü deprem bölgelerinde yaşamaktadır. Bu nedenle yapıların deprem yönetmeliğini dikkate almasını zorunlu kılıyor. Bu yönetmelikte yığma yapıların duvar kalınlıkları, temelleri, boşluk miktarları ve kat sayısını deprem bölgelerine göre belirtmektedir. Yığma yapı malzemelerinin boyutlarının standartlaştırılması yapı tasarımında tasarımcının seçeneklerini sınırlamaktadır. Mimari açıdan incelendiğinde ise yığma yapıların planlarının kare ve dikdörtgen gibi basit ve simetrik olması gerekmektedir. Aksi halde karmaşık düzende olan yığma yapılar deprem esnasında burulma etkileri ile karşılaşacaktır. Kesme dayanımı düşük olan yığma yapılarda burulma nedeni ile ek kesme gerilmelerinin oluşmasına neden olacak yapı planlarından kaçınılmalı [53].

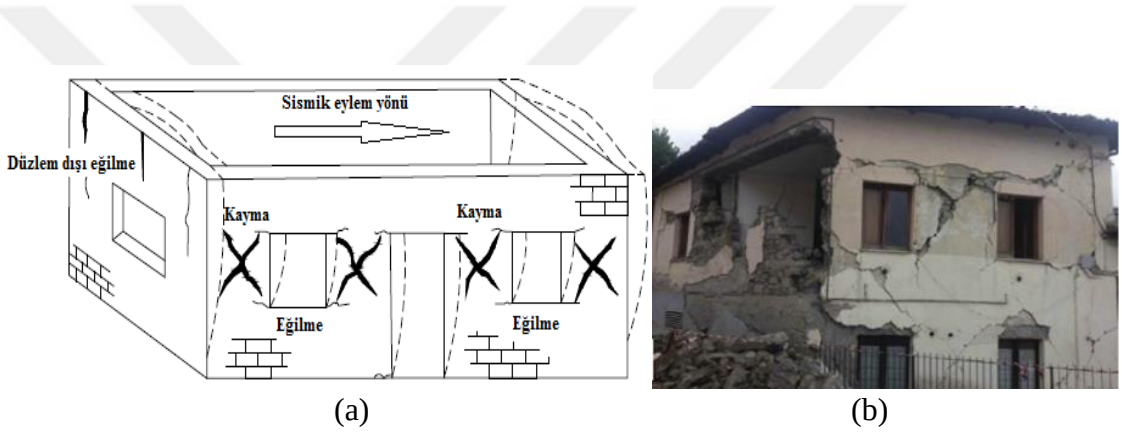
Tek eksenli ve iki eksenli yükleme sonucundaki yığma yapı davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bununla birlikte yığma duvarlarda çatlak evriminin ve yayılımının dijital görüntü korelasyonu tekniği kullanılarak gerinim haritaları çıkarılmıştır [13]. Yığma yapıların genel olarak aşırı yükleme, dinamik titreşimler, zemin oturması ve düzlem içi ve düzlem dışı deformasyonlar gibi yapıda kayma ve çekme gerilmeleri yığma yapı duvarlarının hasar görmesine neden olmaktadır. Yığma yapıların karakteristik ortak özelliklerinden en önemlisi basınç gerilmelerini karşılayacak şekilde inşa edilmelerine rağmen harç derzlerindeki süreksizliklerden dolayı yatay yüklere karşı zayıf olmalarıdır. Bazı duvar malzemelerinden inşa edilmiş yığma binalarda düşük ötelenmelerden dolayı çatlaklar gözlemlenebilir. Çatlamadan sonra elemanda kesmeye karşı etkin kesit alanı düşmektedir. Buna bağlı olarak kesme dayanımının aşılması çatlağın genişlemesine neden olmaktadır. Bu çatlamalar neticesinde yapı elemanları bütünlüğünü kaybederek yapıdan bağımsız hareket ederek yapının ağır hasar almasına hatta göçmesine sebep olur [54]. Sismik hareket yönüne dik olan duvarlarda düzlem dışı bükülme nedeniyle ortada ve köşelerde dikey çatlaklar oluşur. Şekil 1.1 de tek yönlü sismik bir harekete maruz kalmış yığma yapıda oluşacak tipik deformasyon ve hasar şekli gösterilmiştir. Bununla birlikte sismik eylemler neticesinde yığma yapılarda meydana gelebilecek hasar tipleri aşağıdaki gibidir [55]:

- Duvar ve döşemeler arasındaki çatlaklar;
- Köşe ve duvar birleşim yerlerindeki çatlaklar;
- Çevre duvarlarındaki düzlem dışı göçme;
- Taşıyıcı kiriş ve parapetlerdeki çatlaklar;
- Yapısal duvardaki diyagonal şekildeki çatlaklar;
- Yapısal duvarların kısmi parçalanması ve göçmesi;
- Binaların kısmen veya tamamen göçmesi.

Taş malzemedan yapılan yığma yapılar genellikle diğer malzemelerden yapılan yığma yapılara göre daha eski ve anıtsal ve kültürel miras niteliği taşımaktadır. Tuğla, gaz beton ve bims beton yığma yapılar daha yakın tarihlerde inşa edilmiş yapılardır. Yıllar içinde deprem, fırtına, sel, savaşlar ve yapı elemanlarındaki yorulmalar yığma yapıların hasar almasına ve taşıma kapasitelerini büyük ölçüde kaybetmelerine sebep olmaktadır. Ayrıca mevcut yapılarımızın büyük kısmı mevcut deprem yönetmeliğinin gerektirdiği şartları sağlamamaktadır. Hızlı nüfus artışını karşılayabilmek için hızlı yapılaşma, ilgili yönetmelik ve şartnamelerden uzak yapı stoğu oluşmuş ve oluşmaktadır. Yönetmelik ve şartnamelerden

uzak yapılan yapıları göz önüne aldığımızda olası depremler karşısında kayıpları azaltmak için hızlı ve pratik bir şekilde binaları şartnamelere ve yönetmeliklere uygun hale getirmeye ihtiyaç duyulmaktadır [57]. Bunlara bağlı olarak hasarlı veya yönetmelik şartları dışında kalan yapıların hasar seviyeleri ve kapasiteleri belirlenerek onarım ve güçlendirme metotları belirlenmelidir. Yığma yapılarda çatlak biçiminde olan hasar düzeyleri bilinmelidir. Yığma yapı çatlaklarının genişliği ve duvar düzleminin dışında deformasyon durumu hasar düzeyini belirler ve hasarlar aşağıdaki gibi sınıflandırılır [53].

- Az hasar  $< 1.0$  mm çatlak
- Orta hasar  $1.0$  mm  $<$  çatlak  $< 25$  mm
- Ağır hasar  $> 25$  mm ve/veya düzlem dışı deformasyon



Şekil 1.1. (a) Tek yönlü sismik bir harekete maruz kalmış yığma yapıda oluşacak tipik deformasyon ve hasar şekli [55]; (b) Düzlem dışı yükleme nedeniyle yığma duvar çökmesi ve düzlem yönünde çapraz çatlak [56].

Yapıların hangi hasar düzeylerinde onarılabileceği veya güçlendirme gerekeceği mühendisin tecrübesi, yapının önemi, konumu gibi özelliklere bağlıdır. Tarihi veya önemli yığma yapılara yapılacak herhangi bir müdahale yapının özgünlüğünü koruması ön plana alındığı için onarım ve güçlendirme seçenekleri sınırlandırılmaktadır. Onarım ve güçlendirme birbirinden farklı terimlerdir. Onarım yapıyı veya yapı elemanını hasar öncesi kapasitesine yeniden getirme işidir. Güçlendirme ise yapıyı veya yapı elemanını kapasitesini orijinal değerinden arttırmaktır. Güçlendirmenin amacı deprem esnasında yapının dinamik davranışını istenen düzeye getirmektir. Tarihten günümüze değişik onarım ve güçlendirme teknikleri vardır. Son zamanlarda tarihi yapıların mimari yapısını bozmadan ve daha etkili olacak malzemeler üzerinde araştırmacılar çalışmalarını genişletmektedir. Yığma yapılar düzlem içi ve düzlem dışı yüklemelere karşı zayıf kalmaktadırlar. Dünyadaki yığma

yapılarda tespit edilen yapı hasarları, mevcut yönetmelikteki şartları ve gerekli kaliteyi sağlayamamasından dolayı yapıların depreme karşı güçlendirilmesi ve onarımı gerekmektedir. Son yirmi yılda, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da, büyük yatırımlar güçlendirme projelerine yönlendirildi. Geleneksel güçlendirme teknikleri genellikle zaman alıcı, maliyetli ve yapıya önemli ağırlık katmaktadır [58]. Son zamanlarda lif takviyeli polimerler yapıların onarım ve güçlendirilmesinde daha sık kullanılmaya başlanan malzemedir. Lif takviyeli polimerler ilk önce II. Dünya savaşından sonra gelişen petrokimya endüstrisi ile polimer reçinelere gömülü cam elyaflar olarak kullanıldı. Yüksek dayanım ve rijitliğe sahip liflerin bağlayıcı özellikteki reçineler ile birleşmesi ile bileşenlerinin özelliklerinden daha iyi bir kompozit malzeme ortaya çıkar. Uzay çalışmalarının başlaması ile daha yüksek mukavemete ve sertliğe sahip karbon, aramid gibi lifler kullanılmaya başlanmıştır. İlk başlarda oldukça pahalı bir malzeme olan lif takviyeli polimerler zamanla altyapının ve yapıların yenilenme ve onarımına olan ihtiyaca bağlı olarak hükümetlerin teşviki ile daha ulaşılabilir ve ekonomik hale geldi [59]. Lif takviyeli polimerlerin avantajları dayanımları, hafifliği, istenilen ölçüde ayarlanabilmesi ve en önemlisi korozyona karşı dayanıklı olmasıdır. Yapı elemanlarına ankrajlarla ve epoksi yapıştırıcılarla yüzeylerinden uygulanması ile hızlı ve az işçilik gerektiren bir uygulamadır. Lif takviyeli polimerlerin uygulama alanları oldukça geniştir. Binalar, su yapılarında, ulaşırmada, havacılık sektöründe, tıpta ve otomotiv sektörü gibi geniş bir uygulama alanı vardır. İnşaatta ise giriş, kolon, silo, perde, tünel vb. betonarme veya yığma yapı ve yapı elemanlarının hepsinde eğilme, kesme ve taşıma kapasitelerini arttırmak için kullanılmaktadır. Aşağıdaki nedenlerden dolayı kullanılmaktadır:

- Sismik güçlendirme
- Kullanım değişikliği
- Yeni yönetmeliklere uygunluk
- Tasarım ve işçilik hataları
- İlave servis yükleri
- Korozyon

Depreme dayanıklı yapı, yeterli elastik dayanımı, süneklik özelliği ile deprem enerjisini sönmlemelidir ve yapı ötelenmeleri sınırlı olmalıdır [53]. Yapılarda istenen özelliklerin en önemlisi deprem esnasında sünek davranış göstererek biraz çatlasa bile kopmadan kırılmadan enerjiyi tüketmesidir. Betonarme veya çelik yapılarda bu süneklik

özelliğini inşaat çeliği tarafından sağlanmaktadır. Fakat yığma yapılarda bu özelliği katabilecek bir malzeme yoktur.

## 1.2. Yığma Yapı Malzemeleri

Yığma yapım tekniği, yapının inşa edileceği yere ve üretim koşullarına göre farklı malzemeler ve teknikler kullanılarak oluşturulan çeşitli yapıların inşasında yaygın olarak kullanılan bir yapım tekniğidir. Bu teknik tarih boyunca kullanılmış ve hala günümüzde de kullanılmaktadır. Örnek olarak, köprüler, tonozlar, ibadethaneler ve evler gibi yapılar yığma yapım tekniği kullanılarak inşa edilmektedir.

Yapı malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, inşa edilen yapıların yapısal davranışlarını belirler. Özellikle basınç, çekme ve kayma dayanımları, dayanıklılık ve su emme kapasitesi gibi özelliklere sahip olan malzemelerle inşa edilen yapılar, uzun yıllar ayakta kalabilir. Yığma yapıların yük taşıma kapasiteleri ise duvarları oluşturan birim eleman ve bağlayıcının özelliklerine bağlı olarak değişir. Yığma yapı duvarlarında kullanılan malzemeler doğal taşlar, kerpiç, tuğla, bims beton, gaz beton, harçlar, donatılar, dolgu betonları vb.

### 1.2.1. Doğal Taşlar

Doğal taşlar, yığma yapıların en eski duvar malzemelerinden biridir. Kolay ulaşılabilir, dayanım ve işlenebilir oluşu, doğal taşların tercih edilmesinde önemli rol oynar. Yüksek basınç dayanımına sahip olan doğal taşlar çekme gerilmeleri açısından oldukça zayıf malzemelerdir. Duvar yapımında kullanılacak doğal taşların en düşük basınç dayanımları cinslerine göre TS 2510'da verilmiştir ve TS 699'a göre belirlenmiştir [60].

Yığma yapılarda kullanılacak yapı taşları, yeterli basınç dayanımına sahip olmalıdır. Bu, harçların taşlar arasındaki yapışmasını ve işlenebilirliğini etkilemektedir. Ayrıca, taşların boyutları da duvar kalınlığı ile orantılı olmalıdır çünkü harçlar taşları birbirine yeterince bağlayamazsa, yapının yapısal dayanıklılığı azalabilir. Taşların basınç dayanımları değişkendir ve bu, taşın cinsine, oluşum koşullarına ve mineral yapısına göre değişmektedir. Basınç dayanımları, genellikle 20 MPa ile 50 MPa arasında değişmektedir [53]. Ancak, dayanım arttıkça yoğunluk ve sertlik de artmaktadır. Bu nedenle, işlenmesi ve kesilmesi zor

olan yüksek dayanım ve yoğunlukta taş türleri daha az uygundur. Bunun yerine, orta dayanım ve yoğunlukta taş türleri, daha iyi bir seçim olabilir.

Türkiye bina deprem yönetmeliğinde [61] belirtilen sınırlamalar, yığma binaların doğal taşlarla dikilmesi sırasında ortaya çıkabilecek yapısal problemlerin önüne geçmek amacıyla getirilmiştir. Yığma binaların zemin ve bodrum kat duvarları, yapının tüm ağırlığını taşıyan ve yapının statik dengesi için önemli olan bölümlerdir. Bu nedenle, bu duvarların kalınlığı yeterli olmalı ve doğal taşların kullanımı, bu duvarların güçlü ve sağlam olmasını sağlamalıdır. Doğal taşların yapının diğer kısımlarında kullanımı ise, yapının statik dengesi ve güvenliğini tehlikeye atabileceğinden yönetmelik tarafından sınırlandırılmıştır.

### 1.2.2. Tuğla

Yığma yapı duvarlarında kullanılan tuğla çeşitleri, harman tuğlası ve fabrika tuğlasıdır. Harman tuğlası, kil, killi toprak ve balçık gibi malzemelerin bir arada harmanlanarak, ihtiyaç durumunda su, kum, öğütülmüş tuğla veya kiremit tozu ile karıştırılarak üretilen bir yapı malzemesidir. Harman tuğlaları, hazırlanan bulamaç kalıplara dökülerek kurutulur ve sonra ocaklarda pişirilerek elde edilir. Bu tuğlaların boyutları TS EN 771-1 [62] gereğince 1900x900x500 mm olmalıdır. Basınç dayanımlarına göre orta dayanımlı ve az dayanımlı, biçimlerine göre ise dolu ve delikli olarak sınıflandırılır. Basınç dayanımlarına ve biçimlerine göre harman tuğlalarının sınıflandırılması ise ilgili yönetmelikte verilmiştir.

Fabrika tuğlaları, harman tuğlalarının yerini almıştır çünkü taşınmaları ve yerleştirilmeleri kolaydır. Fabrika tuğlaları, harman tuğlalarının üretiminde kullanılan malzemelerle üretilir ancak makineyle şekillendirilir ve kurutulduktan sonra fırınlarda pişirilir. Fabrika tuğlaları, ilgili yönetmelik olan TS 705 [63]'te delik oranlarına göre sınıflandırılır. Taşıyıcı duvar üretiminde dolu tuğla ve düşey delikli tuğlalar kullanılmaktadır. Düşey delikli tuğlaların yığma duvar için kullanılan çeşitleri seyrek delikli (delik oranı %25'ten düşük) ve delik oranı %35'ten düşük tuğlalardır. İlgili yönetmelik [61] gereği delik oranı %35'ten yüksek delikli tuğlalar ve yatay delikli tuğlalar taşıyıcı duvar üretiminde kullanılmasına izin verilmemektedir. Tuğlaların basınç dayanımları, tuğlanın üretim biçimine, deliklerin miktarına, yerine ve yönüne, porozitesine, pişirilme ısısına, üretildiği toprağın cinsine, kenarların biçimine ve yükleme yönüne bağlıdır ve yükleri karşılamada en önemli parametredir.

Tuğlaların çekme dayanımı genellikle tuğlanın basınç dayanımının %8'idir ve kesme dayanımı ise tuğlanın basınç dayanımının %30'udur. Elastiklik, tuğlaların taşlara göre daha kolay bir şekilde stres yoğunluklarını emme özelliğine sahiptir [64]. Tuğlaların yaklaşık mekanik özellikleri, elastisite modülü, basınç, gerilme ve kesme dayanımı gibi parametreler Tablo 1.1'de verilmiştir. İlgili yönetmelikte [61], kat sayısı ve duvar kalınlığı yığma yapılar için belli sınırlar arasında belirtilmiştir.

Tablo 1.1. Tuğla genel malzeme özellikleri [65].

| Elastisite modülü (kPa) | Basınç dayanımı (kPa) | Çekme dayanımı (kPa) | Kesme dayanımı (kPa) |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 150000-300000           | 10000-30000           | 2700-5000            | 10000-20000          |

### 1.2.3. Gaz Beton ve Bims Beton

Beton bloklar ve bims, dolu ve boşluklu olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Gaz beton ve bims beton için yığma eleman olarak kullanmaları için dolu olması gerekmektedir. TS EN 771-3[66]'ya göre basınç dayanımları dört sınıfa ayrılmıştır (Tablo 1.2).

Tablo 1.2. Hafif beton blok ve bims basınç dayanımları [66].

| Tür  | Basınç dayanımı (MPa) |               |
|------|-----------------------|---------------|
|      | Ortalama değer        | Minimum değer |
| BB2  | 2.5                   | 2             |
| BB4  | 5                     | 4             |
| BB6  | 7.5                   | 6             |
| BB12 | 15                    | 12            |

Bims betonlar çimento, agrega, su ve gerektiğinde farklı katkı maddeleri ile üretilir. Üretimlerinde kum, çakıl, cüruf, bims ve pomza taşı kullanılabilir. Genellikle dolgu duvar ve döşemelerde kullanılmaktadır. Bims bloklar pomza agregasından üretilmekte olup duvar yapımında kullanılmaktadır. Pomza süngerimsi, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı ve bol gözenekli yapıya sahip olmasından dolayı ısı ve ses yalıtımı için tercih edilmektedir. Bims beton ile ilgili standart 771-3[66]'ya göre basınç dayanımları 25-100 kg/cm<sup>2</sup> olmalıdır.

Beton bloklar sınıfına girebilecek bir başka yığma duvar elemanı da gaz beton ya da boşluklu hafif betondur. Yapı ağırlığını azaltmak için tercih edilen gaz betonlar ince öğütülmüş silisli bir agreganın ve inorganik bir bağlayıcı ile hazırlanan karışıma gözenek oluşturuca bir madde eklenir ve gözenekler oluşturularak hafifletilir. İlgili standardına göre birim hacim ağırlığı 0.40-0.80 ton/m<sup>3</sup> aralığında olmalıdır. Basınç dayanımları ise 15, 25, 35, 50 ve 75 kg/cm<sup>2</sup> sınıflarında olmalıdır.

Taşıyıcı duvar üretiminde kullanılacak gaz beton ve bims beton birim elemanlarının en düşük basınç dayanımları 5 MPa'dan az olmamalıdır [61]. DBYBHY [61] yönetmeliğinde boşluklu beton bloklar taşıyıcı birim eleman olarak kullanılmaz denilmektedir. Fakat bazı ülkelerde donatılı ve donatısız yığma yapılar bulunmaktadır. Donatılı yığma yapılarda boşluklu beton bloklar kullanılmaktadır.

#### 1.2.4. Harçlar

Çamur, insanoğlunun kullandığı en eski harçtır, ancak ağır bir duvar için yeterli mukavemete sahip değildir. Çimento, kireç ve kumdan oluşan harç, Roma döneminden beri tonoz, kubbe, kemer gibi yığma yapılarda kullanılmaktadır. Harç, mukavemet ve bağlayıcı özelliklere sahiptir ve doğrusal olmayan, zamana bağlı, gerilim-gerinim özellikleri sergiler çünkü bu malzeme, diğer malzemelere göre zaman etkilerinden daha fazla etkilenir [67]. Harcın elastik özellikleri deneysel yöntemlerle tanımlanır, ancak poisson oranının uygun bir tahminini bulmak zordur. Duvar malzemelerinin elastisite modülü, gerilme-uzama eğrisinin incelenmesiyle belirlenebilen harcın elastisite modülüne bağlıdır. Genel olarak harç, tuğla veya taş birimlere göre daha yumuşak bir davranış gösterir. Tek eksenli sıkıştırma yüklemesi altında, harç yanal olarak taş veya tuğla birimlerden daha fazla genişlemeye çalışır. Harç ve tuğla kimyasal ve mekanik olarak birbirine bağlandığından, harç yanal olarak tuğla tarafından sınırlandırılır. Birimler ve harç arasında kohezyon ve sürtünme sayesinde birbirlerine bağlı olan süreklilik nedeniyle, harç birimler tarafından yatay olarak sınırlandırılır. Tuğla-harç arayüzündeki kesme gerilmeleri, harçta üç eksenli sıkıştırma ve tuğlada eksenel sıkıştırma ile birleştirilmiş iki taraflı gerilmeden oluşan dahili bir gerilme durumuna neden olur [68].

Kireç harcı ve kum-kireç harcı içine volkanik tüflerin eklenmesi ile suyla reaksiyona giren ve sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. Kum-kireç harcında sertleşme yavaş olduğundan duvarın örülmesiyle orantılı olacağından sertleşme-dayanım artışı ve düşey

yönde şekil değişimi hep uyum içindedir. Çimento kullanılmasıyla birlikte daha yüksek dayanımlı harçlar üretilmektedir. Çimentonun çabuk sertleşmesi kireç ile yavaşlatılmakta iken kireç harcına çimento eklenmesi ile duvarın tam dayanımına ulaşması hızlanmıştır. Harçların duvar bloklarını birbirine bağlamanın yanında blokların birbirine temas eden yüzeylerin kısıtlı şekilde yük aktarımını engelleyerek gerilme birikimini önlemektedir. Yani yapı birimlerinin üzerine gelen yükü dağıtmada yardımcı olmaktadır.

Karışım oranları ve basınç dayanımlarına göre harçlar TS 2510 [60]'da sınıflandırılmıştır. Harç basınç dayanımları TS 998-2 [70]'de verilmiştir. Tablo 1.3'te bu sınıflandırma toplu olarak verilmiştir.

Tablo 1.3. Harç sınıfları ve basınç dayanımları [60,70].

| Harç Sınıfı |   | Çimento | Kum | Harç çimentosu | Kireç hamuru | Toz kireç | Minimum basınç dayanımı (MPa) |
|-------------|---|---------|-----|----------------|--------------|-----------|-------------------------------|
| A           | - | 1       | 3   | -              | -            | -         | 15                            |
|             | 1 | 1       | 4   | -              | -            | -         |                               |
| B           | 2 | 1       | 4   | 1/2            | -            | -         | 11                            |
|             | 3 | 1       | 4   | -              | -            | 1/2       |                               |
|             | 4 | 1       | 4   | -              | -            | 1         |                               |
| C           | 1 | 1       | 7-9 | 2              | -            | -         |                               |
|             | 2 | 1       | 5   | -              | -            | -         | 5                             |
|             | 3 | 1       | 5   | -              | 1            | -         |                               |
| D           | 1 | 1       | 6-8 | -              | 2            | -         |                               |
|             | 2 | 1       | 6-8 | -              | -            | 3         | 2                             |
|             | 3 | -       | 2-3 | 1              | -            | -         |                               |
| E           | - | -       | 3   | -              | 1            | -         | 0.5                           |

### 1.3. Yığma Yapı Türleri

Yığma yapıların sınıflandırılması konusunda literatür incelendiğinde, yığma yapı sistemlerinin sınıflandırılmasında donatı kullanımının esas alındığı görülür. Bu doğrultuda dört ana yığma yapı türü mevcuttur:

- Donatısız yığma yapı
- Donatılı yığma yapı
- Sarılmış yığma yapı
- Öngermeli ve ard germeli yığma yapılar.

### 1.3.1. Donatısız yığma yapılar

Genellikle deprem riski düşük olan bölgelerde inşa edilen donatısız yığma yapılar, tuğla, kerpiç, beton bloklar ve birbirleri arasında aderans ve yük aktarımını sağlayan harçtan meydana gelmektedir. Donatısız yığma yapılarda kolon, kiriş veya donatı bulunmaz. Duvar dayanımı, yığma birimlerinin mekanik özelliklerine ve kullanılan harcın özelliklerine bağlıdır. Kendi ağırlıkları sayesinde büyük yükleri taşıyabilirler. Bu tip yapılar, dinamik etkilere karşı çok gevrek davranış gösterirler çünkü donatı gibi sünekliği artıran hiçbir malzeme bulunmaz. Donatısız yığma yapılarda, duvar üzerinde oluşabilecek kayma gerilmelerinden daha fazla kayma dayanımına sahip olan harç kullanılmalıdır. Aksi takdirde, yığma birimlerinde çatlaklar oluşur. Bu tip yapılarda dayanımı etkileyen diğer bir faktör de yığma birimlerinin nasıl örüldüğüdür. Yığma birimler örülürken, düşey derzler hiçbir zaman üst üste gelerek değil, şaşırtmalı olarak dizilmelidir.

Taşıyıcı duvarların kalınlığı, taşınması gereken çatıdan gelen yükün miktarına bağlıdır. Örneğin, sadece zemin katı olan bir taşıyıcı duvarın dış duvarları 230 mm olabilirken, üzerindeki bir veya birden fazla kat ile doluluk durumuna göre kalınlığı arttırılabilir.



Şekil 1.2. Donatısız yığma yapılar [71].

### 1.3.2. Donatılı Yığma Yapılar

Donatılı yığma yapı, çelik donatılar veya tellerin harçta gömülü veya deliklerde yerleştirilerek beton veya harç ile doldurulmuş şekilde güçlendirilen bir yapı sistemidir. Donatı, duvarın çekme, basınç dayanımını ve sünekliğini artırır. Yığma yapının çelik donatı ile güçlendirilmesiyle, sismik yüklere karşı direnç ve enerji dağıtma kapasitesi önemli ölçüde iyileştirilebilir. Bunu başarmak için, donatılı yığma sistemdeki tüm malzemelerin yerçekimi ve sismik yüklere direnirken monolitik olarak hareket etmesi için donatı yığma ile entegre edilmelidir.

Donatılı yığma yapı sisteminde donatının kullanılabileceği çeşitli yollar vardır. Temel olarak, donatılı yığma sistem şu şekilde sınıflandırılabilir:

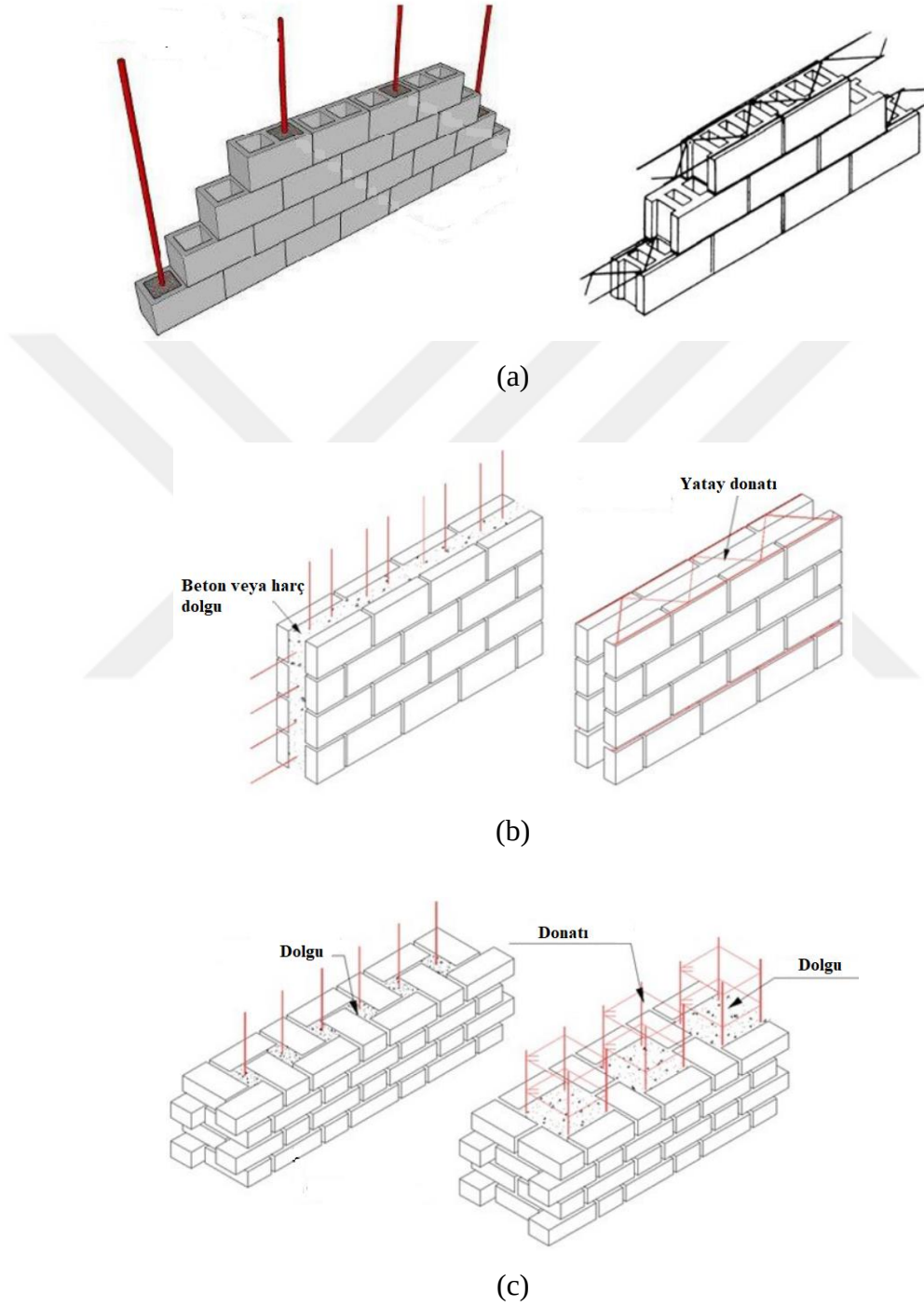
- Donatılı Boşluklu Birim Yığma Duvar
- Donatılı Harçlı Boşluklu Yığma Duvar
- Donatılı Cep Tipi Duvarlar

Donatılı boşluklu birim yığma duvar, donatılı yığma inşaatın temel biçimini temsil eder. Düşey donatıların yerleştirildiği ve boşluğun beton veya harçla doldurulduğu düşey delikli özel şekilli birimler, yatay, yatak derz donatısını barındırmak için yivli veya yivsiz, inşaat için kullanılır. Yığma birimler döşenmeden önce düşey donatılar konumlandırılır. Daha sonra birimlerin ilk sırası harçlara atılır ve oluklara veya harç derzlerine yatay çubuklar veya yatak derz donatıları yerleştirilir. Duvar inşaatı ilerledikçe düşey çubukları içeren delikler beton veya harçla, yatay donatıları içeren oluklar ise harçla doldurulur. Dayanımı artırmak için ve birimlerin şekline bağlı olarak, içi boş bloklardaki tüm delikler genellikle harçla doldurulur veya beton dolgu ile doldurulur (Şekil 1.3. (a)).

Donatılı harçlı boşluklu yığma duvar sistemi, dikey ve yatay donatıların yerleştirildiği ve beton dolgu veya harç ile doldurulduğu bir boşlukla ayrılmış, duvar birimlerinin iki yaprağından oluşur. Boşluklu bir duvarın iki tarafı, depremin neden olduğu yanal yükleri taşıyacak şekilde tasarlanması gereken duvar bağları veya bağlantı elemanları ile birbirine bağlanır. Yığma birimler, yatay veya gergili örgü şeklinde döşenmelidir. Deprem bölgelerinde düşey yığma örgüye izin verilmez. Harç, iş ilerledikçe veya tüm kattaki duvar birimleri döşendikten sonra dökülebilir (Şekil 1.3. (b)).

Bazen duvarda oluşturulan ceplere özel yapıştırma düzeni ile düşey donatı yerleştirilir. Donatılmış içi boş birim yığma birimlerde olduğu gibi, yığma birimlerin döşenmesinden önce düşey donatı çubukları yerleştirilir. Harç derzlerine, kullanılan ünitelere göre düşey

aralıkları 600 mm'yi geçmeyecek şekilde yatay yatak derz donatısı yerleştirilir. Dikey çubuklar içeren cepler, duvarın inşası ilerledikçe beton veya harçla doldurulur (Şekil 1.3. (c)).



Şekil 1.3. (a) Donatılı boşluklu birim yığma duvar, (b) Donatılı harçlı boşluklu yığma duvar, (c) Donatılı cep tipi duvar [74].

### 1.3.3. Sarılmış Yığma Yapılar

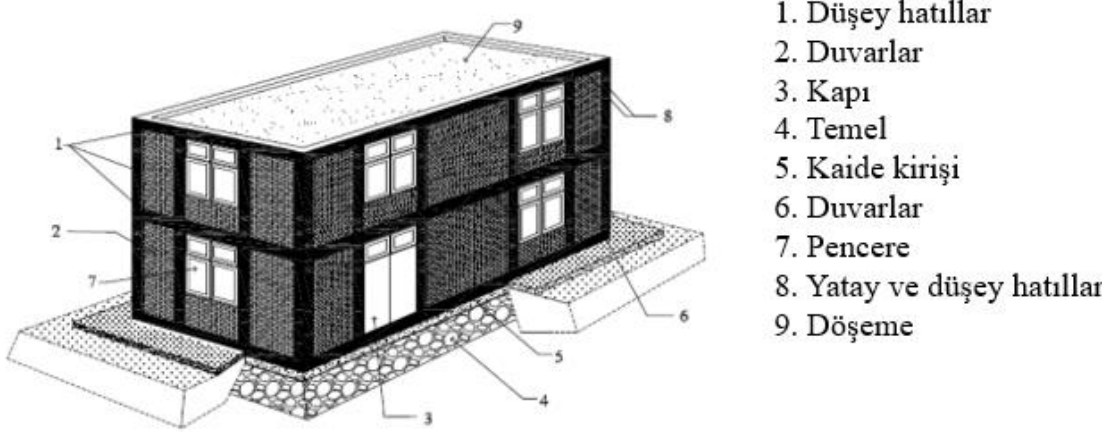
Sarılmış yığma duvarlar, düşey ve yatay yüklere dayanabilecek, bağ kolonları ve bağ kirişleri adı verilen donatılı düşey ve yatay hatıllarla çevrelenmiş duvarlardan oluşur. Bu tür sistemde, önce düz yığma duvar inşa edilir ve ardından duvarın düzlem dışı eğilmesine direnmek, duvarlar arasındaki bağlantıyı iyileştirmek, duvarların düşey ve yatay yük taşıma kapasitesini, sünekliğini ve stabilitesini arttırmak için dört tarafı da kirişler ve kolonlarla çevrelenir. Bu sistem deprem anında çatlakların oluşmasını engeller veya oluşan çatlakların büyümesini ve yapının dağılma riskini azaltır. Sarılmış yığma binanın bir örneği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Sarılmış yığma duvar örneği [72].

Sarılmış yığma duvar tekniği Şili, Peru, Arjantin, Slovenya, Meksika ve İran gibi yüksek veya orta sismik riske sahip ülkelerde kullanılmaktadır. Tipik bir iki katlı sınırlı yığma binanın yapısal bileşenleri Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Sarılmış yığma yapıların kullanımı DBYBHY [61]'ne göre deprem bölgelerinde inşa edilecek yığma yapılar için bir zorunluluk olarak belirtilebilir. Bu tür yönetmelikler, deprem güvenliğine ilişkin önlemleri almayı amaçlayarak yapılacak binaların güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için kat

sayıları, duvar kalınlıkları, temellerinin tasarımı, yapı malzemesi seçimi, duvar serbest boyları ve hatıl boyutları ile ilgili öneri ve sınırlamalar getirmiştir.

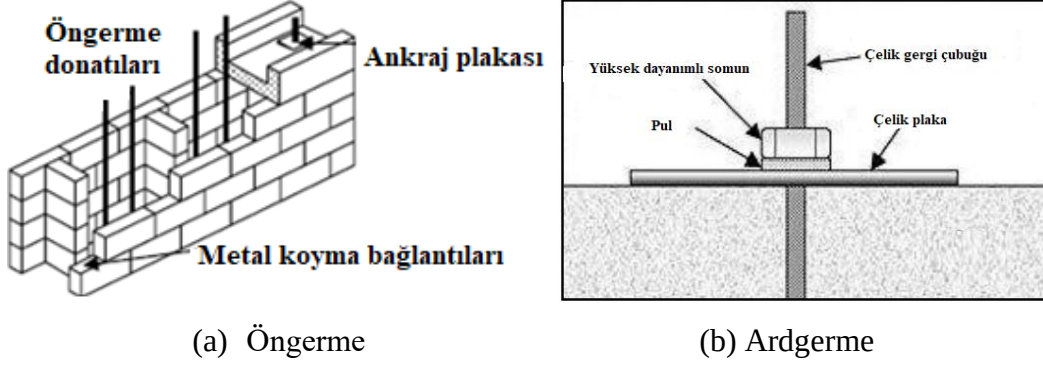


Şekil 1.5. Tipik bir iki katlı sarılmış yığma binanın bileşenleri [71,73].

#### 1.3.4. Öngermeli ve Ardgermeli Yığma Yapılar

Ardgermeli yığma duvarlar, yığma yapıları deprem kuvvetleri veya rüzgâr kuvvetleri gibi duvarda gerilme oluşturabilecek kuvvetlere karşı güçlendirmek için yapılır. Bu duvarlar temel seviyesinden inşa edilir ve temele ardgerme çubukları ankrajlanır. Bu çubuklar, kirişler arasında veya beton kagir birimlerin çekirdeğinde dikey olarak çalıştırılır. Yığma duvar yapımı tamamlanıp kürünü aldıktan sonra bu çubuklar gerilerek duvarın tepesindeki çelik yere ankrajlanır (Şekil 1.6).

Öngerme telleri, yığma yapılarda taşıyıcı duvarların eğilme, kesme ve çatlama dayanımlarını artırmak amacıyla kullanılan bir yapı elemanıdır. Bu teller, duvarlar arasına yerleştirilerek duvarların bütünlüğünü ve gücünü artırır. Öngerme telleri, genellikle çift sıra halinde örülür ve çimento harcı ile duvara aktırılır. Öngerme tellerinin kullanımı, yığma yapılarda taşıyıcı duvarların daha güçlü ve dayanıklı hale getirilmesine yardımcı olur. Bu sayede yapılar, daha büyük yükleri taşıyabilir ve depremler gibi doğal afetler sırasında daha az hasar görme eğilimindedir.



(c) Ön germeli yığma yapım uygulamaları

Şekil 1.6. Öngermeli ve ardgermeli yığma yapım örnekleri [74].

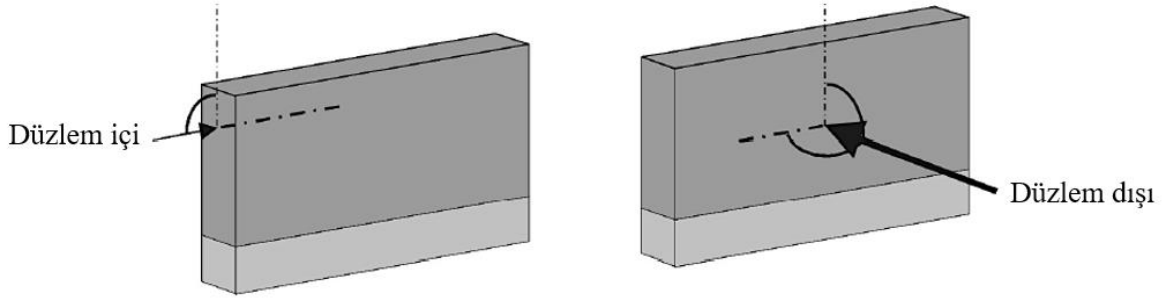
#### 1.4. Yığma Yapılarda Hasar ve Göçme Mekanizmaları

Yığma binalar, farklı yapı tiplerine ve diğer yapı tiplerine göre yanal yüke dayanıklı elemanların daha fazla görece sertliğine sahip olduklarından, çeşitli sismik kırılma durumları gösterirler.

Yığma binaların sismik etkilere karşı yüksek hassasiyeti, çoğunlukla, nispeten esnek diyaframlarla birbirine ortogonal olarak bağlanan yapının çeşitli bölümleri arasındaki yetersiz bağlantılarla birlikte yapısal elemanlardan kaynaklanmaktadır. Genel olarak, yığma yapılar söz konusu olduğunda, elemanların, kısmen çökmeye neden olabilecek veya tüm yapıyı harekete geçirebilecek düşey yüklerin yanı sıra sismik, yatay etkiye de direnmesi beklenir. Dayanımın limit gerilme durumu kırılma dinamik eylemi için de önemlidir. Ancak bu olası çökmeler veya hasarlar genellikle bazı yapısal parçaların denge kaybından kaynaklanmaktadır.

Sismik bir hareket sırasında, yığma yapılarda meydana gelebilecek yapısal hasarlar, hasar mekanizmaları adı verilen olası nedenlere göre sınıflandırılabilir. Hasar mekanizmaları, düzlem dışı ve düzlem içi hasarlar olarak iki ana grupta toplanır (Şekil 1.7). Duvardaki ana elemanların yetersiz bağlantısı, belirtilen ana tipik hasarların birine yol açar. Bu felaketlerin yaygın şeklinden birisi, kat diyaframının düzlem dışı duvarlarla yetersiz ankrajından kaynaklanır (ankraj sağlanmamıştır veya ankraj başarısız olmuştur). Önceki araştırmalara bağlı olarak, bir sismik olay yoluyla düzlem dışı duvarların özdirencinin esas olarak gerçek narinlik oranıyla ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır [75, 76]. Yeterli bağlantı olmadan, düzlem dışı duvarlar/payandalar, zeminde duran ve döşemeye kadar uzanan konsol gibi verimli bir şekilde çalışır. Fakat bu düzlem dışı duvaralar oldukça küçük yer hareketlerinde kararsız hale gelebilir. Sonuç olarak, düzlem dışı duvarların kısmen veya tamamen çökmesi meydana gelir. Bu duvarlar/payandalar diyafram sistemlerini taşıyorsa, düzlem dışı duvarların hasarları diyaframların çökmesine neden olabilir. Bağlantı hasarının diğer tipik biçimleri, düzlem içi duvarların kat diyafram sistemiyle bağlantısının kesilmesini içerir. Duvarların düzlem içi göçmesi, düzlem içi yığma duvarların elemanları üzerinde bulunan aşırı kesme ve/veya eğilme gerilmeleri nedeniyle meydana gelir. Bu boşluklu duvarlar temel olarak bitişik açıklıklar arası duvar ve açıklıkların altında ve üstünde bulunan derin duvar kirişinden oluşur. Genel olarak, düzlem içi duvarların göçmesi bu elemanlardan birinde veya her ikisinde birden meydana gelir. Sonuç olarak meydana gelen göçme çoğunlukla yapının performansını değiştirir ve diğer yapısal elemanların göçmesini önler.

Düzlem dışı duvarlardan rijit kat diyafram sistemine yanal yükleri iletmek için yeterli bağlantı yapılırsa, düzlem dışı duvar arızaları istisnai bir durumdur [77]. Yeterli bağlantı, bu duvarların katlar arasında uzanmasına izin verir, böylece narinlik oranını azaltır ve yanal stabiliteyi artırır. Yeterli bağlantıya sahip olmasına rağmen, köşeler uygun şekilde birleştirilmezse duvarlar düzlem dışı olarak çökebilir. Düzlem dışı duvarların genel hasarları veya göçmeleri herhangi bir yanal destek olmaksızın çatının üzerinde duran parapet duvarlarının veya ızgaraların hasarını içerir.



Şekil 1.7. Düzlem içi ve düzlem dışı yönler

Duvarlar çoğunlukla düzlem içi yönlerinde yanal yüklere dayanacak şekilde tasarlanır, burada duvar rijitliği düzlem dışı yöne göre daha fazladır. Donatısız yığma yapılarda perde duvarlar, yatay deprem kuvvetlerine karşı yanal dayanımı sağlamaktan sorumlu ana elemanlardır. Bu araştırma aynı zamanda düzlem içi gerilmeler için duvarın çatlak davranışını incelemeye odaklanmaktadır. Duvar düzlemi boyunca etki eden yanal kuvvetlere sahip yığma duvar için göçme modları aşağıdaki gibidir:

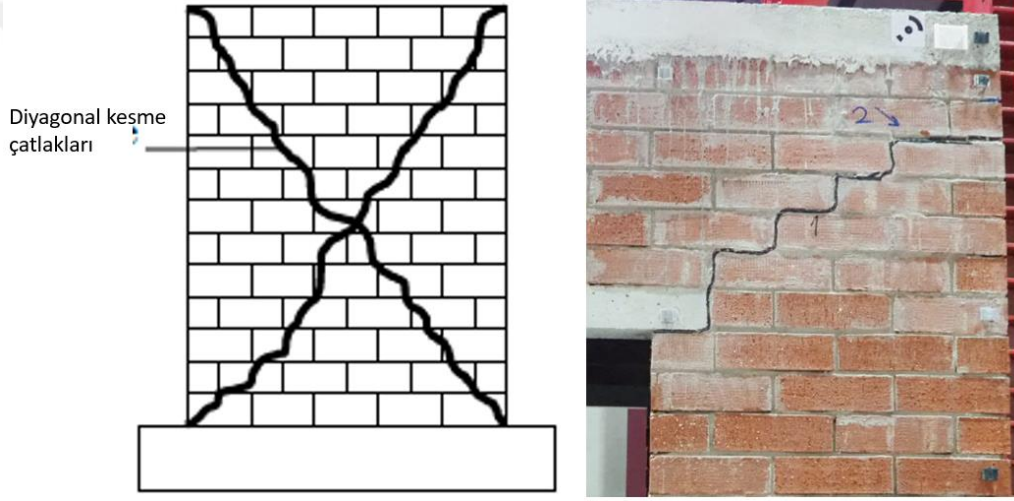
#### 1.4.1. Kesme Çatlakları

Kesme çatlakları, duvarın üstüne ve altına etki eden zıt yanal kuvvetlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu, en yaygın göçme şeklidir ve çatıdan temele yük aktarma yolunu takip eder, yani duvarda diyagonal bir çatlak oluşur (Şekil 1.8). Genellikle yatay ve düşey yüklerle yüklü duvarlarda ve daha büyük düşey yükler durumunda en boy oranı (1:1) ile (2:1) arasında olan duvarlarda görülür. Duvarların kesme dayanımı, tuğla birim dayanımı, harç dayanımı ve işçiliği, düşey yük ve kolon donatı miktarı gibi birçok faktöre bağlıdır.

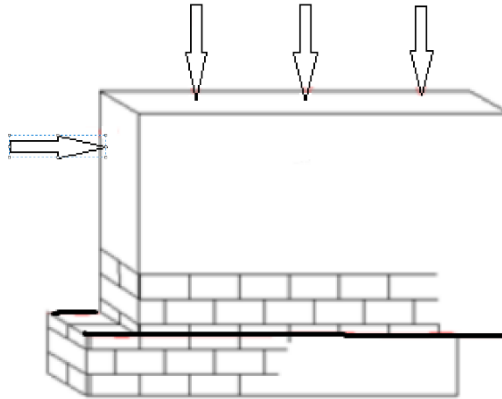
#### 1.4.2. Kayma Çatlakları

Kayma göçme modunda duvar çatlakları, Şekil 1.9’da gösterildiği gibi tuğla birimleri arasında yatay olarak görünür. Aynı doğrultu üzerinde birbirine zıt olarak uygulanan kuvvetler ile oluşan çatlaklar çapraz yük yolu boyunca açılmak yerine tuğla birimleri boyunca daha zayıf bir düzlem bulur ve yatay kesme kayması oluşturur. Ağırlıklı olarak yatay kuvvetlerle yüklenen duvarlar bu tür bir hasar sergileyebilir. Bağlayıcı özellikteki

harcın veya yapıştırıcının dayanımının duvar birim elemandan daha büyük olduğu durumlarda hasarlar duvar birim elemanlarda gözlenirken, bağlayıcı dayanımının daha düşük olduğu durumda bu hasar tipi derzlerde görülmektedir. Şekil 1.9'da gösterilen kayma çatlakları, genellikle düşük eksenel yük ile düşük en-boy oranına sahip bodur duvarlarda meydana gelir. Kayma çatlakları için iki olasılık vardır. Birincisi, kayma düzleminin başlangıçtaki kayma kesme direnci, bir eğilme akma mekanizması geliştirmek için gereken kuvvetten daha düşük olduğunda meydana gelir ve ikincisi, duvar bir veya daha fazla elastik olmayan eğilme döngüsünü sürdürdükten sonra sürtünme direncine ulaşıldığında meydana gelir [78].



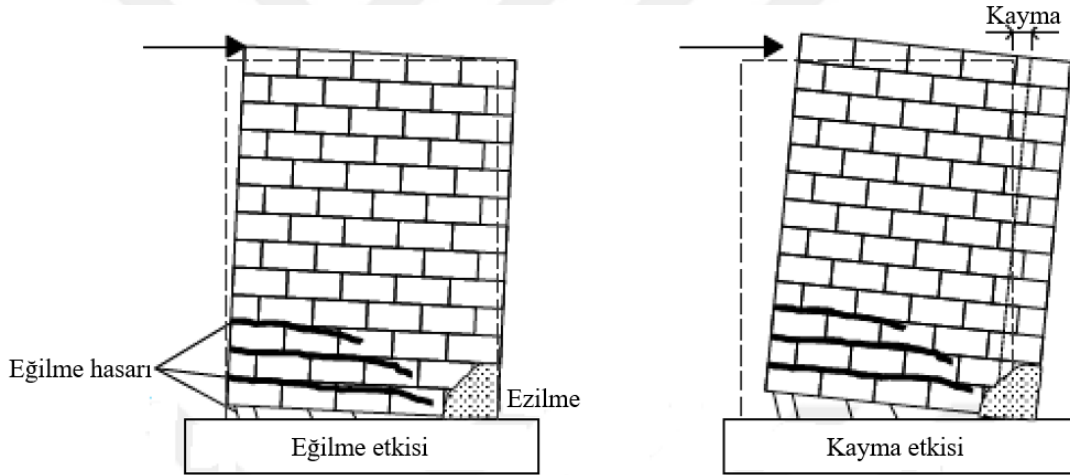
Şekil 1.8. Yığma duvarda diyagonal kesme çatlakları



Şekil 1.9. Yükleme altında duvarın kesme mekanizması [55].

### 1.4.3. Eğilme Çatlakları

Yığma duvarların mekanik performansı, çekme bölgelerinde oluşan yatay eğilme çatlakları ve basınç bölgesinde oluşan ezilmeler gibi hasarlarla sınırlıdır. Bu hasarlar, duvarlarda yatay eğilme momentlerinden dolayı meydana gelen yatay eğilme gerilmeleri ve dış yüklerin etkisiyle oluşan basınç gerilmeleri sonucu ortaya çıkar. Yığma yapılarda kullanılan malzeme olarak, çekme dayanımı düşük olan duvar birim elemanı ve kayma dayanımı düşük olan harcın kullanılması nedeniyle, yatay yüklerin neden olduğu en önemli hasarlardan biri de duvarlarda oluşan kayma gerilmelerinden kaynaklanan çekme gerilmelerinin oluşturduğu çatlak, ayrılma ve dağılmadır [79]. Bu hasarlar ve göçme şekilleri, Şekil 1.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Eğilme ve kayma durumundaki hasar şekilleri [79].

### 1.5. Hasar Tespiti ve Sınıflandırılması

Dinamik tanımlama testleri, modellerin dinamik özelliklerini, yani frekansları, mod şekillerini ve sönümleme oranlarını tahmin etmeyi amaçlar. Dinamik tanımlama, ilk sismik testten önce ve her sismik testten sonra, sismik hareket genliğinin bir fonksiyonu olarak özelliklerin değişimini değerlendirir. Frekansların azalması gibi dinamik özelliklerin değişimi, yapının rijitliği ve sonuç olarak, genellikle malzemelerin mekanik özelliklerinin bozulmasını tanımlamak için kullanılan hasar kavramı ile ilgilidir. Bu nedenle, bu tanımlamaların temel amacı, frekansların azalmasına dayalı bir hasar göstergesi tanımlamak ve modellerin (güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş) sismik performansını karşılaştırmaktır.

Mendes ve ark. [80] “Mevcut bir yığma yapının sarsma masası testi: sismik performansın değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi” başlıklı çalışmalarında, sarsma masası testinden kaynaklanan frekanslardaki değişime dayalı hasarı sınıflandırmak için formüller önermişlerdir. Dinamik özelliklerdeki değişim, yani frekanslardaki azalma, yapının rijitliği ve kütlesi ile ilişkilidir. Sonuç olarak, malzemelerin mekanik özelliklerinin bozulmasını karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan hasar teorisi ile ilgilidir. Hasar göstergesi frekans düşüşlerine göre tanımlanır. Hasar göstergesi (DI), modelin sismik performansını değerlendirmek için hasarlı ve hasarsız modelleri karşılaştırır. Üç formülasyon önerilmiştir;  $DI_2$ ,  $DI_{2/3}$  ve  $D_2$ . Modların şekillerinin deney boyunca sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu nedenle, yalnızca mod şekilleri test boyunca önemli ölçüde değişmiyorsa, hasarı hesaplamak için bu yaklaşım geçerlidir.

Rijitlik değişimi lineer bir fonksiyon olarak ele alındığında  $DI_2$  kullanılır. Modların şekillerinin test boyunca önemli ölçüde değişmediğini varsayarsak,  $DI_2$  hasar göstergesi şu şekilde tahmin edilebilir:

$$DI_{2,n}=1-(f_n/f_1)^2 \quad (1.1)$$

burada  $f_n$ , n'inci sarsma masası deneyinden sonra tahmin edilen doğal frekanslardır ve  $f_1$ , hasar öncesi ölçümlerden elde edilen doğal frekansları temsil eder. DI sıfırdan (ilk durum ve teorik olarak hasarın yokluğu) bire (yapının çökmesi veya tam hasar) kadar değişir. Bu formülasyon, hasarın eksenel çekme gibi paralel liflerin kırılmasıyla meydana geldiği basit modellerle ilişkilendirilebilir. Dinamik davranışa en yüksek katkıyı sağlayan modellerin birinci enine modu, esas olarak eğilme rijitliği ile ilgilidir. Eğilme rijitliği değişikliğinin hasarla kübik bir ilişkisi vardır ve burada aşırı lifleri kaybederek enine kesitin azalması olarak anlaşılır. Eğilme sertliğindeki değişimi hesaba katarak, aşağıdaki denkleme göre alternatif bir hasar göstergesi  $d_{2/3}$  önerilebilir:

$$DI_{2/3,n}=1-(f_n/f_1)^{2/3} \quad (1.2)$$

Modellerin dinamik davranışı, belirli bir arıza moduyla pek ilişkilendirilemeyen birkaç moda bağlı olduğundan, rijitlik ve hasar değişimi arasındaki bir ara ilişki benimsenmiştir. Bu nedenle, hasar ve sertlik değişimi arasında bir ara korelasyon uygulanır. Dinamik

tanımlama testlerinde basit olması amacıyla, hasar göstergesi  $DI_n$ 'nin  $n$ 'inci frekans ve 1'inci frekans oranına orantılı olarak doğrusal olduğu kabul edilir:

$$DI_n = 1 - (f_n/f_1) \quad (1.3)$$

Şekil 1.11'de gösterilen üç hasar göstergesi, frekans değişimiyle orantılı olduğu düşünülen sismik genliğin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Üç modelin her birinde, hasar göstergesi farklı bir şekilde gelişir. Örneğin, sismik genlik yapının çökmesine neden olan genliğin yarısı ise,  $DI_2$ ,  $DI$  ve  $DI_{2/3}$  formüllerine göre hasar derecesi sırasıyla 0.75, 0.50 ve 0.37'dir.

Bir depremin neden olduğu kayıpları tahmin edebilen bir model geliştirmek, gelecekteki depremlerin etkisini analiz etmeye ve böylece risk azaltma önlemlerini düzenlemeye izin verdiği için çok önemli görünmektedir. Avrupa Makrosismik Ölçeği (EMS-98) [81], Avrupa ülkeleri ve Avrupa dışındaki birkaç ülkede sismik yoğunluğu değerlendirmek için bir kriterdir. EMS-98 ölçeği, 1992'deki test sürümünün bir güncellemesi olarak 1998'de piyasaya sürüldü. EMS-98 sismik yoğunluk ölçeği, yalnızca sismologlar için tasarlanmak yerine mühendisler ve sismologlar arasındaki işbirliğini kolaylaştıran ilk ölçektir. Talimatlar, resimler ve uygulama örnekleri içeren kapsamlı bir el kitabı içerir. EMS-98 yoğunluğu, bir depremin sağladığı sismik enerjiyi temsil eden deprem büyüklük ölçeklerinin aksine, bir depremin belirli bir konumu ne kadar ciddi şekilde etkilediğini tanımlar. EMS-98 genel olarak 12 kategoriye ayrılır (Tablo 1.4). Ancak, yığma bina tipi için geniş ve basitleştirilmiş bir sınıflandırma yapılmıştır (Tablo 1.5). EMS-98'de yığma yapılara verilen hasar sınıflandırması için beş hasar durumu (DS) vardır. Bunlar: DS-1, yapısal hasar yok; DS-2, hafif yapısal hasar; DS-3, yapısal elemanlarda orta derecede hasar; DS-4, ağır yapısal hasar ve kısmi göçme; DS-5, yapısal elemanların tamamen veya kısmen göçmesi. EMS-98'e göre, bir yığma bina, duvarlarında kılcal çatlaklar mevcutsa, birkaç küçük sıva parçası ve binaların tepelerinden düşen gevşek birim elemanları varsa, DS-1 olarak sınıflandırılır. DS-2, birçok duvarında çatlakların olduğu, büyük sıva parçalarının döküldüğü ve bacalarının kısmen çöktüğü bir yapıda tanımlanır. DS-3 hasar durumu olarak tanımlanan yapı, çoğu duvarda geniş çatlaklar, çatı hattında baca hasarı ve yapısal olmayan tek tek elemanların çökmesini gösteriyor. DS-4, çok ağır çatlak modeline, çatlakların büyük ölçüde genişlemesine, kısmi çatı ve zemin çökmesine karşılık gelir. Son olarak, DS-5 binanın çökmesine karşılık gelir.

Tablo 1.4. Avrupa Makrosismik Ölçeğinin 12 bölümü [81].

| EMS yoğunluk | Tanımlama             | Tipik gözlenen etkilerin açıklaması                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | Hissedilmez           | Kimse tarafından hissedilmez                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2            | Çok az hissedilen     | Titreşim, evlerde, özellikle binaların üst katlarında sadece hareketsiz duran kişiler tarafından hissedilir.                                                                                                                                                                      |
| 3            | Zayıf                 | Titreşim zayıftır ve içeride birkaç kişi tarafından hissedilir. Hareketsiz haldeki insanlar sallanır veya hafif titrer.                                                                                                                                                           |
| 4            | Büyük ölçüde gözlenen | Birçok nesnenin hissedilir şekilde sallanması.                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5            | Güçlü                 | Deprem içeride çok kişi, dışarıda çok az kişi tarafından hissedilir.                                                                                                                                                                                                              |
| 6            | Hafif hasar           | Titreşim seviyesi muhtemelen korkutucu. Pencereler, kapılar ve tabaklar sallanır. Asılı nesneler sallanır.                                                                                                                                                                        |
| 7            | Hasar                 | Mobilyalar yer değiştirir ve nesneler raflardan düşer. Birçok iyi inşa edilmiş sıradan bina orta derecede hasar gördü: duvarlarda küçük çatlaklar, sıva dökülmesi, baca parçalarının düşmesi; eski binalar duvarlarda büyük çatlaklar ve dolgu duvarlarında arızalar gösterebilir |
| 8            | Ağır hasar            | Birçok evin duvarlarında büyük çatlaklar vardır. Birkaç iyi inşa edilmiş sıradan binanın duvarlarında ciddi hasar görülürken, zayıf eski yapılar çökebilir.                                                                                                                       |
| 9            | Tahrip edici          | Birçok zayıf inşaat çöküyor. İyi inşa edilmiş sıradan binalar bile çok ağır hasar gösterir: ciddi duvar göçmesi ve kısmi yapısal hasar.                                                                                                                                           |
| 10           | Çok tahrip edici      | Pek çok sıradan iyi inşa edilmiş bina çöküyor.                                                                                                                                                                                                                                    |
| 11           | Yıkıcı                | Pek çok sıradan iyi inşa edilmiş bina çöküyor, hatta depreme dayanıklı tasarımı iyi olan bazıları bile yıkılıyor.                                                                                                                                                                 |
| 12           | Tamamen yıkıcı        | Neredeyse tüm binalar yıkıldı.                                                                                                                                                                                                                                                    |



### 1.6. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yapılara uygulanacak onarım ve güçlendirme gibi herhangi bir müdahaleden önce yapının yapısal davranışları belirlenmelidir. Yığma yapıların yapısal davranışlarının incelenmesinde tahribatsız deneysel yöntemler yaygınlaşmaktadır. Yapıların dinamik davranışları dinamik karakteristiklerine (doğal frekans, sönüm oranı, mod şekli) bağlı olarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristikler deneysel ve analitik yöntemlerle bulunabilir. Analitik yöntemde dinamik karakteristikler belirlenirken yapının geometrisi, sınır şartları, bağlantı tipleri ve malzeme özelliklerine bağlı olarak oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinden modal analiz gerçekleştirilmektedir. Öyle ki yapıların yorulmaları, dayanım kaybı, oturmalar, çatlamlar ve diğer çevresel etkilerden etkilenen yapı malzemeleri özelliklerini koruyamamaktadır. Bundan dolayı belli parametrelere bağlı olarak elde edilen dinamik karakteristikler yapıların her zaman gerçek davranışını vermemektedir. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerinde uygulanmasından dolayı daha gerçekçi sonuçlar vereceği için analitik ve deneysel yöntemler birlikte ele alınmalıdır. Deneysel sonuçlar yapının o andaki davranışını göstermektedir. Deneysel yöneme göre numerik analiz güncellenir.

Deneysel dinamik karakteristikler ise deneysel modal analiz (DMA) ile belirlenebilmektedir. Bu metotta yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilen sinyallerin veri toplama ünitesi yardımıyla toplanıp yazılımlar aracılığı ile işlenerek yapının dinamik karakteristikleri belirlenir. Deneysel modal analiz ikiye ayrılır:

- Çevresel titreşim yöntemi (ÇTY): Yapıya hiçbir etki verilmeden rüzgâr, araç yükleri, deprem gibi çevresel etkiye karşı göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir.
- Zorlanmış titreşim yöntemi (ZTY): Yapı ölçülebilen bir etki ile titreştirilmekte ve yapının bu etkiye karşı göstermiş olduğu tepki ölçülmekte.

Sonuçta deneysel ve analitik modal analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılmalıdır. Arada oluşacak farklılıklar analitik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerde dikkate alınan malzeme özellikleri, sınır şartları, geometrisi, bağlantı tipleri gibi belirsiz parametrelerden meydana gelmektedir. Analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristikler arası farklılık %5 civarında olması istenmektedir. Bu değerde olan değerlerin anlamı analitik analiz sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler yapının mevcut durumunu yansıtmaktadır. Bu fark daha fazla olması analitik sonuçların yapının mevcut durumundan uzak bir sonuç verdiğini göstermektedir. Bunun sonucunda deneysel sonuçlara göre elde edilen dinamik karakteristikler yardımıyla sonlu model iyileştirmesi

yapılarak yapının mevcut durumunun verileri elde edilmelidir. Bu nedenle sonlu eleman oluşturulurken dikkate alınan parametreler üzerinde değişikliklere gidilerek uygun yapının mevcut durumunu yansıtacak parametreler belirlenmelidir. Bu işleme sonlu eleman model iyileştirme adı verilmektedir ([82]; [83]). Sonlu eleman model iyileştirmeleri yapılarak mevcut yapıyı daha gerçekçi yansıtan sonlu eleman modeller ile yapının statik, dinamik davranışları kalibre edilmiş modeller üzerinden daha gerçekçi bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır.

### **1.6.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemleri**

Deneysel modal analiz genellikle sonlu eleman model iyileştirmesinde, yapıların mevcut ve hasarlı durumlarının dinamik özellikleri açısından değerlendirilmesinde, periyodik olarak yapı sağlığının takip edilmesinde kullanılmaktadır.

#### **1.6.1.1. Titreştiriciler**

Deneysel modal analizde (DMA) yapılardaki titreşimler dikkate alınarak dinamik karakteristikler bulunur. Bu yapıları titreştirmek için çevresel ve yapay etkiler kullanılmaktadır. Çevresel etkiler rüzgar, yaya, deprem ve araçların oluşturduğu titreşimler olduğu gibi sarsma masası, darbe çekiçleri gibi yatay titreşim oluşturacak yapay titreştiriciler kullanılmaktadır. Büyük ve rijit yapıları yapay titreştiricilerle titreştirmek mümkün olamayacağından bu tür yapılarda genellikle çevresel titreşimlerden yararlanılır. Yapay titreştiriciler genellikle laboratuvar ortamında üretilen ölçekli yapılar üzerinde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, deneysel dinamik karakteristiklerin belirlenmesi sırasında darbe çekiçleri kullanılmıştır. Deneysel ölçümler sırasında kullanılan darbe çekiçlerinin baş kısmındaki kuvvetölçer ile yapıya verilen titreşimlerin genliği ölçülmektedir. Farklı sertlikteki çekiç başlıkları ile farklı genlikteki titreşimler yapıya verilmektedir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Darbe Çekici ve Başlıkları [57].

#### 1.6.1.2. İvmeölçerler

Deneysel modal analizde yapılardaki titreşim dikkate alınarak yapıldığı için ivmeölçerlere de ihtiyaç vardır. İvmeölçerler yapı titreşimlerini belirlemek için kullanılırlar. İvmeölçerler frekans aralığı (bant genişliği), hassasiyet, maksimum ivme değeri, çalışma sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak ivmeölçer belirlenebilir. Yapı tipi dikkate alınarak ivmeölçerlerin bu özellikleri dikkatle seçilmelidir. Doğru seçilmeyen ivmeölçerler deneysel ölçüm sonucunun hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Burada frekans aralığı, ivmeölçerin ölçebileceği en az ve en yüksek frekans aralığını ifade etmektedir. İvmeölçerin hassasiyeti ise yerçekimi ivmesiyle orantılı olarak üretebileceği elektrik değerini ifade etmektedir. Yapının tahmin edilen frekansı ivmeölçerin hassasiyet aralığını belirlemektedir. Yani, yüksek frekans değerine sahip yapılarda düşük hassasiyetli ivmeölçerler tercih edilir. Diğer taraftan yüksek hassasiyete sahip ivmeölçerler frekans değeri daha düşük yapılar için uygundur. Öyle ki, yüksek hassasiyete sahip ivmeölçerler yapının titreşimindeki oluşabilecek küçük değişimlerde bile istenen sınır değerlerden daha yüksek tepkiler verebilir. Ayrıca ivmeölçerlerin ölçebileceği maksimum ivme genliği ve sağlıklı bir şekilde çalışabileceği en yüksek ve en düşük çalışma sıcaklığı ivmeölçer seçimi için bir diğer parametredir. Bu çalışma kapsamında yapısal titreşimlerin ölçülmesinde yay-kütle sönümleyici sistemlerden meydana gelen piezoelektrik ivmeölçerler (B&K 4506 tipi üç eksenli ve B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçer) kullanılmıştır (Şekil 1.13). B&K 4506 B 003 ve B&K 4507 B 005 tipi üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler Tablo 1.6'da verilmiştir.

Tablo 1.6. B&K 4506 B 003 ve B&K 4507 B 005 tipi üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler [84, 85].

| Model             | B&K 4506 B 003          | B&K 4507 B 005          |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Frekans Aralığı   | 0.3-2000 Hz             | 0.3-6000 Hz             |
| Maksimum İvme     | 14 g                    | 7 g                     |
| Hassasiyet        | 5 V/g                   | 1 V/g                   |
| Çalışma Sıcaklığı | -54 ile +100 °C aralığı | -54 ile +121 °C aralığı |
| Toplam Kütle      | 18 gram                 | 4.8 gram                |
| Boyut             | 25 x25 x25 mm           | 10 x10 x10 mm           |



Şekil 1.13. Piezoelektrik tipi üçeksenli ivmeölçer

### 1.6.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayar olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyallerini bilgisayara aktarmaktadır. Sinyaller ise bilgisayar program arayüzü ile işlenmektedir. İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine doğrudan yapı titreşimlerini ve ortamdaki gürültüleri içeren ham sinyaller ulaşmaktadır. Ham sinyalleri dinamik karakteristikleri istenilen doğrulukta elde etmek için istenilen özelliklere getirme işlemine sinyal koşullama denir. Sinyal koşullamada istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi veya düşük seviyeli bir sinyalin kalitesini arttırmak için kullanılır. Sinyallerin filtrelenmesinde seçilen frekans aralığı dışında kalan sinyallerin ayıklanmasıdır. Bundan dolayı frekans aralığının belirlenmesi sonuçların sağlıklı elde

edilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 1.14). Veri toplama ünitesi iki adet bataryaya sahip olmasından dolayı elektrik kesintisi olduğu durumlarda 1.5 saate kadar ölçümleri gerçekleştirmektedir. Yapay titreşim oluşturmak için kullanılan darbe çekici verileri sisteme aktarmak için bir adet kuvvet sensörü girişine sahiptir. Referanslı ölçüm yapabilme özelliğine de sahip bir veri toplama ünitesidir. Frekans aralığının belirlenmesi seçilen frekans ölçüm aralığının dışında kalan istenmeyen ham sinyallerin ortadan kaldırarak işlem kolaylığı sağlamaktadır. Frekans aralıkları ile ilgili daha geniş bilgiyi Heylen vd. [86] ve Ramos'dan [87] bulabilirsiniz.



Şekil 1.14. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

Veri toplama ünitesine aktarılan ve depolanan sinyallerin işlenmesi ile yapıların dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Sinyal işleme adı verilen bu süreç filtrelenmiş sinyallerin bilgisayara iletilmesiyle başlamaktadır. Bilgisayar ortamına zaman ortamında aktarılan sinyal koşullama işlemlerinden geçen sinyaller özel yazılımlar kullanılarak sinyal işleme süreci gerçekleştirilmektedir. Sinyallerin frekans ortamında işlenmesi değerlendirme kolaylığı açısından tercih edilmektedir. Fourier serileri kullanılarak zaman ortamındaki sinyaller frekans ortamına aktarılmaktadır. Yapıdaki titreşim tepkilerini ölçüp değerlendirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Fakat yöntemlerin matematik tabanları aynıdır [88]. Kullanılan yöntemler arasında farklılıkların zaman değişkenli zaman

ortamında ve frekans değişkenli frekans ortamındaki yöntemler olmasıdır. Frekans tanım alanındaki yöntemler piklerin seçilmesi, frekans tanım alanında ayırıştırma, geliştirilmiş frekans tanım alanında ayırıştırma (GFOA) ve polimax yöntemleridir. Zaman tanım alanındaki yöntemler ise rastgele azaltım, tekrarlanan, maksimum olasılık ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleridir. Literatürde deneysel çalışmalarda yığma yapının dinamik özelliklerini belirlerken tercih edilen yöntemler GFOA ve SAB yöntemleridir.

Sinyal işlemede sızıntı hatası gibi bazı problemler karşımıza çıkmaktadır. Sinyalin periyodik olmamasından (sinyal periyodunun tam katlı olmaması) kaynaklanan sızıntı hatasını en aza indirmek için ölçüm sürelerini uzun tutmak gerekmektedir. Farklı yöntemler de sızıntı hatasını ortadan kaldırmak için kullanılmıştır [86, 87, 88, 89].

Bu çalışmada kullanılan ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, sinyallerin veri toplama ünitesine depolanması, sinyal koşullama işleminin gerçekleşmesi ve sinyal işlemesi için PULSE (2006) [90] yazılımı kullanılmaktadır. DMA ölçümlerinden alınan sinyaller işlenerek dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için Operational Modal Analysis (OMA) [91] yazılımı tercih edilmiştir.

1940'lı yıllarda ortaya çıkan DMA yöntemi ilk önce uzay ve havacılık alanlarında ve makine alanlarında kullanılmıştır. DMA yöntemi 1980'li yıllardan sonra inşaat mühendisliği alanında kullanılmaya başlanmıştır [87, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98]. DMA yönteminin sıklıkla kullanıldığı alanlar; sonlu eleman model iyileştirmesi, dinamik karakteristiklerin elde edilmesi, yapı sağlığı izlenmesi ve mevcut ve hasarlı yapıların durumlarının değerlendirilmesi.

DMA yönteminde bazı genel kurallar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları yapı malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında sıcaklık ve nem gibi dış etkiler altında değişim olmadığı kabul edilir. Yapının belirli bir lokasyonundan alınan ölçümlerin yapının genelini yansıttığı kabul edilir. DMA ölçümünün sağlıklı sonuçlar verebilmesi için uygulayıcının dikkat etmesi gereken durumlar vardır. İlk olarak yapının mod şekilleri, sayısı ve frekans aralıkları gibi dinamik karakteristikleri hakkında yaklaşık değerleri içeren ön bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Sonlu eleman analizi ile kolaylıkla yaklaşık değerler elde edilebilir. ZTY veya ÇTY yöntemlerinden hangisinin ölçümlerin gerçekleşeceği yapı için daha uygun olduğu belirlenmelidir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken durum ise ivmeölçerlerin seçimi ve yerleştirilmesidir. Yapının mod şekillerine bağlı olarak ivmeölçerler belirli aralıklarla yerleştirilmelidir. Daha sonra yapıya yerleştirilen ivmeölçerler veri toplama ünitesine teker teker tanıtılarak sinyal aktarım kablolarının kendi kanallarına yerleştirildiği sinyal gelip

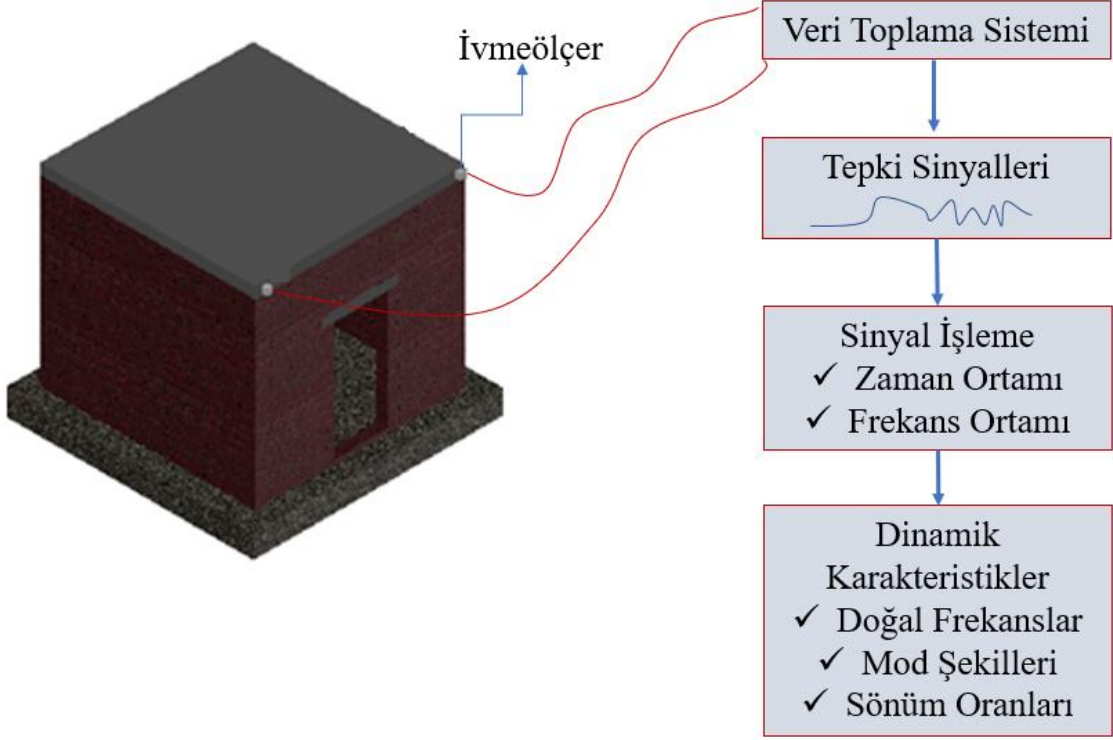
gelmemesine göre kontrol edilmelidir. Son olarak ise frekans aralığı, ölçüm süresi gibi ayarların yapılması gerekmektedir. Birçok çalışma ölçüm süresinin belirlenmesi üzerine çalışmıştır [87, 88, 89. 99, 100, 101].

### 1.6.2. Çevresel Titreşim Yöntemi

Çevresel titreşim yöntemi (ÇTY), rüzgar, yaya, taşıt ve deprem gibi ortam uyarımlarını dikkate alarak ve deneysel ölçümlere dayalı olarak yapının dinamik davranışını gösteren dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemde etki davranış fonksiyonu belirlenemediği için yapıları titreştiren etkilerin genliği ve zamanla değişimi bilinmemektedir. Bu duruma bağlı olarak literatür incelendiğinde çevresel titreşim yöntemi operasyonel modal analiz veya sadece tepki modal analizi olarak çalışmalarda geçmektedir [102, 103]. Zaman veya frekans tanım alanlarında titreşimlerden kaynaklı yapıda meydana gelen tepki verilerinin işlenmesi ile belirlenen Tepki Davranış Fonksiyonu ile dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Zaman veya frekans ortamında yapılan işlemler benzer sonuçları ortaya koyduğu için birbirlerine karşı avantajları veya dezavantajları bulunmamaktadır. Daha önceki yapılan çalışmalarda zaman ve frekans ortamına dayalı farklı yöntemler kullanılmıştır. Zaman ve frekans ortamına dayalı yöntemlerin bazıları aşağıda özetlenmiştir;

- Zaman tanım alanı
  - ✓ Rastgele azaltım
  - ✓ Tekrarlanan
  - ✓ Maksimum olasılık
  - ✓ Stokastik Altalan Belirleme (SAB)
- Frekans tanım alanı
  - ✓ Piklerin seçilmesi (PS)
  - ✓ Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA)
  - ✓ Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA)
  - ✓ Polimax

ÇTY kullanılarak yapının dinamik karakteristiklerinin nasıl bulunduğu dair bir akış şeması Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. ÇTY’ye göre dinamik karakteristiklerin belirlenmesi

Literatürde deneysel çalışmalarda yığma yapının dinamik özelliklerini belirlerken tercih edilen yöntemler OMA [91] yazılımında da bulunan GFOA ve SAB yöntemleridir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde, yığma modellerin dinamik karakteristiklerini belirlerken GFOA yöntemleri kullanılmıştır.

#### 1.6.2.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi (GFOA)

FOA ve GFOA yöntemleri frekans ortamına dayalı yöntemler olup dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde en çok tercih edilen yöntemlerdendir. GFOA yöntemine FOA yönteminin genişletilmiş hali diyebiliriz. GFOA yönteminde doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmesi ile FOA yöntemindeki çıktılara ek olarak sönüm oranları da belirlenebilmektedir. Spektral yoğunluk fonksiyonu sinyal işleme işleminden sonra elde edilir. Daha sonra spektral yoğunluk fonksiyonundan tekil değer ayrıştırma grafiğine geçilir. GFOA yönteminde ise tekil değer ayrıştırma grafiğindeki piklerin seçilmesi ile yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiş olur. Tekil değer ayrıştırma grafiğindeki piklerin seçimi öznel bir durum olduğu için hesaplanan doğal frekansın kesinliği değişmektedir.

Doğal frekans değerleri, tek bir frekans çizgisi kullanımına dayalı olan Hızlı Fourier Dönüşümü 'nün (HFD) çözünürlüğüne bağlıdır [88, 89].

GFOA yönteminde tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu (GSY) zaman ortamına Ters Ayırık Fourier Dönüşümü yardımıyla geri dönüştürülebilir. Sönüm tek serbestlik dereceli oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilirken, zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesi ile doğal frekans elde edilir [88]. Bu yöntemde ölçülen davranış fonksiyonu ve ölçülmeyen etki kuvveti arasındaki ilişki denklem 1.4'deki gibi ifade edilmektedir [105].

$$G_{yy}(jw)=H(jw)^*G_{xx}(jw)H(jw)^T \quad (1.4)$$

burada  $G_{yy}(jw)$ ,  $H(jw)$ ,  $G_{xx}(jw)$ ,  $*$  ve  $T$  ifadeleri sırasıyla tepki sinyalinin GSY fonksiyonunu, frekans davranış fonksiyonunu, etki sinyalinin GSY fonksiyonunu, ifadenin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Tepki sinyalini ifade eden GSY fonksiyonu sayısal düzenlemelerden sonra tek kutuplu artık değer fonksiyonu şeklinde,

$$H(jw) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{jw - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{jw - \lambda_k^*} \quad (1.5)$$

ifade edilebilir. Burada;  $n$ ,  $\lambda_k$  ve  $R_k$  sırasıyla mod sayısını, kutup fonksiyonunu ve artık değer fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklemlerdeki sadeleştirmeler ve düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem,

$$G_{yy}(jw) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{jw - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{jw - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-jw - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-jw - \lambda_k^*} \quad (1.6)$$

Şekilde gösterilmektedir [106]. Burada  $A_k$  ifadesi GSY fonksiyonunun  $k$ . artık değer matrisini ifade etmektedir. İlk iş olarak GFOA metodunda GSY matrisini belirlemek gerekmektedir. Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun tahmini  $w=w_i$  olduğu kabul edilmektedir. Bu eşitlik sonrasında tekil değer ayrışım matrisinin son hali,

$$G_{yy}(jw_i) = U_i S_i U_i^H \quad (1.7)$$

şekline gelmektedir. Burada  $U_i$  ve  $S_i$  sırasıyla tekil vektörleri kapsayan matrisi ve skaler tekil değerlerle ifade edilen diyagonal matrisi ifade etmektedir. Yukarda denklemi bulunan GSY fonksiyonu için tepe noktasını gösteren değerler doğal frekansları ifade etmektedir. Yapının doğal mod şekillerini ise tepe noktaları meydana getiren tekil vektörler belirlemektedir [106]. Tekil değer yoğunluk fonksiyonu tek serbestlik dereceli olarak pik çevresindeki GSY fonksiyonundan belirlenmektedir. Doğal frekans ve sönüm oranı ise tekil değer yoğunluk fonksiyonundan elde edilir. Zaman tanım alanında bu değerlerin bulunabilmesi için ise ters HFD yapılması gerekmektedir. İki mod ortogonal ise, bu modların tekil vektörleri, karşılık gelen mod şekil vektörlerini temsil eder. Bazı durumlarda ilk tekil vektörün temsil ettiği mod şekli daima iyidir. Bu durumlara örnek olarak iki modun da belirgin olmasını verebiliriz [88, 89, 106].

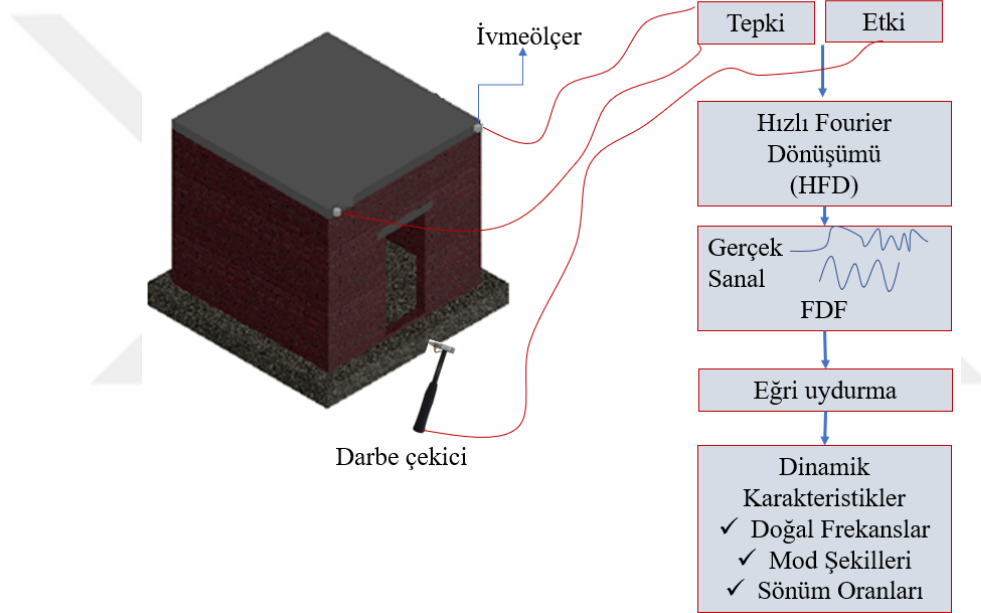
### 1.6.3. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Yapıların doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranlarını ifade eden dinamik karakteristiklerini elde etmek için kullanılan bir diğer deneysel ölçüm yöntemi ise ZTY'dir. Burada amaç, yapıyı titreştirmek için uygulanan kuvvetin büyüklüğünü belirleyebilmemiz ve bu büyüklüğü bilinen kuvvet karşısında yapının vermiş olduğu tepkinin deneysel olarak ölçülmesidir. Burada sarsıcılar, darbe çekiçleri veya sarsma masaları yapının titreştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapıya yapay şekilde bir kuvvet uygulandığında yapının tepkisini yapay kuvvet sinyali ile belirlenmektedir. Yine tüm yöntemlerde olduğu gibi yapı titreşimleri ivmeölçerler tarafından sinyal işleme için veri toplama sistemine gönderilir. Yapıdan alınan bu titreşim sinyalleri zaman tanım alanında elde edilmektedir. Bu sinyallerden frekans tanım alanına Fourier serileri yardımıyla geçilmektedir. Etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişkiyi,

$$H_{ik}(iw) = \frac{Y_k(w)}{X_i(w)} \quad (1.8)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada;  $H_{ik}(iw)$ ,  $Y_k(w)$  ve  $X_i(w)$  ifadeleri sırasıyla frekans davranış fonksiyonunu (FDF), frekans tanım alanındaki tepki ve etki fonksiyonlarını göstermektedir. Yapının dinamik karakteristiklerini (doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı) elde edebilmek için burada elde edilen  $H_{ik}(iw)$  (frekans davranış fonksiyonu)

matematiksel yöntemlerden sonra ayrıştırılması gerekmektedir. ZTY yönteminin görsel olarak aşamaları Şekil 1.16'da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde yapıya uyarılma etkisi veren çekicinin başlığında bulunan kuvvetölçer yardımıyla yapıya uygulanan etki zaman tanım alanında ölçülür. Yapı bu etki karşısında titreşim gerçekleştirir ve buna bağlı olarak ivmeölçerler yardımıyla yapının bu etkiye karşı koyduğu tepki de zaman tanım alanında ölçülür. Zaman tanım alanında elde edilen etki ve tepki fonksiyonları HFD ile frekans tanım alanına dönüştürülür. Frekans tanım alanına dönüştürülen tepki fonksiyonunun etki fonksiyonuna bölünmesi ile yapıya ait  $H_{ik}(iw)$  yani FDF elde edilir.



Şekil 1.16. ZTY yönteminin akış şeması [57].

### 1.7. Modal Güvence Kriteri ve Koordinat Modal Güvence Kriteri

Önceki bölümde anlatıldığı gibi, deneysel olarak türetilen modal verileri dinamik sonlu eleman sonuçlarıyla veya diğer benzer modal testlerle karşılaştırmak için çeşitli teknikler mevcuttur. Bu bölümde, böyle bir yöntem olan Modal Güvence Kriteri (MGK) hakkında bilgi verilmektedir. Şu anda MGK, ortagonallik yöntemleri gibi, iki özvektör seti verildiğinde hangi bireysel modların birbiriyle ilişkili olduğuna ve bunların ne ölçüde karşılaştırıldığına dair bir gösterge vermek için kullanılmaktadır. Ne yazık ki, bu karşılaştırma oldukça gelişigüze, çünkü bu tür ilişkili mod çiftleri için MGK değerinde

1'den daha düşük bir değer olması, mod şekillerinin tam olarak uyuşmadığını gösterir - MGK değeri ne kadar düşükse, mod şekillerinin uyumluluğu o kadar kötü olur. Bu bize iki veri seti arasında bir uyumsuzluk olduğunu söylese de, tutarsızlığın kaynağının yapının neresinde olduğunu açıkça göstermez yani MGK yöntemi bize global bazda bilgi vermektedir. Açıkçası, hangi modların genel korelasyon eksikliğine katkıda bulunduğundan ziyade hata(lar)ın konumunu veya en azından bölgesini bilmek daha önemlidir. Bu nedenle, Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK), korelasyonun mod numaralarından ziyade yapının serbestlik dereceleriyle ilgili olduğu şekilde orijinal MGK konseptinden geliştirilmiştir. Ortaya çıkan KMGK değerlerinin, ilk olarak hataların yapının neresinde meydana geldiğini göstermede ve ikinci olarak neden ortaya çıktıklarının anlaşılmasına yardımcı olarak önemli ölçüde yardımcı olduğu gösterilmiştir. Buradanda anlaşıldığı gibi MGK yönteminin aksine KMGK yöntemi bize lokal bilgi vermektedir.

MGK korelasyon tekniği, her biri aşağıdaki özelliklere sahip olan, deneysel ve sonlu elemanlar analizinden veya deneylerden iki set özvektör alır;

$[\Psi_\alpha]$  birinci mod şekil vektörü

$[\Psi_\beta]$  ikinci mod şekil vektörü

Bu özvektörler daha sonra aşağıdaki denklem kullanılarak ilişkilendirilebilir:

$$MGK(\Psi_\alpha, \Psi_\beta) = \frac{|\Psi_\alpha^T \Psi_\beta|^2}{(\Psi_\alpha^T \Psi_\alpha)(\Psi_\beta^T \Psi_\beta)} \quad (1.9)$$

burada MGK'nın birim matris çıkması için birinci ve ikinci mod şekil vektörlerinin aynı olması gerekmektedir. MGK değerinin sıfıra yakın çıkması ise farklı mod şekil vektörlerinin karşılaştırıldığı anlamını taşımaktadır.

MGK'yı pratikte uygularken aşağıdakilere dikkat etmek yararlıdır:

- çarpım öğelerinin toplamının mutlak değerinin alınması için, paydaki modülün vektör çarpımından sonra alınması esastır; ve,
- normalleştirmenin etkisi paydadaki terimler tarafından iptal edildiğinden, her iki özvektör kümesinin de normalleştirilmesi gerekli değildir.

KMGK tekniğinin uygulanması, iki hesaplama aşaması gerektirir; bunlardan ilki,  $[\Psi_\alpha]$  matrisinden hangi modların  $[\Psi_\alpha]$  matrisininkilere karşılık geldiğini belirlemektir. Bu, denklem 1.9'un kullanılmasıyla elde edilir ve her biri bir L indeksi ile gösterilen bir 'İlişkili Mod Çiftleri' (İMÇ'ler) seti verir.  $L_{maks}$  mod çiftleri setini bir araya getirdikten sonra, KMGK prosedürünün ikinci aşaması ise tüm ilişkili mod çiftleri üzerinden her bir koordinattaki korelasyon değerlerinin hesaplanması,

$$KMGK(i) = \frac{\left( \sum_{j=1}^L |(\Psi_\alpha)_{ij}(\Psi_\beta)_{ij}| \right)^2}{\sum_{j=1}^L (\Psi_\alpha)_{ij}^2 \sum_{j=1}^L (\Psi_\beta)_{ij}^2} \quad (1.10)$$

Şeklinde [107]. Burada; i ve j sırasıyla kaçınıcı mod şekil vektörünün kaçınıcı koordinattaki modal yerdeğiştirme değerinin olacağını ifade ederken L ise yukarıdaki denkeleme göre yapılan hesaplamadaki toplam mod şekli sayısını göstermektedir.

## 1.8. Analitik Modelleme

### 1.8.1. Geometri ve Malzemenin İdealleştirilmesi

Gerçek bir yapının sismik davranış analizi, matematiksel terimlerle analitik modelleme kullanılarak gösterilmektedir. Analitik modelleme, yapıdaki yüklerin, yük kapasitesinin, malzeme davranışının ve yük transfer mekanizmasının etkilerini anlamaya odaklanır. Ancak gerçek bir yapının davranışını doğrusal olmayan malzeme davranışı ile temsil etmedeki problemler nedeniyle zor bir konudur. Yığma yapılar, malzemelerin heterojenliği nedeniyle doğası gereği karmaşıktır ve modelleme için bazı basitleştirmeler ve varsayımlar gereklidir. Yığma yapıların modellenmesinde idealizasyonlar için araştırma alanında farklı yaklaşımlar benimsenmiştir. Analitik bir model oluşturulurken geometrinin idealleştirilmesi, malzeme davranışı, sınır koşulları, yükün büyüklüğü, yönü ve oryantasyonu kullanılır. Malzeme, geometri ve yapısal davranış idealleştirmeleri, yığma yapı modellemesine ilişkin temel basitleştirmeler ve varsayımlardan oluşmaktadır ve aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yığma yapıların tepkisini anlamada bazı güçlükler olduğu için geometrik gösterimi zordur. Hesaplamaları yapmak ve sonuçları analiz etmek için model geliştirmek için çerçeve,

kabuk veya üç boyutlu katı elemanlar kullanılır. Malzeme özellikleri açısından duvar birimleri harçtan daha rijittir ve düşey derzlerin rijitliği yatay derzlerden daha küçüktür. Düzlem içi yükleme düşünüldüğünde kalın bir yığma duvar modellemek için katı elemanlar yerine kabuk elemanların kullanılması, elemanların kalınlıkları boyunca gerilmelerin değişimi nedeniyle sonuçların analiz edilmesindeki zorluklar nedeniyle iyi bir seçim değildir. Yığma yapılar için doğru gerilme analizinin ilerlemesindeki temel zorluklar, uygun malzeme yapı yasalarının tanımlanması ve kullanılmasıdır. Bileşen malzemeler, mukavemet ve deformasyon parametreleri, gerilme-gerinim ilişkileri ve mukavemet modelleri ile karakterize edilir. Duvar birimleri ile harç derzleri arasındaki etkileşimdeki fiziksel-kimyasal ve mekanik parametreler aşağıdaki faktörlerden kaynaklanmaktadır [108]:

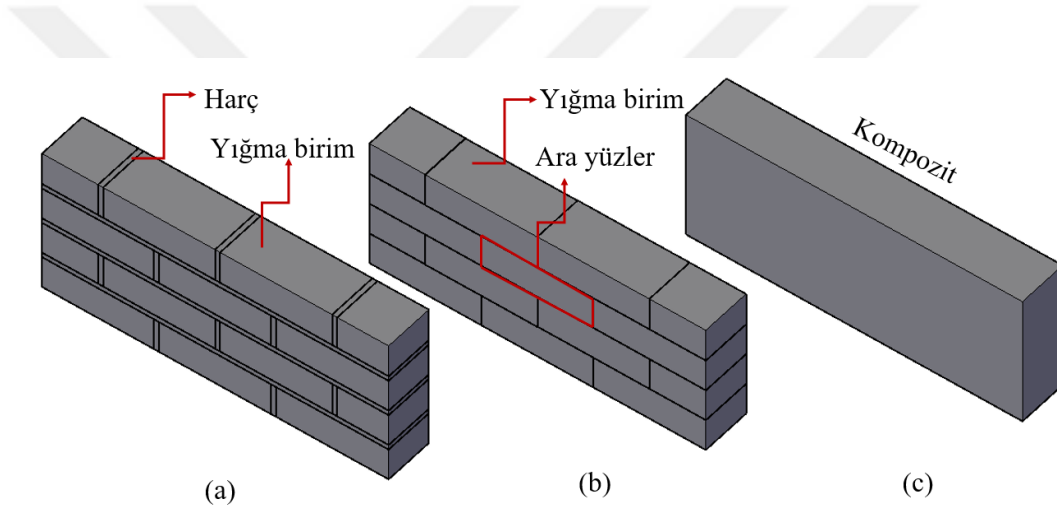
Duvar birim elemanların etkileri:

- Eksenel gerilimlerle basınç ve çekme dayanımı
- Elastisite modülü
- Poisson oranı
- Süneklik ve sürünme
- Su geçirmezlik ve yüzeysel (pürüzlülük) özellikler
- Kimyasal madde direnci
- Nem için hacim değişimi
- Sıcaklık ve kimyasal reaksiyon
- Ağırlık
- Şekil ve delik boyutları

Harcın etkileri:

- Çok eksenli gerilimler altında basınç dayanımı ve davranışı
- Elastisite modülü
- Poisson oranı
- Süneklik ve sürünme
- Yapışma kuvveti
- İşçilik
- Plastisite
- Su tutma kapasitesi

Modelin hazırlanması için teknik ve ekonomik olarak doğru eleman tipinin seçimi, analiz edilen probleme bağlıdır. Yığma yapıların heterojenliği ve anizotropisi göz önüne alındığında, daha az karmaşık sonuçlar elde etmek için bazen tüm yapı yerine yapısal parçaları modellemek daha iyidir. Yığma yapıların sismik tepkilerinin değerlendirilmesi, istenen doğruluk düzeyine bağlı olarak değişmektedir. Geometri hakkında varsayımlar ise ne kadar basit bir model olacağını gösterir. Detaylı mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme yöntemleri yığma yapılar için yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardır. Karmaşıklık ve detay gereksinimlerine göre her biri için farklı uygulama alanları bulunduğundan, bir modelleme stratejisi diğerine tercih edilemez. Lourenço [52] tarafından yığma yapılar için hesaplama stratejilerinin gösterimleri Şekil 1.17'de verilmiştir.



Şekil 1.17. (a) detaylı mikro modelleme, (b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, (c) Makro modelleme [52].

Sürekli ortam modelleri, büyük ölçekli yığma yapıların gerçek davranışını, özellikle yerel tepkisi ile ilgili olarak, basit bir şekilde analiz etmek için en iyi yöntemlerdir. Bununla birlikte, büyük yapısal deformasyonlar için, duvarın süreksiz ve bloklu yapısından kaynaklanan duvarların anizotropisi önemli bir rol oynar ve sürekli ortam mekaniğine dayalı yöntemlerin hasar mekanizmalarını tahmin etme etkinliğini azaltır [108]. Bu modeller, özellikleri harç derzleri ve tuğlalar için homojenleştirme prosedürleriyle elde edilmesi gereken eşdeğer bir homojen ortamın kurucu denklemlerini dikkate alır. Ayrık modeller, tuğla duvarların ayrıklaştırılmasını tuğlalar gibi rijit gövdeler ve iki tuğlayı birbirine bağlayan harç derzleri gibi düz arayüz elemanları olarak kabul eder. Bu metodoloji, tuğla birimlerini birbirine bağlayan bir süreksizlik elemanı olarak harç derz arayüzüne

dayanmaktadır. Her temasta, bloklar arasındaki mekanik etkileşim, bir normal ve bir kesme bileşenine çözümlenen bir kuvvetle (gerilme) temsil edilir. Temas yer değiştirmeleri, temas noktasındaki iki blok arasındaki göreceli yer değiştirme olarak tanımlanır.

Yığılma yapılarına ilişkin yapısal analiz teknikleri, genellikle yapının dinamik davranışını değerlendirmek için ileri düzeyde analizler gerçekleştirmez. Bu metodolojiler, yapı ve sonuçlar üzerindeki gerilim dağılımını sağlayabilen elastik veya elastik olmayan sonlu eleman analizlerini kullanır. Bu sonuçlar hasar mekanizmaları hakkında bilgi sağlar. Ancak yığılma yapıların doğrusal olmayan yapısal davranışı, sadece yumuşama davranışının meydana gelebileceği harç derzlerine bağlıdır. Ayrık modeller, çatlamanın başlamasından sonra bile olası hasarlar altında yığılma yapıların yumuşama davranışını işlemek için yoğun hesaplama ve yetenek gerektirir.

#### **1.8.1.1. Detaylı Mikro Model**

Detaylı mikro model yöntemi, her iki birimin ve harç derzlerinin elastik olmayan ve malzeme özelliklerini ayrı ayrı ele alır. Birim, harç ve arayüz, farklı kurucu yasalarla temsil edilir. Süreklilik ortam modelleri, birimler ve derzlerdeki harç için kullanılır ve süreksizlik modelleri, birim harç arayüzünü temsil eder. Bu nedenle bu modelleme, birim harç arayüzeyleri arasında olası bir çatlak veya kayma düzleminin karakterize edilmesini sağlar. Yapısal davranış analizleri, elastisite modülü, Poisson katsayısı gibi mekanik malzeme özelliklerine ve birimlerin ve harcın elastik olmayan özelliklerine göre yapılır. Bu özellikler basınç, çekme, kesme ve eğme testleri gibi deneysel testler yapılarak tahmin edilir. Detaylı mikro modelleme tekniği, diğer yaklaşımlara göre daha fazla hesaplama çabası ve zaman gerektirir. Ancak bu yöntem, laboratuvar testlerinin çoğaltılmasında başarıyla kullanılabilir [109-113].

#### **1.8.1.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme**

Detaylı mikro modelleme yöntemi en gelişmiş ve ayrıntılı modelleme yöntemi olmasından dolayı duvarın bölgesel davranışlarını göstermektedir. Detaylı mikro modellemede oluşan büyük boyutlardaki rijitlik matrisinin analiz süresini uzatmasıyla birlikte sonuç dosyalarının büyümesine sebep olmaktadır. Bu durum detaylı mikro

modelleme yönteminin dezavantajı olduğu için bunun üstesinden gelmek için basitleştirilmiş mikro modelleme geliştirilmiştir. Ayrıca, bu yöntem, yapısal bir analiz için azaltılmış hesaplama kısmıyla daha hızlı ve daha az sonuç dosyası üreterek büyük yığma yapılarda etkili modellemelere yol açabilir [114,115,116]. Basitleştirilmiş mikro modeldeki her bağlantı, harç ve iki birim-harç arayüzünden oluşur ve harç derzlerinin ve birim harç arayüzünün davranışı, bağlantı noktalarında çatlak çizgileri ile çevrelenmiş elastik bloklardan oluşan bir bütün gibi süreksiz elemanlarda toplanır. Sandoval ve ark. [117], basitleştirilmiş bir mikro model aracılığıyla burkulma tepkisinin sayısal simülasyonunu gerçekleştirdi ve mikro modelleme yaklaşımının, eşmerkezli veya eksantrik dikey yüklemeye maruz kalan duvarların yük taşıma kapasitesini değerlendirme yeteneğini gösterdiği sonucuna vardı.

Basitleştirilmiş mikro modelde ara yüzeyler tanımlanırken kayma ve çekme davranışları beraber tanımlanmalıdır. Bu tanımlamalardan dolayı meydana gelebilecek çekme ve kayma kırılmalarının birim elemanlarının ortasındaki ara yüzeylerde gerçekleşeceği kabul edilir.

Basitleştirilmiş mikro modellemede elastik davrandığı kabul edilen ara yüzeyler için verilen eşitlik denklem 1.11'de verilmiştir.

$$\bar{t} = \bar{k} \times \bar{\delta} \quad (1.11)$$

$$\bar{t} = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$\bar{k} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

burada  $\bar{t}$ ,  $\bar{k}$  ve  $\bar{\delta}$  sırasıyla gerilme tensörü, rijitlik matrisi ve deplasman vektörünü ifade etmektedir. Ayrıca,  $\sigma_n$ ,  $\tau_s$ ,  $k_n$ ,  $k_s$ ,  $\delta_n$  ve  $\delta_s$  ifadeleri sırasıyla normal gerilmeyi, kayma gerilmesini, normal rijitliği, kayma rijitliğini, normal yer değiştirmeyi ve kayma yer değiştirmesini göstermektedir. Bu modellemede, kayma ve normal rijitlikleri ara yüzlerde tanımlanır. Literatür incelendiğinde normal ve kayma rijitliklerinin elde edilmesi için farklı denklemler belirlenmiştir [52, 152]

### 1.8.1.3. Makro Modelleme

Makro modelleme tekniği, birimlerin, harç ve birim-harç arayüzünün homojen bir süreklilik içinde dağılmış bir süreklilik olarak temsil edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, sürekli sonlu elemanlar veya yapısal bileşen modelleri kullanır. Birimler ve harç davranışı ayırt edilmez, homojen, anizotropik bir süreklilik olarak kabul edilirler. Makro modelleme yaklaşımı, büyük boyutlu katı elemanları modellemek için oldukça yetenekli bir tekniktir. Bu tip modelleme ile harç ve birim-harç arayüzü için daha az zaman ve daha az malzeme özelliği kullanılmaktadır. Yapısal analiz için kullanılacak gerilim-gerinim ilişkilerini tanımlamak için deneysel testler kullanılır. Sürekli olmayan modeller, bileşen modelleri ve sonlu eleman modelleri genellikle kolay ağ oluşturma özelliğine sahip makro modelleme tekniğini kullanır. Yapısal analizin süresi önemli ölçüde model boyutlarına bağılı olduğundan makro modelleme, diğer stratejilerle karşılaştırıldığında daha az zaman alır ve geometri ve mekanik özelliklerin modellenmesi açısından daha az zahmetlidir.

Mikro modelleme, yığma yapıların yerel davranışını detaylı olarak belirlemek için en uygun yapısal modelleme stratejisidir. Bu yöntem, yapısal analizler yapıldığında hesaplama açısından çok etkilidir. Öte yandan, yapı, elemanın uzunluğu boyunca gerilmelerin üniform olması için yeterli boyutlarda duvarlardan oluştuğunda makro modelleme daha uygundur. Dolayısıyla bu strateji, doğruluk ve verimlilik arasında bir seçim yapılması gerektiğinde kullanılmaktadır.

Giordano ve ark. [118], yaptıkları çalışmalarda yığma yapıların analizi için farklı sayısal tekniklerin uygulanabilirliğini araştırmıştır. Her modelin belirli sınırlamalarına rağmen, üç yöntemin de bir dereceye kadar test edilen numunelerin genel davranışını doğru bir şekilde kavrayabildiği ve böylece yığma yapı elemanlarının çalışmasında etkili bir şekilde kullanılabileceğini kanıtladığı sonucuna vardılar.

Pena ve ark. [119], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak iki model oluşturmuştur. Modellerden birisi 3 boyutlu kompozit kirişlere sahip iken diğer model ise 3 boyutlu katı elemanlar ile oluşturulmuştur. Ayrıca rijit eleman yöntemine dayalı olarak 2 boyutlu düzlem içi elemanlar oluşturdular ve bu modellerin minarenin yapısal davranışını değerlendirmek için dikkate aldılar. Bu çalışma, modellerin aynı yükler ve analiz türleri altında benzer davranışlar sergiledikleri sonucuna varmaktadır. Ancak doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerden elde edilen sonuçlar, yapının depremlere karşı oldukça farklı tepkiler verdiğini göstermektedir.

Yapılan bir diğer çalışmaya göre bir yığma kubbe için oluşturulan modelin doğruluğu üzerine üç modelleme tekniğini de uyguladı [120]. Ayrıntılı mikro modelin, kubbenin yük taşıma kapasitesini ve sertliğini tahmin etmek için en doğru model olduğu sonucuna vardılar. Basitleştirilmiş mikro model, ayrıntılı modele göre kubbenin sertliğini eksiktahmin ederken ve makro model, üç model arasındaki deneysel yük-yer değiştirme ilişkisini temsil etmede en az doğru kabul edilir [120].

Yığma yapıların modellenmesinde, yapıyı temsil eden uygun bir modelin seçilmesi karmaşık bir konudur. Detaylı mikro modelleme, harç ve duvarın davranışını ayrı ayrı ele alır. Basitleştirilmiş mikro model, blokları bir süreklilik olarak temsil eder, ancak harç arayüzünün toplu bir arayüz olduğu varsayılır. Makro modeller plastik analiz için kullanılır ve homojen bir malzeme olarak duvarın mekanik özelliklerini temsil eder. Yığma yapıların analizi düşünüldüğünde, bir analiz yönteminin diğerine üstün olduğu iddia edilemez. Analitik modelleme yöntemi, problemin ölçeğine, mekanik özelliklerin mevcudiyetine ve amaçlanan hesaplamalara bağlıdır.

### **1.8.2. Davranışın İdealleştirilmesi**

Yığma binaların yapısal davranışının analizi için elastik davranış, plastik davranış ve elastik olmayan davranışlar yaygın idealleştirmelerdir.

#### **1.8.2.1. Elastik (Doğrusal) Davranış**

Doğrusal elastik model, malzemenin Hooke Yasasına uyduğunu kabul eden ve yapının davranışı hakkında genel bilgiler veren temel yaklaşımdır. Doğrusal davranışa göre, bir yığma yapının malzemeleri hem basınç hem de çekmede sonsuz bir doğrusal elastik davranışa sahiptir ve bu, çekme altında güvenilir değildir. Esnek bir modelin yaygın kullanımı, hem nihai sınır durumlarının hem de hizmet verebilirlik sınır durumlarının doğrulanması içindir. Doğrusal olmayan ve plastik modele göre, esnek bir davranışın idealleştirilmesi, girdi verileri ve kaynak gereksinimleri için daha az zaman alır.

### 1.8.2.2. Plastik Davranış

Plastik analiz yöntemleri, nihai sınır durumlarının doğrulanması için kapasite ve hasar durumunda yükü incelemek için yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, plastik analiz uygulaması genellikle basit yapılar için geçerli olup, büyük ve karmaşık geometrik şekilli yapıların incelenmesi için pratik değildir. Plastik analize göre, yığma yapılar, sünek bir tepki sergileyen sıfır çekme gerilimine ve çatlak oluşumu için enerji dağılımı olmaksızın sonsuz basınç dayanımına sahiptir.

### 1.8.2.3. Elastik Ötesi (Doğrusal Olmayan) Davranış

Doğrusal olmayan veya elastik olmayan analiz, hem nihai sınır durumları hem de kullanılabilirlik sınır durumları için elverişlidir. Bu analiz, yığma yapıların elastik bölgeden çatlama ve kırılmaya kadar olan davranışını göçme zamanına kadar gözlemler. Doğrusal olmayan modeller, fiziksel, geometrik, malzeme ve temas doğrusal olmayan davranışa izin verir. Fiziksel olarak doğrusal olmama, malzemenin basınç ve çekmede elastik ötesi davranmasıyla ilgilidir.

Geometrik olarak doğrusal olmama, uygulanan yüklerin noktasının yükün artmasıyla değiştiğini ve büyük gerinimler veya yer değiştirmelerle kararsızlığı varsayar. Geometrik doğrusal olmama, yığma yapılar gibi basınç dayanımından daha düşük çekme dayanımına sahip yapıların davranışını etkiler. Doğrusal ve plastik modellere göre, doğrusal olmayan analizler daha fazla zaman gerektirir ve basınç, kayma ve çekme dayanımı, gerilme-gerinim ilişkisi, Poisson oranı ve elastisite modülü gibi malzeme özelliklerine ihtiyaç duyar. Makul sonuçlar elde etmek için literatürden alınabileceği gibi deneysel testler yoluyla da malzeme özellikleri elde edilebilir.

## 1.9. Deneysel Dinamik Testler

Yapılarda deprem performansının incelenmesi için uygun yöntemin seçimi, gerekli tecrübeler, teknik problemler, sonuçlar ve araştırmanın bütçesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Deneysel yöntemler, yapılar üzerindeki deprem etkilerini simüle etmenin en iyi yoludur ve yapının gerçek davranışına en yakın durum belirlenebilir. Bir yapının veya yapısal elemanların sismik davranışını değerlendirmek için deneysel testlerin yapılmasına

yönelik artan bir talep vardır. Bununla birlikte, tam ölçekli yığma yapı üzerindeki çalışmalar, test yöntemleri veya analitik modellemede bile hala zordur.

Fiziksel modellere uygulanan sismik simülasyon testleri ile yapıların doğal frekansları, sönüm oranları, titreşim modları ve elastik olmayan davranışları değerlendirilmektedir. İvme, yer değiştirme, yapının şekil değiştirmesi, göçme tarzı ve göçme mekanizmalarının sismik tepkileri de deneysel test yöntemleri kullanılarak tahmin edilebilir. Analitik modellerle tahmin edilen gerilmeler, deformasyonlar ve modal şekiller genellikle basitleştirilmiş modelleme tekniklerine ve doğrusal olmayan malzemeye dayandığından, sismik simülasyon testleri analitik modellere göre daha güvenilir sonuçlar verir. Sarsma masası araştırmaları ayrıca sıvılaşma, deprem sonrası oturma, temel davranışı ve yanal toprak basıncı sorunları hakkında da değerli bilgiler vermektedir. Bu nedenle, yapılar üzerindeki giriş hareketlerinin yoğunluk ve frekans içeriği üzerindeki yerel saha etkilerinin güçlü etkisini kabul eden jeoteknik deprem mühendisliğindeki modern eğilimlerle yakından ilişkilidirler.

### **1.9.1. Yarı-Statik Testler**

Yarı statik test yöntemi, hasar gelişiminin ilerlemesini ve yığma yapıların sismik davranışını değerlendirmek için gerçekleştirilir. Yarı statik testlerde, yapının sismik performansının değerlendirilmesi için yapının boyutunda herhangi bir sınır yoktur ve bu testler nispeten ucuzdur ve çok özel tipte aparatlar gerektirmez. Ancak yükler ve yer değiştirmeler yavaş oranlarda uygulandığından, ivmeye bağlı atalet kuvvetleri ve hıza bağlı sönümleme kuvvetlerinin etkileri ortadan kalkar. Yer değiştirme ve kuvvet geçmişleri önceden tanımlanır ve daha sonra testi devam ettirmek için kullanılır.

Yarı statik test yöntemi, yapı üzerindeki kütleye göre atalet kuvvetlerinin toplu kütlelerini kullanır ve bu, dağıtılmış kütleye sahip yapılar için yöntemin dezavantajlarından biridir. Kullanılan yer değiştirme geçmişinin oranı ve modelinin ortadan kaldırılması da bu tekniğin bir diğer dezavantajıdır. Literatürdeki bazı araştırmalarda yarı statik test yöntemi kullanılmış ve bu, depremlerin yığma yapılar üzerindeki etkilerine katkıda bulunmuştur [121-127].

### 1.9.2. Benzeşik Dinamik Test

Benzeşik dinamik test yöntemi, Japonya'da Takanashi [147] tarafından sismik yer hareketleri altındaki büyük yapıları incelemek için tanıtıldı. Benzeşik dinamik test yöntemi, atalet kuvvetleri şeklinde sonuçlanan dinamik etkileri yeniden oluşturmak için bilgisayar ve yarı statik yükleri kullanan deneysel yöntemlerden biridir. Bu yöntem, sismik davranış yapılarını zaman alanına göre simüle etmek için hesaplamalı ve deneysel kısımlardan oluşmaktadır. Bu teknikte, bir yapının dinamik tepkisi, her zaman adımında deneysel sonuç kullanılarak hesaplanır. Hesaplama kısmı bilgisayar tarafından gerçekleştirilebilir; yer değiştirme olarak yapısal tepki bir zaman adımında hesaplanır. Analiz sürecinde gerekli olan atalet ve sönüm kuvvetleri, hareket denklemlerini çözmek için analitik olarak modellenir. Bilgisayar belirli bir zaman adımında yapısal yer değiştirmeyi hesapladıktan sonra bu sonucu elektronik olarak aktuatöre verir. Deneysel süreçte, hesaplanan yer değiştirmeler, gerçek bir sisteme veya uygun yapısal bileşene, daha sonra geri yükleme kuvvetini ölçen ve bilgisayara geri döndüren hidrolik aktüatörler aracılığıyla uygulanır. Bilgisayar, ölçülen verileri kullanarak bir sonraki zaman adımındaki yanıtı hesaplayabilir [128]. Dolayısıyla bu yöntemde yapı üzerinde ölçülen dengeleyici kuvvetine bağlı olarak hareket denklemi çözülmektedir. Ayrıca her adımda rijitlik matrisi birleştirilir.

Benzeşik dinamik test yöntemi, nispeten ucuz bir yöntemdir ve bu yöntem statik bir cihazla dinamik bir test yöntemi olduğundan, limit sorununu aşan büyük ölçekli yapılar için sismik tepkiyi simüle etmek için uygulanabilir. Bu yöntemde atalet kuvvetleri deneysel olarak üretilmediğinden, bu yöntem gerçek zamanlı bir ölçek testi değildir. Aksine, sayısal olarak modellenirler ve eşdeğer sözde statik yüklerle değiştirilirler. Benzeşik dinamik testin temel özelliği, mekanik özellikleri iyi tanımlanmamış yapı elemanlarının test edilmesi ve geri kalan yapı elemanlarının sayısal olarak modellenmesidir. Sayısal olarak modellenen elemanların mekanik özelliklerinin, gerçek kuvvetlere maruz kalan elemanlardan ziyade iyi tanımlanmış olduğu kabul edilir.

Yapının bir kısmı ancak test edilebilirken geri kalanı analitik olarak modellenebilir. Bu, ihtiyaç duyulan ekipmanı basitleştirmesi ve yük adımları arasında test yapısının denetlenmesine izin vermesi açısından avantajlıdır. Bununla birlikte, önemli bir dezavantaj, test numunesindeki herhangi bir zamana bağlı davranışın dahil edilmemesidir. Yöntem, yer değiştirmelerin bilgisayarlarla belirlenmesi için hareket denkleminin çözümünden dolayı testi yapmak için çok zaman harcamakta zorluk çekmektedir. Bir deprem simülasyonu

saatler sürebileceğinden, deneyin sonuçları her zaman hassas değildir. Bu teknik, sönümleme özelliklerinin uygun şekilde atanmasına dayanır. Sistemin elastik özelliklerine dayalı sabit bir sönümleme matrisi kullanmak öngörülemeyen sonuçlara neden olabilir [129]. Kumar ve ark. [130], benzeşik dinamik testler için ölçek faktörlerini açıklığa kavuşturmak ve olası benzerlik ilişkilerini sınıflandırmak için pilot testler kullandı. Bu sınıflandırma, mevcut ekipmanı kullanarak benzeşik dinamik testler için en uygun prosedürü ve benzerlik ilişkilerini seçmeye yardımcı olur.

Tan ve Wu [131], tek katlı on bölmeli kapalı bir yığma yapının sismik davranışını temel benzeşik dinamik testleri kullanarak araştırdı. Test edilen tipteki prototiplerin tatmin edici sismik performans sergiledikleri sonucuna vardılar. An vd. [132], bağ kolonlu ve hatıl kirişli kapalı duvarın deforme olabilirliğini ve nihai taşıma kapasitesini tahmin etmek için benzeşik dinamik testler gerçekleştirdi. Bu testler, kolon ve hatıl kiriş sisteminin, bir yığma yapının sismik performansını artırmak için etkili bir sismik gereklilik olduğunu doğrulamaktadır. Sonra An vd. [133], yatay yapay deprem hareketi ve kuvvetli hareket kaydı altında histeretik davranışı ve deformasyonu değerlendirmek için benzeşik dinamik testleri kullanarak bir çalışma yürütmüştür.

### **1.9.3. Sarsma Masası Testi**

Sarsma masası ilk olarak 1940'lı yıllarda yapılar üzerindeki sismik yükleri simüle etmek için kullanılmış ve 1960'lı yıllardan itibaren kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu teknikle yapının dinamik davranışı izlenebilmekte, ölçülebilmekte ve sonuçlar gerçekte çok iyi örtüşmektedir. Tasarlanan yapı modeli, sarsma masası boyutuna ve taşıma kapasitesine göre rijit bir platform üzerine inşa edilmiştir. Daha sonra yapı boyunca doğru atalet kuvvetleri üretilir ve sistemin kuvvet, hız, yer değiştirme ve frekans kapasiteleri dahilinde dinamik hareketin tepkisi ölçülebilir. Dinamik hareket, masanın serbestlik derecesine göre bir bilgisayar tarafından üretilir ve ardından sarsma masasının aktüatörlerine uygulanır. Masa sisteminin ana elemanları hidrolik aktüatörler ve bir veya birden fazla eksen boyunca sallanabilen platformdur.

Sarsma masası deneyleri, yarı statik teste göre daha fazla avantaja sahiptir, örneğin binadaki kuvvetler ve göreceli yer değiştirmeler, yapının dinamik tepkisi tarafından üretilir. Yapıların, yarı statik testlerde olduğu gibi eşdeğer bir yığın kütle olarak modellenmesi gerekmez. Sarsma masası deneyleri, yapıların farklı şiddetteki depremler altındaki doğrusal

olmayan dinamik davranışını anlamak ve elastik olmayan dinamik davranış analizi yoluyla deprem davranış öngörüsünün güvenilirliğini doğrulamak için kullanışlıdır.

Literatürdeki bazı araştırmacılar, deprem hareketi altında yapının dinamik davranışını ve hasar şeklini yeniden oluşturmak için sarsma masası testini kullanarak bir çalışma yürüttüler [134;135; 136; 137; 138; 139; 140; 141;142,143,144; 145,146, 80). Sarsma masası deney yönteminin etkinliğinin geliştirilmesine ve doğrulanmasına katkıda bulunan çok sayıda araştırma vardır. Candeias ve ark. [148], zayıf noktaları belirlemek için yığma perde duvarları ve ahşap çerçeveli zeminleri olan 4 katlı donatısız yığma binaların 1:3 küçültülmüş ölçekli modellerinde LNEC 3D sarsma masasında testler gerçekleştirdi.

Krstevska vd. [149], büyük ölçekli Camii modelinin sarsma masası deneyini gerçekleştirmiştir. Kireç harcı içinde taş ve tuğladan oluşan prototip yapıyla aynı malzemeleri kullanarak 1:6 uzunluk ölçeğinde tasarlanmış ve inşa edilmiş bir model kullandılar. Güçlendirme için tersine çevrilebilir bir teknoloji uyguladıktan sonra anıtın sismik stabilitesini değerlendirdiler. Elde edilen sonuçlar, önerilen güçlendirme tekniğinin etkinliği hakkında değerli bilgiler verdi. Liu vd. [150], duvarlar ve kirişler arasındaki farklı bağlantılarla düzlem dışı davranışları araştırmak için yatay deprem yüklerine maruz kalan iki katlı modelin 1:3 ölçekli duvarları ile sarsma masası deneylerini gerçekleştirmiştir. Test sonuçları, duvarlar ve kirişler arasında kullanılan bağlantı yöntemlerinin, dolgu duvarların düzlem dışı stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Nakagawa vd. [151], yığma yapıların sismik performansını analiz etmek ve simüle etmek için bir sarsma masası deneyi yapmıştır. Mendes vd. [80], mevcut bir yığma binanın sismik performansını değerlendirmek ve bir güçlendirme tekniğinin etkinliğini doğrulamak için sarsma masası deneyleri gerçekleştirmiştir.

### **1.10. Yığma Yapıların Güçlendirilmesi**

Sismik güvenlik değerlendirmesi ve yığma yapıların güçlendirilmesi tüm dünyada önemli bir durumdadır. Bugün Avrupa'da, özellikle Türkiye'de, yığma yapıların güçlendirilmesine yönelik ihtiyaç önemli ölçüde artmaktadır.

Kullanım değişikliği nedeniyle yapıya artan yük, kalitesiz bağlantıya sahip yapısal eleman, yapısal elemanlar üzerindeki gerçek yükün tasarım yükünden fazla olması, stabilite sorunları olan yük taşıyıcı yapılar orijinal olarak tasarlandığı ve inşa edildiği şekliyle elemanın güçlendirilmesi gerekir. Çeşitli kanunlar, yeni yığma yapıların tasarımı için

ayrıntılı yönetmelikler sağlarken, mevcut yığma yapı elemanlarını güçlendirmek için çok az yönetmelik mevcuttur.

Son yıllarda, kompozitler gibi yenilikçi malzemelerin kullanımı, düşük ağırlık, uygulama basitliği, lif yönünde yüksek mukavemet, korozyon dayanımı ve her boyutta ayarlanabilirlik gibi olası avantajlarından dolayı büyük ilgi görmüştür. Güçlü lifler ve bir matrisin kombinasyonu ile karakterize edilen yüksek mukavemetli kompozit malzemeler olan Lifli Polimerlerin (LP) kullanımı, hem yeni hem de tarihi yığma binaların yapısal onarımı alanında artmaktadır.

Lifli polimerler (LP), epoksi ve yüksek mukavemetli liflerden oluşan kompozit malzemelerdir. LP malzemeler, cam, karbon veya aramidden yapılmış liflerle takviye edilmiş bir polimer matrisinden yapılmış kompozit bir malzemedir. Son yıllarda, LP'nin yapısal uygulamaları, yüksek gerilme mukavemeti ve çok yönlülüğü nedeniyle önemli ölçüde artmıştır. LP, yığma duvarlarının kayma ve eğilme davranışını iyileştirmek için çubuklar, şeritler, laminat (levha) ve ince kumaş gibi farklı şekillerde kullanılabilir. Karbon LP ve cam LP, duvar güçlendirme alanında harici yapıştırma ve yüzeye yakın montaj tekniklerinde en yaygın kullanılan tiplerdir. LP, donatısız yığma yapılarında yapı elemanının dış yüzeyine uygulandığında yüksek mekanik direnç, çekme dayanımı ve esneklik elde etmek için eğilme, kesme veya kuşatma için ek çelik donatı görevi görür. Duvar, kubbe veya minarenin kesit boyutlarının artmaması ve kubbe ve minarenin kütlelerinin artmaması yapı üzerindeki sismik etkinin değişmeden kaldığı anlamına gelir. Bu şekilde, LP'lerle güçlendirilmiş yığma yapılar, önemli eğilme gerilmelerine karşı koyabilir ve genellikle büyük gerinimlerde göçmeye karşı lineer elastik davranabilir.

Güçlendirmenin amacına ve mevcut duvarların özelliklerine göre en etkili ve tutarlı teknik belirlenmelidir. Bu nedenle, yığma yapıların yapısal davranışını iyileştirmek için bir güçlendirme tekniği geliştirmeden önce kapsamlı bir değerlendirme yapılmalıdır. Bu değerlendirme, görsel incelemeleri, duvar birimlerinin mekanik özelliklerine ilişkin araştırmaları ve tekniğin tutarlılığını içerebilir. Bazı güçlendirme yöntemleri aşağıda verilmiştir.

Yığma yapıları güçlendirme yöntemleri:

- Konsolide olmayan zeminlerde bulunan temellere yükü aktarmak ve zemin özelliklerini iyileştirmek için mikro kazık, jet grout uygulaması
- Daha iyi yük dağılımı ve iyileştirme elde etmek için hasarlı, kötü boyutlandırılmış temellerin genişletilmesi, birleştirilmesi, onarılması ve güçlendirilmesi

- Eksik parçaların yapıştırılması ve çatlakların kapatılması için mevcut boşluklara ve iç boşluklara harcın enjekte edilmesi
- Yüksek basınç gerilmelerine ve yanal deformasyona maruz kalan kısımlara, dayanımı artırmak ve sismik yüklere ek dayanım sağlamak için kendini taşıyan çelik hasır uygulaması
- Yapıda bir mikro süreklilik geliştirmek için zayıf bağlantılı elemanlar üzerindeki sınırlayıcı parçaların sabitlenmesi
- Hasarlı harç derzlerinde iyileştirme ve güçlendirme
- Hasarlı yerin benzer malzemelerle değiştirilmesi
- Sismik titreşimi emmek için temel ile yapı arasındaki sismik izolasyon cihazları
- Farklı oturmalarla sahip binalarda, farklı oturmaları kontrol etmek için kontrol kazıkları, hafriyat altı, jet grout, mikro kazık ile toprak stabilizasyonu
- Ankraj ile yük taşıyan yapıların stabilitesini arttırmak
- Yanal kuvvetlere karşı payanda uygulanması
- Çok yüksek basınç kuvvetine maruz kalan elemanlarda, zamanında kuşatmak için çelik halkaların kullanılması
- Yüğü daha büyük bir bölüme dağıtmak için yüksek gerilimli bölümlerin büyütülmesi
- Sünekliği ve dayanımı artırmak için yüksek performanslı LP gibi malzemelerin uygulanması.

### 1.11. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Tezin bu bölümünde, farklı duvar malzemeleri kullanılarak üretilmiş yığma yapı ve yığma yapı elemanlarının üzerinde gerçekleştirilen deneysel, analitik ve sayısal çalışmalara yer verilmektedir. Yığma yapılar üzerinde farklı yöntemler kullanılarak çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalara sarsma masası deneyleri ve benzeşik dinamik deneyleri örnek verebiliriz. Ayrıca, bu bölümde yığma yapıların dinamik karakteristiklerinin sayısal ve deneysel olarak (DMA yöntemi kullanılarak) belirlendiği önceki çalışmalara yer verilmiştir. Güçlendirme yöntemlerinin kullanıldığı yığma yapılar ile yapılan çalışmalara da bu bölümde yer verilmiştir.

Yapıların depreme karşı davranışlarını belirlemek için doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri olarak adlandırılan dinamik karakteristiklerin bilinmesi gerekir. Yapının kütle

ve rijitliklerine bağı olarak dinamik karakteristikler değişmektedir. Yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi pek çok analitik ve deneysel yöntem ile gerçekleşmektedir. Çevresel titreşim yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikler çalışmalarda geniş yer almıştır. Bayraktar vd. [153] çalışmalarında DMA metodu ile restorasyon öncesi ve sonrası için taş minare yapılarının dinamik karakteristikleri belirlendi. Bu amaçla Trabzon bölgesi vakıflar genel müdürlüğü tarafından restore edilen üç tarihi taş minare seçilmiştir. Hasarlı malzemelerin değiştirilmesi, derzlerin onarımı gibi birçok restorasyon çalışmaları yapılmıştır. Restorasyondan önce ve sonra elde edilen doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları birbirleriyle karşılaştırıldı. Sonuç olarak üç minarenin de dinamik özellikleri restorasyon çalışmalarına bağı olarak olumlu ve olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir.

Ercan [154] çalışmasında yapısal sistemi taş olan iki katlı tarihi yığma binanın güçlendirme öncesi ve sonrası çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler analitik analiz sonucu elde edilen değerler ile karşılaştırma yapılmış ve sonlu eleman modelinde iyileştirme yapılmıştır. Güncellenen son modeller güçlendirmeden önce ve sonrası için yapının deprem davranışının değerlendirmesini mümkün kılar. Ayrıca, güncellenen sonlu eleman modeli güçlendirme öncesi ve sonrası için Türkiye’de kaydedilmiş bir deprem verisi kullanılarak analiz edilmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası için yapının gerilme ve yer değiştirmelerini içeren yapının dinamik tepkileri karşılaştırılarak güçlendirme etkisi incelenmiştir. Sonuçlar güçlendirilmiş yapı rijitliğinin başlangıç durumuna göre üç kat arttığını göstermektedir.

Nohutcu vd. [155], Manisa’da bulunan Hafsa Sultan tarihi caminde model kalibrasyonu gerçekleştirmiştir. Caminin sonlu eleman modeli yapının çevresel titreşim testlerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla iyileştirme yapılarak kalibrasyonu sağlanmıştır. Mod şekillerindeki uyumluluk kabul edilir olmasına karşın doğal frekanslarda farklılıklar meydana geldi. Farklılıklar duvarlardaki sınır koşulları, malzeme özellikleri, duvardaki çatlaklardan ve bazı malzemelerin korozyona uğramasından kaynaklandığı söylenebilir. Malzemelerin mekanik özellikleri literatürden elde edilmiştir. Frekanslar arasında %10’luk bir farklılık bulunmaktadır. Bu farklılık sonlu eleman modelin elastisite modülü adım adım değiştirilerek model güncelleştirilmesi yapıldı. Bu çalışmalardan da anlaşıldığı gibi yığma duvarlarda malzeme özelliklerini belirleyen geleneksel yöntemlerin gerçekçi olmadığı sonlu eleman modelleri için DMA uygulanması gerekmektedir.

Reuland vd. [156], 5 katlı yığma bir yapıda güçlendirmelerin etkinliğini deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Yığma duvar ve ahşap döşemeli olan yapıda beton döşeme ve beton duvar kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Bu güçlendirme sismik kapasiteyi arttırmak için uygulanmıştır. Analitik olarak dinamik karakteristikleri belirlemede Timoshenko kiriş teoremi kullanılmıştır. Binanın modellenmesinde doğrusal elastik dinamik tepkiyi karakterize eden basit bir sürekli Timoshenko konsol kirişi kullanılmıştır. Deneysel yöntemde ise çevresel titreşim yöntemi ile dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Karbassi vd. [157] çalışmasında İsviçre’de bulunan 6 katlı taş yığma yapıyı güçlendirme öncesi, sırasında ve sonrası toplamda 4 adet ortam titreşim testleri yapmıştır. Güçlendirme çalışmaları temel olarak duvarların altına betonarme temel, yatay çelik kirişler ile duvarların bağlanması ve her katta bir betonarme döşemelerinden oluşmaktadır. Çalışmada güçlendirme öncesi ve sonrası için sonlu eleman modeli oluşturulup doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Günaydın [57] doktora tez çalışmasında onarılmış ve LP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş betonarme binaların dinamik davranışlarının deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmesini ayrıntılı olarak ele almıştır. Laboratuvar ortamında ölçekli yapılar inşa edilmiştir. Ölçekli betonarme binaların dinamik davranışları hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Binaların sonlu eleman modelleri için hasarsız, hasarlı ve güçlendirilmiş durumları için iyileştirme yapılmıştır. İyileştirilmiş sonuçlara göre doğrusal olmayan dinamik davranışları belirlenmiştir.

Yığma duvarların onarım ve güçlendirme yöntemleri oldukça fazladır. Yığma yapıların çelik çubuk ve levhalarla sarılarak bütünlük sağlanması, çelik hasır kullanılması, ankraj takviyesi, gergi takviyesi, lif takviyeli polimer çubuk, şerit ve kumaş ile güçlendirme, temel güçlendirilmesi ve çatlaklara uygun harç veya kimyasalların enjekte edilmesi gibi birçok yöntem uygulanmaktadır. Lif takviyeli polimerler (LP) yapının süneklik ihtiyacını, kesme, eğilme ve gerekli olan çekme kapasitelerini karşılamada etkili olduğu çoğu araştırmalarda kanıtlanmıştır. LP ile güçlendirme en son ve yaygın tekniklerden biridir. LP kompozit malzemelerin popülerliği etkinliği, hafifliği, dayanımı, uygulama kolaylığı ve farklı formlarda üretiliyor olmasıdır. Ayrıca en önemli özelliği korozyona uğramamasıdır. Önemli araştırmalar yığma yapıların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarını güçlendirmek için LP gibi modern malzemeler kullanmaya ve geliştirmeye odaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar LP kompozit malzemenin yapının veya yapı elemanlarının taşıma, kayma, eğilme

ve süneklikleri üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır [158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167]. Ayrıca birçok çalışma LP ile güçlendirilmiş yığma yapı ve elemanlarının düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarını incelemektedir. 2010 yılında Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) “Yığma Sisteminin Güçlendirilmesi İçin Dıştan Bağlanmış LP takviyeli Sistemlerin Tasarım ve Yapım Kılavuzu” başlıklı bir 440.7R-10 standardı yayımlandı. Myers [159] çalışmasında bu standardı ele almıştır ve örneklerle uygulamıştır. Petersen vd. [160], deneysel ve numerik bir program kullanılarak karbon takviyeli LP malzeme ile güçlendirilmiş tuğla malzemeli yığma duvarın düzlem içi kayma davranışını incelemiştir. Mikro model yaklaşımı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Silva vd. [161] çalışması beton blok ve harman tuğlası ile inşa edilmiş duvarların cam takviyeli LP şerit malzeme ile düzlemsel kesme kapasitesi üzerindeki etkinliğini ele alan deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiş analitik model önerilmiştir. LP malzeme duvarlara dikey ve yatay yönde uygulanmıştır. Ayrıca duvarın tek yüzüne ve iki yüzüne de uygulama yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen modelde bağımsız değişkenlerin belirsizliği ve değişkenliği göz önüne alınarak Monte Carlo simülasyonu (MCS) kullanılmıştır. Cam takviyeli LP duvarların kayma kapasitesi üzerinde etkili bir güçlendirme tekniğidir. Hasar biçimleri doğrudan güçlendirme şekli ile ilgilidir. Çalışmada MCS ile önerilen analitik model, hasar modunu ve düzlem içi kayma kapasitelerini %95 güven aralığında tahmin etmiştir. Yatay uygulanan LP ile duvarın kesme sürtünme kapasitesi üzerinde etkinliği kanıtlanmış fakat bu artış çekme ve basınç kapasitesi ile sınırlıdır. Dikey güçlendirme uygulaması ile kesme kaymasını ve sürtünmesini iyileştirmedeki etkinliği basınç ve çekme kapasitesi ile sınırlıdır. Yatay LP uygulaması dikey LP uygulamasından daha etkilidir. Ayrıca güçlendirmenin iki yüze uygulanması kapasiteleri 2 katından daha fazla arttırmaktadır. Yu vd. [168] çalışmasında beton yığma birimleri ile harman tuğlası üzerinde LP malzeme ile güçlendirme yaparak diyagonal basınç deneyi ile kayma kapasiteleri incelenmiştir. Cam takviyeli LP malzemenin kayma kapasitelerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. Daha yüksek süneklik indeksine sahip yığma duvar yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalma olmadan elastik deformasyona maruz kalır. Kırılmadaki enerji miktarı emilimi kayma gerilme şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan olarak tanımlanır. Bazı araştırmalarda sismik hasarı azaltmak için beton bloklu yığma duvarlarının güçlendirilmesinde LP kompozit malzemelerin etkinliğini öngörmek için analitik bir model geliştirilmiştir [169, 162]. LP malzeme yüzeye monte edilmiş LP çubuklar şeklinde kullanılmıştır. Diyagonal deney ile 12 adet beton bloklu yığma duvar test edilmiştir. Farklı güçlendirme metotları kullanılan

çalışmada duvarların kesme kapasitesini tahmin eden analitik model ile deneysel sonuçlar arasında uyum olduğu gözlenmiştir. Kesme kapasitesindeki LP etkisi %80 kadardır. Bu çalışmada da deneysel sonuçlar incelendiğinde kayma takviyesi sadece çapraz çatlak oluşmasından sonra aktif olduğunu göstermiştir. ACI gibi analitik modellerde, duvarın kesme dayanımının duvar ve LP takviyesinin katkısının toplamı olarak varsaymaktadır. Nanni vd. [164], LP plaka ve çubuklar ile güçlendirilmiş yığma duvarı eğilme ve kayma kapasiteleri açısından inceleyerek tasarım önerileri sunmaktadır. Bu çalışmada kullanım dışı kalan hastane binası duvarlarında LP plakalar ile ve duvarlarında çatlaklar olan eğitim tesisinin duvarlarının bütünlüğünü LP çubuklar ile eski haline getirilmesi amaçlanmaktadır.

“FRP Structural Repointing”, yığma duvar endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, derzlerdeki eksiklikleri gidermekten oluşan güçlendirme tekniğidir. Bütünlüğü geri kazanmayı ve /veya duvar kapasitelerini arttırmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde duvardaki derzlere uygun yöntemlerle LP çubuklarının bağlanması ile güçlendirme yapılmaktadır. Bu tekniğin başka avantajları da vardır; yüzey hazırlığı azalır ve estetik korunur [167, 166].

LP malzemelerin mukavemet ve deformasyon açısından etkili olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Reçinelerin yüksek sıcaklıkta özelliklerini yitirmesi gibi nedenlerle reçine ve lifler bazı dezavantajlar getirmektedir. Bu dezavantajdan dolayı yeni güçlendirme yöntemi ve malzemelerine yönelim olmuştur. Triantafillou vd. [170], tekstil takviyeli harçların (TRM) betonarme elemanların kayma dayanımını arttırma aracı olarak kullanımını incelemiştir. TRM, LP malzeme olarak ele alınabilir. Bu çalışma TRM ile sarılan betonarme elemanın kayma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Tumialan vd [171], düzlem dışı yüklere maruz kalan cam takviyeli LP ve aramid takviyeli LP malzeme kullanılarak beton blok ve harman tuğlası ile inşa edilmiş duvarları test etmişlerdir. LP ile güçlendirilmiş duvarların düzlem dışı eğilme kapasitesi önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Tekstil takviyeli çimento esaslı matris (FRCM), yapıya harici olarak uygulanan LP sistemlerini tamamlayan güçlendirme tekniğidir. LP malzemelerin dezavantajı göz önüne alındığında tekstil takviyeli çimento esaslı matris ile güçlendirme uygulanmaktadır. FRCM, yığma duvarlara çimento esaslı harç ile uygulanan bir veya daha fazla kuru lifli kumaş katmanından oluşan bir kompozittir. Babaeidarabad ve Nanni [172], düzgün dağılmış yanal basınca maruz kalmış beton blok ve harman tuğlalı duvarların FRCM ile güçlendirilmesini araştırmıştır. Diğer LP kullanılarak yapılan güçlendirme teknikleri ile karşılaştırılmıştır. İki temel hasar

gözlemlenmiştir: FRCM kayması ile duvarın çatlaması ve mesnetlerde olan kesme kırılması. Süneklik düşük FRCM katları için daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Tarihi yığma binaların onarımı ve güçlendirilmesi uzmanlık gerektiren ciddi bir iştir. Bu yapılara yapılan gereksiz ve yanlış güçlendirme ve onarım yöntemleri geri dönülmez hatalara yol açmaktadır. Esnek döşemeli tarihi yığma binaların güçlendirilmesi ve bir yapı üzerinde onarım ve güçlendirme çalışmaları Sesigür vd. [173] tarafından belirtilmiştir. İzmit Sultan Abdulaziz Av köşkü binası 17 Ağustos 1999 depreminde hasar görmüş ve onarım/güçlendirme çalışmaları geçirmiştir. Bu binada ahşap kirişli döşeme sisteminin zararlı düzeyde titreşim özelliğinden dolayı yetersiz bir durumda olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı duvarlar kat yüksekliklerinden daha yüksek bir boya sahipmiş gibi hareket edeceklerinden yatay yüklerde deplasmanlar sınır değerleri aşmaktadır. Çatı döşemesi kotunda tüm duvarlara genişliği duvar genişliğinde betonarme hatıllar ve bu hatıllar arasında X şekilli çelik çaprazlar ile güçlendirme yapılmıştır.

Altın vd. [174], düşey delikli tuğla kullanılarak inşa edilmiş tek katlı yığma binanın sarsma masasında hasara uğratarak 4 farklı türde güçlendirme tekniği ile çelik şeritlerle güçlendirilmiştir. Yapı planı doğu-batı doğrultusunda 3550 mm ve kuzey-güney doğrultusunda ise 4060 mm boyutlarında olup yüksekliği 2700 mm'dir. Doğu duvarındaki pencere 850x1100 mm boyutlarında ve batı duvarında bulunan kapı ise 850x1820 mm boyutlarındadır. %60 boşluk oranına sahip duvar kalınlığı 200 mm'dir. Deney elemanı 300x200 mm'lik bir hatılın üzerine inşa edilmiştir. Tavan ise 100 mm kalınlıktaki betonarme bir döşeme ile diyafram etkisi sağlamıştır. Güçlendirme tipleri arasında diyagonal çelik şeritler ile düşey şeritlerin beraber kullanılması en etkili yöntemdir. Bununla birlikte yapıda devrilme önlenmiş ve kesme çatlaklarının gelişimi engellenmiştir.

Laboratuvar imkanları ve sarsma masası kapasitesi ve boyutlarından dolayı tam ölçekli laboratuvar modelleri üzerinde çalışmak zorlaşmaktadır. Bu sebeplerden dolayı ölçekli laboratuvar modelleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ölçekli yığma yapılar üzerinde de birçok çalışma yapılmıştır. Saleem vd. [42] çalışmalarında farklı oranlarda LP malzeme ile güçlendirilmiş yapıların sismik performansını değerlendirmiştir. Bu deneysel çalışmada ¼ ölçekli tek katlı tuğla duvar modellerinde 5 adet sarsma masası testi yapılmıştır. 5 binadan 1 tanesi güçlendirilmemiş yığma yapı iken diğer 4 tanesi ise farklı oranlarda LP kullanılarak güçlendirilmiş tuğla duvarlı yığma yapıdır. Şerit şeklinde kullanılan LP, duvarların iç ve dış yüzeylerine uygulanarak ve şerit aralıkları değiştirilerek kullanılmıştır. LP malzeme ile güçlendirme oranları 0.0040, 0.0024, 0.0012 ve 0.0006 olarak uygulanmıştır. Her yapı

modeli giderek artan yer hareketlerine maruz kaldı. Ayrıca şerit aralıklarına karar vermek için bir dizi diyagonal basınç deneyi de uygulanmıştır. Taban kesme, yer değiştirme ve hasar şekli gibi yapısal tepkiler incelenmiştir. Ayrıca tuğla birimleri de gerçek yapısal tepki elde edilmesi için ölçeklendirilmiştir. Ölçekli yapı güçlendirilme işleminde cam takviyeli LP kullanılmasına karşın diyagonal basınç deneyinde karbon, aramid ve cam takviyeli LP güçlendirmeleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışma önceki LP malzeme ile güçlendirilen yapıların yapısal davranışını doğrulamakla kalmadı ayrıca yoğun yer hareketine maruz kalan yığma yapıların yapısal verimliliğini arttırmak için gerekli olan LP malzeme oranı hakkında bilgi vermektedir. Deney sonuçlarına göre yığma yapılar rijit bir davranış göstermesinden dolayı ufak bir yer hareketi bile ağır hasarlara sebep olabilir. LP güçlendirme oranı 0.0040 olan panel duvar için diyagonal basınç deneyine göre 3 kata kadar dayanımı arttırdığı göstermektedir. LP güçlendirme oranı 0.0024 olan yapının davranışı LP güçlendirme oranı 0.0040 olan modelin davranışına benzerdir. LP oranı 0.0024 olan modeli tüm yer hareketlerinde ayakta kalmasına rağmen yüksek deplasman seviyeleri göstermiştir. Sadece dış duvarlara yapılan uygulama ile oluşturulan LP oranı 0.0012 olan modelin düşük rijitliğe sahip olmasına karşın tatmin edici sonuçlar gözlemlenmiştir. LP oranı 0.0006 olan modelde şerit genişlikleri 20 mm ye düşürülmüştür. LP oranı 0.0006 olan modelin yeterli bir seviyede olmadığı gözlemlenen hasar ve çatlaklar ile belirlenmiştir. LP oranı 0.0006 olan modelin ve kontrol yığma modelinde başlangıçta düzlemsel çatlaklar gözlemlendi daha sonra hasarlar arttıkça düzlem dışı çatlak belirtileri gözlemlendi. Optimum LP miktarını kesin olarak belirlemek yapı geometrisine, çatı ağırlığına, duvar malzemesine bağlı olarak değişebilir.

LP kompozit malzemeler dışında birçok güçlendirme ve onarım teknikleri mevcuttur. Benedetti vd. [5] çalışmalarında 2 katlı  $\frac{1}{2}$  ölçekli tuğla ve taş duvar malzemelerinden inşa edilmiş yığma yapı modellerini ele alarak deneysel çalışma yapmışlardır. 8 adet model yığma yapı İtalya (ISMES) ve 6 adet model yığma yapı Yunanistan (LEE) tesislerinde olmak üzere 14 adet model yığma yapı inşa edilmiştir. Yapılar inşa edilirken herhangi mühendislik hizmeti ve yönetmelik kullanılmamıştır. Yapılar sarsma masası deneyi ile hasar gördükten sonra onarılıp ve güçlendirildikten sonra tekrar teste tabi tutuldu. Çeşitli güçlendirme teknikleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında çeşitli güçlendirme tekniklerinin verimliliği ve hasarın artmasıyla dinamik özelliklerin değişimi incelenmiştir. Büyük çatlaklar çimento karışımı, alçıtaşı ile lokal kapatma şeklinde tamir edildi. Döşeme ve duvarlar arasındaki bağlantıyı geliştirmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır:

- Bina etrafına her katta çelik şerit ile güçlendirme
- Çelik hasır takviye ile güçlendirme
- Yatay öngerme çeliği ile güçlendirme
- Düşey ve yatay çelik kirişler

Testler sırasında 23 Kasım 1980'de Irpinia depreminde Calitri'de kaydedilen veriler kullanılmıştır. Model parametreler incelenmiştir. Yanal direncin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Yatay bağların yığma binaların kapasitelerini arttırdığı kanıtlanmıştır. Yatay bağlar duvarların ayrılmasından dolayı çökmesini engellemektedir. En iyi sonuçların duvarlarda yatay bağlar nedeniyle uygun bir dağılımla elde edildiği görülmüştür.

Li-hua vd. [175] çalışmalarında  $\frac{1}{4}$  ölçekli 2 katlı ve 2 odalı olan yığma yapıyı bazalt takviyeli LP malzeme ve karbon LP malzeme ile güçlendirerek sismik tepkileri incelemiştir. Üç farklı deprem verileri kullanılarak sarsma masası testleri incelenmiştir. İki modelde benzer hasar göstermesine rağmen bazalt LP malzeme ile güçlendirilen model daha ciddi hasar gördüğü gözlenmiştir. Bazalt LP malzeme ile güçlendirilen yapı, karbon LP malzeme ile güçlendirilen yapıya göre daha büyük hızlanma tepkisi vermiştir. Ayrıca deprem kayıtlarının değişmesine daha hassas olduğu gözlemlenmiştir. LP plakalar üzerinde ölçülen gerilimler her iki malzemenin de duvar yapılarını takviye edecek benzer bir mekanizmaya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ölçülen çekme dayanımı ve elastisite modülü karbon LP için sırasıyla 4363 MPa ve 241 GPa iken, bazalt LP için 1878 MPa ve 92 GPa'dır. Gerinim ölçerler, ivme ölçer ve deplasman sensörleri kullanılmıştır. Sismik uygulamalardan sonra, her iki modelde de birtakım çatlaklar görülmektedir. Tuğla, beton ve LP plakalarda hiçbir çatlak gözlemlenmemiştir. LP malzeme ve yığma birimler arası bağlantıda kopma olmadığı görülmüştür. Kesme kırılmaları LP plakalarının yakınılarında meydana gelmiştir.

Urban ve Stempnievski [176], tek eksenli cam lifli şerit ve farklı tekstiller ile çimento bazlı harç ile güçlendirilmiş yığma yapı performansını değerlendirmiştir. Bu çalışmada sarsma masası deneyleri kullanılmıştır. Doğal taş ve harman tuğlası ile tam boyutlu yapılar inşa edilmiştir. Sathiparan ve Meguro [177], kemerli ahşap çatı ve polypropylene (PP-band) ile güçlendirilmiş  $\frac{1}{4}$  ölçekli kerpiç tuğla ile inşa edilen bina modellerini sarsma masası deneyleri ile incelemiştir. Bu çalışma geliştirmekte olan ülkelerdeki düşük dayanıklı yapıların güçlendirilmesi için uygun ve ekonomik bir uygulama önermektedir. Dar vd. [40] çalışmaları ile mesh bağlantısını ve uygulama süresini azaltarak daha ekonomik bir polypropylene uygulaması gerçekleştirdi.

Paquette vd. [178], mevcut yığma yapıların güçlendirilmesinde LP malzemeleri binaya şeritler halinde uygulayarak deprem davranışının iyileştirildiği vurgulanmıştır. Yığma duvarların yanal direncinin yetersiz olacağı durumlar göz önüne alınmıştır. Bu açıdan düzlemsel yanal yüke karşı dayanma kapasitelerini arttırmak için hasarlı yığma yapıya cam LP şeritler uygulandı. Bu çalışma esnek ahşap zemin diyaframına sahip tam ölçekli tek katlı tuğla duvar yapı örneğini incelemektedir. Önceki bir testte hasar gören duvarlar cam LP şeritleri ile onarılmıştır. Sonuçlar güçlendirme modelinin yapının düzlem içi sismik tepkisini arttırmada etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu makalede ayrıca ahşap diyafram tepkisi ve duvarlarla etkileşimi de incelenmiştir.

Ersubaşı [54] çalışmasında yığma yapının köşe noktaları ile kapı ve pencere boşlukları üzerinden sarılmış karbon LP şeritler ile güçlendirilmiş yığma yapı modeli güçlendirilmemiş yapıya göre 2.5 kat daha fazla yatay kuvvete dayandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada tek katlı 1/10 ölçekli modeller üzerinde yürütülen deneysel çalışma incelenmiştir. Modellerden biri referans model iken diğer 8 model farklı güçlendirmelere maruz kalmış yapılardır. Dinamik yükleme için basitleştirilmiş sarsma masası imal edilmiştir. Deneysel çalışmada uygulanan güçlendirme yöntemleri:

- Karbon LP ile kapı ve pencere boşluklarının üzerine ve köşelerine sarılma
- Karbon LP ile kapı ve pencere boşluklarının altına ve köşelerine sarılma
- Karbon LP ile sadece bina köşelerine sarılma
- Çelik saç levha uygulaması
- Hasır çelik uygulaması sadece bina köşelerine
- Bina yüksekliği boyunca köşelerine konulan ahşap hatılların tellerle çatı altı ve temel üzerinden gerdirilmesi sonucu art germe uygulaması
- Kısa ahşaplarla çatı altı ve temel üzerine art germe uygulaması
- Kısa ahşaplarla çatı altına art germe uygulaması
- Bina köşelerinde yapım aşamasında payanda yapılarak güçlendirilmesi
- Duvar içine ve dışına belirli aralıklarla konulan düşey tellerin üç derzde bir çiroz görevi gören yatay tellerle bağlanması

Karbon LP ile bina köşeleri ile kapı ve pencere boşluklarının üstüne ve altına uygulanması ile güçlendirilen yapı referans yapıya göre 2.5 kat daha fazla yatay kuvvete dayanmıştır. Bu çalışmada uygulanan güçlendirme teknikleri yığma yapıların dayanımlarını en az %50 artmasını sağlamıştır.

Araştırmacılar farklı duvar malzemeleri kullanarak inşa edilmiş yığma yapıların dinamik davranışlarını sarsma masası deneyini kullanarak elde etmişlerdir [179, 180]. Korkmaz vd. [181], çalışmalarında yıllardır kullanılan tuğla ve taş malzemelerden yapılan yığma yapıların yanında son yıllarda yaygınlaşan pomza ve gaz beton malzemelerden yapılan yığma yapıların dinamik davranışları oluşturulan sonlu eleman modelleri ile ele alınmıştır. Analizlerde zaman tanım alanı uygulanarak yirmi farklı deprem verileri kullanılmıştır. Gerilme ve yer değiştirme değerleri karşılaştırılarak yapının deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Binaların ağırlıkları hafif yapı malzemeleri kullanılarak %70 e kadar azalmak mümkündür. Sonuçlara göre elastisite modülü arttıkça yer değiştirme değeri küçülmektedir.

Gaz beton duvarların davranışını ve mekanik özelliklerini ele alan Alakoç ve ekibi [182] küp, örgü ve diyagonal basınç deneyleri üzerinde çalışma yapmıştır. Duvarların çekme ve kesme dayanımı hesaplamasında analitik bir yaklaşım kullanılmıştır.

Prota vd. [183] ve Parisi vd. [184], tuf duvar panelleri üzerine kapsamlı bir deneysel çalışma yapmışlardır. Düzlemsel diyagonal basınç altında farklı FRCM metotları ile güçlendirilen duvarların dayanım ve süneklik üzerinde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Papanicolau vd. [185] ve Papanicolau vd. [186], karbon-FRCM ile fırınlanmış harman tuğlası ve taş blok duvarların güçlendirilmesini düzlem içi yanal ve düzlem dışı çevrimsel yükleme ile deneysel çalışma yapmıştır. Test sonuçları yine FRCM'nin dayanım ve süneklik açısından önemli bir kazanç sağladığını gösterdi.

Araştırmacılar farklı yığma yapı elemanları üzerinde de LP malzemelerinin etkinliğini incelemiştir. Enginsal [187], LP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş beton bloklarla imal edilmiş yığma kirişin eğilme davranışını deneysel ve analitik olarak çalışmıştır. 4 nokta eğme test düzeneği altında test edilmek üzere 4.0 ve 2.4 m açıklıklı 9 adet numune üretildi. Kirişler artan monoton yüklerle hasara oluşana kadar deney devam etti. Kirişler çelik çubuklar, karbon ve cam takviyeli LP kompozit malzeme ile güçlendirilmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlarda cam LP kompozit çubuk ile karbon LP kompozit plakaların etkinliği gösterilmiştir.

Erol ve Karadoğan [188] çalışmalarında tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin karbon takviyeli LP kompozit malzeme ile güçlendirilmesini ele almışlardır. Güçlendirmenin yanal dayanım ve rijitlik üzerine etkilerini deneysel ve analitik analizlerle incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar diyagonal yükleme testi ile LP malzeme ile güçlendirilen panel duvarın kesme dayanımı, rijitlik ve kırılma modları incelenmiş ve ½

ölçekli bir katlı ve bir açıklıklı betonarme çerçeve düzlem içi tekrarlı yükler altında test edilmiştir. İki numune dolgu çerçeve olması ve olmaması olarak referans numunesi olarak alınmıştır. Üç numune ise farklı uygulama ile karbon LP kompozit malzeme ile güçlendirilerek deplasman, kat ötelenme, enerji yutma kapasiteleri her bir test için incelenmiştir. Daha sonra analitik çalışmalarla karşılaştırılma yapılmıştır.

Yapıların dinamik davranışlarının analitik ve deneysel modal analiz yöntemiyle belirlendiği çalışmalar da oldukça fazladır. Günday [189] çalışmasında model çelik bir yapı üzerinde sarsma masası kullanılarak yapının dinamik davranışları elde edilmiştir. Model çelik yapının kolonları daha sonra cam takviyeli LP kompozit malzeme ile güçlendirilerek tekrar sarsma masası deneyine tabi tutuldu. ÇTY kapsamında deneysel modal analiz yapılmıştır. Güçlendirilmemiş model çelik yapı ile LP kompozit malzeme ile güçlendirilmiş yapı arasındaki frekans ortalama farkları %33.916 olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları DMA yönteminin güçlendirilmiş yapıların rijitliğini ve periyodunu değerlendirmek için kullanabileceğini göstermiştir.

Altunışık vd. [190] çalışmalarında LP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş ve ortam titreşimine dayalı otomatik model güncelleme prosedürünü kullanarak betonarme çerçevelerin dinamik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemiştir. Dört farklı yapısal durum üzerinde ayrıntılı inceleme yapılmıştır. Hasar görmemiş, hasarlı, enjeksiyonlarla onarılmış ve LP kompozitlerle güçlendirilmiş durumlarda çalışma yapılmıştır. Geliştirilmiş frekans ortamında ayrıştırma (GFOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak deneysel dinamik karakteristikleri çıkarmak için ortam titreşimi testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçları doğrulamak için sonlu eleman analizleri yapılmıştır ve sayısal dinamik özellikler elde edilmiştir. Çeşitli belirsiz parametreler göz önüne alınarak otomatik model güncelleme prosedürü ile iyileştirme yapılmıştır. Güncelleme ile beraber oluşan farklar %38.38 den %4.14 ve %0.21 e düşürülmüştür.

Sonlu eleman model güncelleme, yapısal bir modeldeki belirsiz yapı parametrelerini değiştirerek deneysel ve analitik olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasındaki farkları en az indirmek için uygulanan etkili bir yöntemdir [193]. Bu yöntem manuel veya global/yerel otomatik model güncellemeleri ile uygulanabilir. Otomatik model güncelleme, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirmek için mühendislik yapılarının her türüne uygulanabilirliği nedeniyle oldukça popüler bir yöntemdir. Altunışık vd. [10] çalışmalarında tarihi yığma burç üzerinde deneysel ve analitik olarak elde edilen dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Çevresel titreşim yöntemi kullanılarak deneysel modal

analiz sonucuna gidilmiştir. Belirsiz parametreler farklarını en aza indirmek için manuel ve otomatik model iyileştirme yapılmıştır. Uygulama için Trabzon'da bulunan bir kale seçilmiştir. GFOA ve SAB teknikleri ile ÇTY den elde edilen veriler ışığında ilk üç doğal frekans 5 ile 10 Hz arasında elde edilmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırıldığında mod şekilleri arasında uyum olmasına karşın doğal frekanslar arasındaki fark %26 olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkı optimum seviyeye indirmek için elastisite modülü ve malzeme yoğunluğunu değiştirerek güncelleme yapılmıştır. Manuel güncelleme ile farklar %3'e ve otomatik güncelleme ile %0.02 ye kadar düşmüştür. Benzer şekilde Altunışık vd. [191] çalışmasında tarihi yığma yapı üzerinde ÇTY ile dinamik karakteristikleri belirlendi. ANSYS programı kullanarak sonlu eleman modeli üzerinde dinamik özellikler belirlendi. Doğrusal olmayan dinamik tepkisini belirlemek için güncellenmiş sonlu eleman modeli ile Kocaeli deprem verileri kullanılarak analiz yapılmıştır. Altunışık vd. [192], ÇTY testleri kullanılarak hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş koşullar göz önünde bulundurularak modal parametreler karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bağlamda ½ ölçekli iki açıklıklı iki katlı betonarme çerçeve model elemanlar inşa edilmiştir. Yanal kuvvetler ile kolon kiriş birleşim yerlerinde hasar gözlemlenmiştir. Karbon takviyeli LP kompozit malzeme ile güçlendirme etkinliği incelenmiştir. Mühendislik yapılarının modal parametrelerini farklı koşullarda elde etmek için ÇTY testlerinin yeterli olduğu görülmüştür. Hasarlarla belirgin şekilde dayanımı düşen yapı güçlendirme ile başlangıç durumuna ulaştığı görülmüştür.

### 1.12. Literatür Özeti ve Tezin Amacı

İstanbul ve Türkiye'nin diğer illerindeki yığma yapı stoğunun büyük bir bölümü deprem tehlikesi altındadır. Yığma yapıların birçoğunda deprem hasarı bulunmaktadır. Yakın gelecekte onları da etkileyecek büyük bir İstanbul depremi beklentisi bulunmaktadır. Yığma yapıların depreme karşı güvenliğinin ve deprem davranışlarının belirlenmesi karmaşık bir sorundur. Son yıllarda, deprem güvenlik değerlendirmelerine yönelik yığma yapılarla ilgili çeşitli araştırmalar tamamlanmıştır. Depremlerden etkilenmeye devam edeceklerinden, deprem performanslarını değerlendirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Onarım ve güçlendirmelerine ilişkin kanun ve yönetmeliklerin iyileştirilmesi ve yenilerinin oluşturulması da önemlidir.

Modelleme ile ilgili olarak, sonlu elemanlar yöntemi, statik ve dinamik yükleme koşulları altında oldukça bağlantılı davranan elemanlara dayalı en iyi bilinen metodolojidir. Ancak yığma yapılar, malzemelerin (gaz beton, tuğla, harç) heterojenliği, süreksizlikler ve yığma birim ve harcın statik ve sismik yükler altında farklı elastik plastik davranış özelliklerinden dolayı doğal bir karmaşıklığa sahiptir. Etkili ve pratik dinamik analiz yöntemleri oluşturmak için, yığma yapıları daha iyi anlamak için birçok araştırma programı yürütülmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında yığma yapılar ile ilgili güçlendirme, onarım, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi, sarsma masası deneyleri ile dinamik davranışların belirlenmesi gibi durumlar analitik ve deneysel olarak ele alınmış ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmında bütün bir yığma yapıyı değil de yığma elemanlar üzerinde çalışmalar gerçekleştirildiği için bütün bir yapıyı ilgilendiren çalışmalar yeterli sayıda değildir. Ayrıca yaygın olarak yığma birim eleman olan taş, tuğla ve harman tuğlası kullanılarak inşa edilen yığma yapıların davranışları üzerinde çalışılmış ancak, tuğladan çok sonra üretilen gaz beton ve bims blok gibi yığma birimler ile ilgili yeterli çalışmalar yapılmamıştır. Bununla birlikte bu çalışmalarda, yığma yapı üzerinde gerçek bir deprem simüle etmek için uygulanan sarsma masası deneyleri yerine laboratuvar imkanlarından kaynaklanan benzeşik dinamik testler uygulanmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalardaki bir diğer yetersiz konu ise laboratuvar ortamında üretilen yığma yapıların sarsma masası deneylerinden önce ve sonra DMA yöntemini kullanarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi.

Bu doktora çalışmasının nihai amacı, ülkemizde yapı stoğu içerisinde önemli bir yeri olan yığma yapıların gerçek deprem davranışlarının laboratuvar ortamında sarsma masası deneyleriyle incelenmesi ve hasarsız titreşim testleri ile önerilen onarım-güçlendirme tekniğinin etkinliklerinin deneysel olarak araştırılmasıdır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı duvar malzemelerinin LP kompozit güçlendirme malzemeleri ile uyumu belirlenecek ve önerilen güçlendirme metodu ile diğer metotların karşılaştırılmasının yapılması da amaçlanmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar daha sonra sayısal yazılımlarda yapılan analizler ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada belirlenen amaca ulaşabilmek için izlenmesi gereken yol ve gerçekleştirilmesi planlanan hedefler şu şekildedir:

- Üç farklı duvar malzemesi (tuğla, bims blok, gaz beton) kullanılarak 3 adet 1/2 ölçekli yığma yapı modellerinin laboratuvar ortamında oluşturulması,

- Deneysel Modal Analiz yöntemiyle çevresel titreşim ölçümlerinin gerçekleştirilmesi ve hasarsız durumlara ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi,
- Sarsma masası üzerinde deprem testlerinin yapılması, deprem davranışlarının elde edilmesi, gözlemsel hasar tespiti,
- Hasarlı durumlara ait çevresel titreşim ölçümlerinin tekrarlanması, dinamik karakteristiklerin elde edilmesi, hasarlı ve hasarsız sonuçların karşılaştırılması,
- Tuğla bina yapı modelinin onarım/güçlendirilmesi ve DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin tekrar belirlenmesi, elde edilen sonuçların karşılaştırılarak onarım/güçlendirme etkinliğinin ortaya konulması,
- Güçlendirilmiş modellerin sarsma masası üzerinde deprem testlerinin yapılması ve deprem davranışlarının elde edilmesi,
- Elde edilen deneysel sonuçlar daha sonra sayısal yazılımlarda yapılan simülasyonlar ile karşılaştırılması.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Giriş

Bu çalışmada; delikli tuğla, gaz beton ve bims gibi farklı duvar birimlerinden inşa edilmiş ölçekli yığma bina modelleri kullanılarak sarsma masasında gerçekleştirilecek dinamik deneyler ile birlikte binalarda oluşacak farklı hasar durumları için sismik performanslarının deneysel yöntemler kullanarak incelenmesi ve onarım/güçlendirme için kullanılabilecek uygun yöntemlerin önerilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, hasarların deneysel olarak gözlemlenebilmesi için, deprem yüklemelerinden önce ve sonra yapılan ortam titreşim testleri ile binanın hasarsız ve hasarlı durumları için modal parametrelerin incelenmesi de bu çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır. Bu bölümde, deney numuneleri, ölçeklendirme kurallarına, malzeme özelliklerine, deney numunelerinin üretimine, deney düzeneğine, sarsma masasına ve tüm sarsma masası deneylerinde ve çevresel titreşim testlerinde kullanılacak cihazlar ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sarsma masası deneylerinde uygulanacak yer hareketleri seçimi ve ölçeklendirilmesine ait detaylar yine bu bölümde verilmiştir.

Laboratuvar olanakları, inşaat güçlükleri ve güvenlik riskleri nedeniyle yığma yapıların sismik davranışının belirlenmesinde tam ölçekli modeller sıklıkla tercih edilmemektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda genellikle ölçekli deney numuneleri veya yapı elemanları kullanılmaktadır. Diğer laboratuvar deneylerine kıyasla (statik veya yarı statik çevrimsel testler) test süresinin kısalığı ve büyük boyutlardaki sarsma masasının yaygın olmayışı sarsma masası testleri için bir dezavantajdır. Tüm bunları aşmak için dinamik testler öncesi ön hazırlıklar yapılmalıdır. Bu amaçla, çalışma kapsamında delikli tuğla elemanlar kullanılarak bir adet ön deney numunesi oluşturulmuş ve farklı hasar durumlarına neden olan farklı yer hareketleri ile ön deney kapsamında sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ön deney testi kapsamında deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin, ölçüm sistemlerinin, sarsma masasının ve ölçeklendirme sisteminin uygunluğu değerlendirilmiş ve bu verilere göre ana sarsma masası deneyleri için deney düzeneğinde ve deprem verilerinde bazı değişiklikler yapılmıştır.

### 2.1.1. Deneysel Program

Deprem eylemi altındaki yapının performansına ilişkin araştırmayı mümkün kılmak için geliştirilmiş ve daha kontrol edilebilir deneylere olan talep sürekli artıyor. Test yöntemleri ve bilgisayar modellemesi ile tam boyutlu yığma yapılar üzerinde deneysel araştırma yapmak zordur. Günümüzde dinamik test teknikleri, gerçek dinamik yükleme testlerinden gerçek zamanlı veya genişletilmiş zamanda yapay dinamik testlere kadar uzanmaktadır. Yapı, rastgele sismik eylem ile yüklendiğinde, karmaşıklık artar. Teknik sorunlar ve yüksek masraflar nedeniyle, gerçekteki fiziksel bir problemin gerçek davranışını doğru şekilde yansıtan deneysel testler yapmak her zaman mümkün değildir. Bir sismik hareket durumunda, deneyin güçlü yer hareketi altında yürütülmesi büyük olasılıkla ekipmanı yok edecek ve deneysel çalışmayı işe yaramaz hale getirecektir. Ayrıca, çeşitli yükleme koşulları altında değerlendirilecek çok sayıda tam ölçekli yapının inşaa maliyeti yüksektir ve pratik değildir. Yukarıda belirtilen zorluğun üstesinden gelmek için, model genellikle laboratuvar boyutunda bir modele küçültülür ve aynı model sıklıkla çeşitli yükleme koşullarında kullanılır, yüklemenin son aşamasında ciddi yapısal hasara neden olur. Bu araştırma kapsamında, sismik etkiye maruz kalan yarım ölçekli yığma yapı modellerinin performansını değerlendirmek için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, 1/2 ölçekli yığma yapıların deprem simülasyonunun doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, delikli tuğla, bims ve gaz beton elemanlar kullanılarak deneysel üç model oluşturulmuş ve farklı hasar durumlarına neden olan farklı yer hareketleri ile sarsma masası testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, test numunesi, test kurulumu, ölçüm sistemleri ve uygulanan test dizisi hakkında ayrıntılı bilgiler içerir.

Depreme dayanıklı yapı kavramını karşılayan yapılar yeterli elastik yatay yük dayanımına sahip olmalı ki hafif ve orta şiddetli depremlerde elastik davranış göstererek hasar almamalılar. Ayrıca yapılar sünek bir davranış da sergilemeliler ki yapıda kırılmalar olmasına rağmen yapı tamamen çökmeden enerjisi sönmelenmelidir. Tüm bunlar dikkate alınarak yapıların onarım ve güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesinde aşağıdaki maddeler dikkate alınmalıdır:

- Yapıda bulunan yüklerin kaldırılması veya azaltılması,
- Deprem yönetmeliğinde belirtilen kapı ve pencere gibi boşluklar arasındaki dolu duvar genişliğinden daha küçük olan yapılardaki boşluklar küçültülmeli,

- Burulma olasılığını önlemek için kitle ve rijitlik merkezleri birbirlerine yaklaştırılmak için yeni duvarlar eklenmesi,
- Onarım ve güçlendirme yöntemi yapının bulunduğu duruma ve konuma göre belirlenmeli,
- Yapıdaki iç ve dış taşıyıcı duvarların yatay ve düşey dayanımları artırılmalıdır.

Çeşitli güçlendirme uygulamaları da mevcuttur;

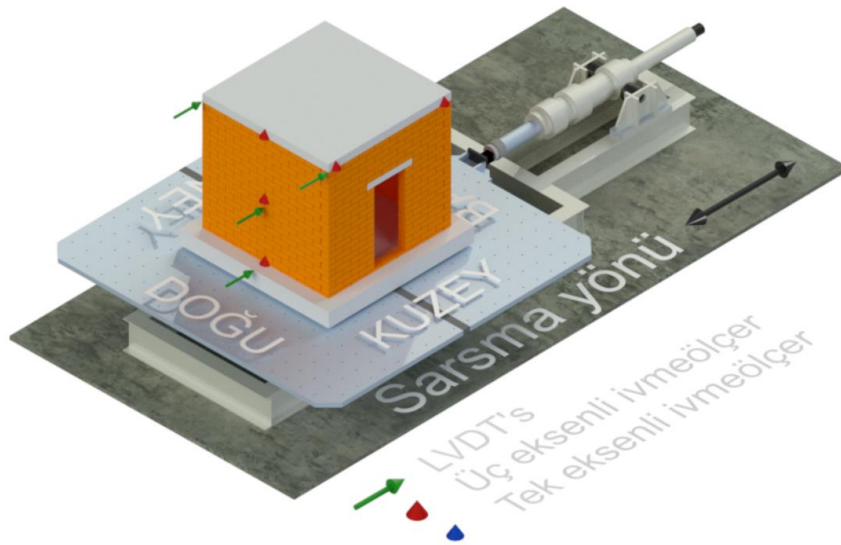
- Betonarme sargılama
- Çelik sargılama
- LP kompozit malzeme kullanılması
- Taşıyıcı duvar eklenmesi
- Yeni çerçeveler eklenmesi
- Çelik donatı eklenmesi

Bu güçlendirme yöntemleri seçilirken yapının türü, mevcut yapı malzemesinin kalitesi, yapının önemi, yapı kullanım amacı, güçlendirme nedenleri, maliyeti, hasarın tipi ve düzeyi gibi faktörler göz önüne alınır. Bu tez kapsamında, delikli tuğla ile inşa edilmiş bir numune ağır hasar sonrası LP kompozit malzeme ile güçlendirilme yapılmıştır. Yapıların güçlendirilmesinde üç çeşit LP malzeme sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler karbon, cam ve aramid takviyeli LP kompozit malzemelerdir. Her birinin farklı dayanımları ve maliyetleri vardır. LP kompozit malzemelerin hafif olması, güçlendirilen elemanın rijitliğini arttırmaması, ilave yük oluşturmaması, az işçilik, betondan az geçirimsiz olması, hızlı uygulanması, korozyona dayanıklılığı, her türlü yapı için uygun olması ve yapı işler iken uygulanması son yıllarda yaygın olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. Halihazırda tasarım ve uygulama hakkında birçok yönetmelikler bulunmaktadır; DBYBHY [61], ACI 440.2R-08 (2008), Eurocode 8, FIB 14 (2001), CAN/CSA s806, JSCE. LP kompozit malzemelerin dezavantajları ise geleneksel güçlendirme malzemelerine göre pahalı olmaları, yüksek sıcaklıkta özelliklerini koruyamamaları, lif ve güçlendirilecek duvar arası aderansın sağlanıp yük aktarımı yapılabilmesi için yönetmeliklerde belirtilen yüzeyin sahip olması gereken minimum çekme dayanımı olması gerekmektedir. LP kompozit malzemeler iki temel bileşenden oluşmaktadırlar. Bu bileşenler lifleri birbirine bağlayan, yük transferini sağlayan ve lifleri dış etkilerden koruyan matriks malzemeden ve dayanımı ile rijitliği sağlayan lif malzemelerdir.

Tez kapsamında 3 adet yığma deney modeli kullanılarak sarsma masası deneylerinin yürütülmesine karar verilmiştir. Sarsma masası deneyleri için takip edilen deney organizasyonunun ana hatları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Delikli tuğla ile inşa edilmiş ½ ölçekli yığma model,
  - Hasarsız durumu için DMA,
  - Sarsma masası deneyleri,
  - Hasar ilerlemesini anlayabilmek için her durumdan sonra DMA,
  - Ağır hasar sonrası LP ile güçlendirme,
  - Güçlendirme sonrası tekrar sarsma masası deneyleri.
- Bims malzeme ile inşa edilmiş ½ ölçekli yığma model,
  - Hasarsız durumu için DMA,
  - Sarsma masası deneyleri,
  - Hasar ilerlemesini anlayabilmek için her durumdan sonra DMA.
- Gazbeton malzeme ile inşa edilmiş ½ ölçekli yığma model,
  - Hasarsız durumu için DMA,
  - Sarsma masası deneyleri,
  - Hasar ilerlemesini anlayabilmek için her durumdan sonra DMA.

Şekil 2.1’de tez kapsamında sarsma masası deney düzeneğine ait şematik görünüm sunulmuştur.



Şekil 2.1. Sarsma masası deney düzeneğine ait şematik gösterim

### 2.1.2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Tam ölçekli yapı modeli dikkate alındığında malzeme temin ve üretim zorlukları açısından herhangi bir malzeme ölçeklendirilmesi yapılmamıştır. Deneysel modellerin inşası betonarme temel, yığma duvarlar ve betonarme döşeme olmak üzere 3 ana aşamadan oluşmaktadır. Malzeme özelliklerinin tayini açısından harç ve beton malzemeden ilgili yönetmeliklerin belirttiği durumlar doğrultusunda numune almak eş zamanlı olarak yapılmıştır. Alınan numuneler ilgili yönetmelikler uyarınca uygun kür havuzlarında ve koşullarında bekletilmiştir. Beton ve harç numuneler için kür süresi 28 gün ve kür havuzu  $21\pm2^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa sahiptir.

#### 2.1.2.1. Harçta Kullanılan Malzemelerin Karışımları ve Özellikleri

Delikli tuğla ve bims beton yığma modelinde yığma birimlerin örülmesinde kullanılan harçta kum ve çimento kullanılmıştır. Agregada olarak kullanılan kumun DKY özgül kütlesi  $2.65 \text{ gr/cm}^3$  ve 0-4 mm çap aralığında geleneksel dere kumu kullanılmıştır. Çimento olarak ise CEM-II 32.5R tipte Portland çimentosu kullanılmıştır. Tablo 2.1’de kullanılan çimentoya ait malzeme özellikleri verilmiştir. Gaz beton yığma modelinde yığma birimlerin örülmesinde çimento esaslı gaz beton örgü harcı kullanılmıştır. Üretici firma tarafından gaz beton örgü harcı bazı özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Harç üretiminde kullanılan çimento özellikleri

| CEM IV 32.5R        |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| Priz başlama süresi | $\geq 75$                         |
| Genleşme            | $10 \text{ mm} \geq$              |
| 7 günlük dayanım    | $\geq 16 \text{ Mpa}$             |
| 28 günlük dayanım   | $\geq 32.5 \leq 52.5 \text{ Mpa}$ |
| Puzolanik özellik   | olumlu                            |
| Özgül yüzey         | $5500-5800 \text{ cm}^2/\text{g}$ |
| Yoğunluk            | $2.75-2.80 \text{ g/cm}^3$        |

Tablo 2.2. Gaz beton örgü harcı malzeme özellikleri

| Renk                               | Gri                                                         |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Maksimum tane büyüklüğü            | 1,0 mm                                                      |
| Su buharı difüzyon katsayısı       | 5/20 (TS EN 1745)                                           |
| İşlenebilme süresi                 | 300 dk (TS EN 1015-9)                                       |
| Basınç mukavemeti                  | M5 (TS EN 1015-11)                                          |
| Ortalama basınç dayanımı           | Yaklaşık 8,5 N/mm <sup>2</sup> (TS EN 1015-11)              |
| Su emme                            | 0,2 kg/m <sup>2</sup> dakika <sup>0,5</sup> (TS EN 1015-18) |
| Yangına tepki                      | A1 (TS EN 13501-1)                                          |
| Su karışım oranı                   | 5,5-6,0 litre/torba                                         |
| Uygulama sonrası sıcaklık dayanımı | (-30 °C) – (+80°C)                                          |

Tuğla ve bims beton ile inşa edilen laboratuvar modellerinde harcın bağlayıcı olarak kullanıldığı yatay ve düşey derzlerde harç tipi ve karışımı TS 2510 [60]'den alınmıştır. Üç farklı karışım laboratuvar ortamında hazırlanıp test edildi. Malzeme testlerinin sonucunda TS 2510 [60]'a göre A tipi harç tercih edilmiştir. A tipteki harcın hacimce karışım oranları Tablo 2.3'te verilmiştir. Seçilen harç tipi için minimum basınç dayanımı TS EN 998-2 [70]'ye göre 15 MPa olmalıdır. Harç karışım aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 2.2'de verilmektedir. Duvar harcı için TS EN 1015-11 [194] standardı dikkate alınarak harçların basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Bu standart, eski veya yeni inşaat harcının test edilmesi arasında hiçbir fark olmadığını belirtir. Eğilme dayanımının belirlenmesi için, üç noktalı eğme altında test edilecek 4 cm x 4 cm x 16 cm boyutlarında numune gerekmektedir. Bu nedenle her bir laboratuvar modeli için hazırlanan 3 adet 4 x 4 x 16 cm boyutlarında numunelerin tamamı basınç ve eğilmede çekme deneyi için kullanılmıştır. Ayrıca, harç numunelerine ilgili standarda uygun 28 günlük kür uygulanmıştır. Harç numunelerine ve test aşamalarına ait görsel Şekil 2.3'te verilmiştir. Deneylerin sonucunda elde edilen basınç ve eğilmede çekme dayanımları Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Harç karışım oranları (hacimce)

| A tipi harç | Çimento | Kum |
|-------------|---------|-----|
|             | 1       | 3   |



Şekil 2.2. Harç üretimine ait görseller



Şekil 2.3. Harç numunelerinin eğilmede çekme ve basınç deneylerine ait görseller

Tablo 2.4. Yığma yapı modellerinde kullanılan harçların bazı özellikleri

| Numune              |               | Ağırlık<br>(gr) | Ortalama<br>Ağırlık<br>(gr) | Eğilme<br>Dayanımı<br>(MPa) | Ortalama<br>Eğilme<br>Dayanımı<br>(MPa) | Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Ortalama<br>Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) |
|---------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Tuğla<br>ve<br>Bims | TS EN<br>1015 | 1               | 504,1                       | 1,8                         |                                         | 14,437                      |                                         |
|                     |               | 2               | 502,4                       | 1,78                        | 1,771                                   | 15,75                       | 15,296                                  |
|                     |               | 3               | 510,4                       | 1,734                       |                                         | 15,7                        |                                         |
|                     | ASTM          | 1               | 510,9                       | 2,81                        |                                         | 15,125                      |                                         |
|                     |               | 2               | 512                         | 1,9                         | 2,335                                   | 15,18                       | 15,06                                   |
|                     |               | 3               | 521                         | 2,297                       |                                         | 14,875                      |                                         |

A tipi harç için ilgili standartta minimum harç basınç dayanımı 15 MPa olarak belirtilmiştir. Harç malzeme deney sonuçları incelendiğinde ortalama basınç değerleri istenilen seviyeye ulaşmıştır.

#### 2.1.2.2. Donatı Özellikleri

Yığma yapı modellerinin temel ve döşemelerinin üretiminde S420 nervürlü çelik donatılar kullanılmıştır. Her birinden üçer adet alınan çelik donatıların çapları temelde 14 mm, döşemelerde kullanılan donatılarda ise 8 mm olarak seçilmiştir. Bahsedilen donatılar üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında bulunan 600 kN kapasiteli universal deney aleti ile merkezi çekme deneyi yapılmıştır. Malzeme dayanımları üçerli gruplardan elde edilen verilerin aritmetik ortalaması ile bulunmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen donatı malzeme özellikleri Tablo 2.5’te verilmektedir.

Tablo 2.5. Temelerde ve döşemelerde kullanılan donatıların malzeme özellikleri

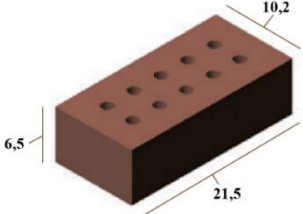
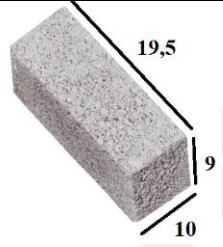
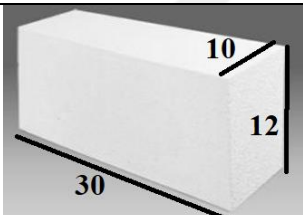
| Donatı | Çekme Dayanımı (MPa) | Akma Dayanımı (MPa) | Kopma Birim Uzaması (%) | Elastisite Modülü (MPa) |
|--------|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 8 mm   | 608                  | 438                 | 25.4                    | 210577                  |
| 14 mm  | 620                  | 475                 | 23                      | 212350                  |

#### 2.1.2.3. Duvar Birim Elemanları

Çalışma kapsamında 10,2×21,5×65cm ölçülerinde düşey delikli tuğla elemanlar kullanılarak bir yığma yapı modeli inşa edilmiştir. Tuğla elemanlar için boşluk oranı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’ne (TBDY-2018) dikkate alınarak %23 olarak seçilmiştir. Bims beton ile üretilen yığma yapı modelinin üretiminde ise TBDY’nin belirttiği gibi minimum basınç dayanımı 5 MPa olan 10×19,5×9cm ölçülerinde dolu bims beton elemanlar kullanılmıştır. İlgili yönetmelikte “boşluklu beton bloklar taşıyıcı duvar yapımında kullanılamaz” ifadesi yer almaktadır. Gaz beton birim elemanlarda bims betonda olduğu gibi dolu ve minimum basınç dayanımı 5 MPa olan G4-600 tipi taşıyıcı özellikteki gaz beton tercih edilmiştir. Bims ve gaz beton üreticiden 1/1 ölçekli olarak temin edilmektedir. Çalışmalarda modeller ½ ölçekli olmasından dolayı birim elemanlar laboratuvar ortamında

kesilerek ölçekli duruma getirildi. Tablo 2.6’da tuğla, bims beton ve gaz beton yığma yapı modellerinde kullanılan birim elemanlara ait bazı özellikler verilmektedir.

Tablo 2.6. Birim eleman özellikleri

| Birim Eleman                                                                        | Basınç dayanımı (MPa) | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | Boşluk oranı (%) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|
|    | 35                    | 1660                          | 23               |
|   | 5                     | 1290                          | Dolu             |
|  | 5                     | 600                           | Dolu             |

#### 2.1.2.4. Beton Özellikleri

Yığma model duvarlarının mesnetleneceği temel ve döşemeler betonarme olarak üretilmiştir. Betonlar hazır beton santrallerinden temin edilmiştir. Betona ait malzeme özelliklerini elde etmek için her döküm aşamasında 6 şar adet 15x15x15 cm ölçülerinde küp numuneler alınmıştır (Şekil 2.4). Model üretimi sırasında alınan küp beton numunelerin eksenel basınç deneyi Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında bulunan 2500 kN kapasiteli ve sabit hızla yükleme yapabilen bilgisayar kontrollü bir cihaz ile yapılmıştır. Betonun mekanik özellikleri Tablo 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Beton numunelerin alınması ve malzeme testi

Tablo 2.7. Küp numunelerin mekanik özellikleri

| Numune | No | Ağırlık (gr) | Ortalama Ağırlık (gr) | Yük (kN) | Basınç Dayanımı (MPa) | Ortalama Basınç Dayanımı (MPa) |
|--------|----|--------------|-----------------------|----------|-----------------------|--------------------------------|
| Temel  | 1  | 7968         | 8012                  | 1076.85  | 47.86                 | 47.39                          |
|        | 2  | 7953         |                       | 1139.85  | 50.66                 |                                |
|        | 3  | 7989         |                       | 1014.97  | 45.11                 |                                |
|        | 4  | 8104         |                       | 1039.72  | 46.21                 |                                |
|        | 5  | 8035         |                       | 1063.8   | 47.28                 |                                |
|        | 6  | 8022         |                       | 1062.67  | 47.23                 |                                |
| Döşeme | 1  | 7922         | 7910                  | 1141.65  | 50.74                 | 50.36                          |
|        | 2  | 7883         |                       | 1156     | 51.38                 |                                |
|        | 3  | 7895         |                       | 1189.35  | 52.86                 |                                |
|        | 4  | 7952         |                       | 1082     | 48.09                 |                                |
|        | 5  | 7901         |                       | 1090.57  | 48.47                 |                                |
|        | 6  | 7912         |                       | 1138.5   | 50.6                  |                                |

### 2.1.3. Deney Modellerine Ait Geometrik Özellikler ve Üretim

Laboratuvar ortam ve imkanları deney numunelerinin boyutlarını belirlemede önemli bir etkidir. Laboratuvar koşullarının ve sarsma masasının boyutlarının izin vermediği yapı modelleri için ölçeklendirme tercih edilmektedir. Bu çalışmada, yığma yapı modelleri

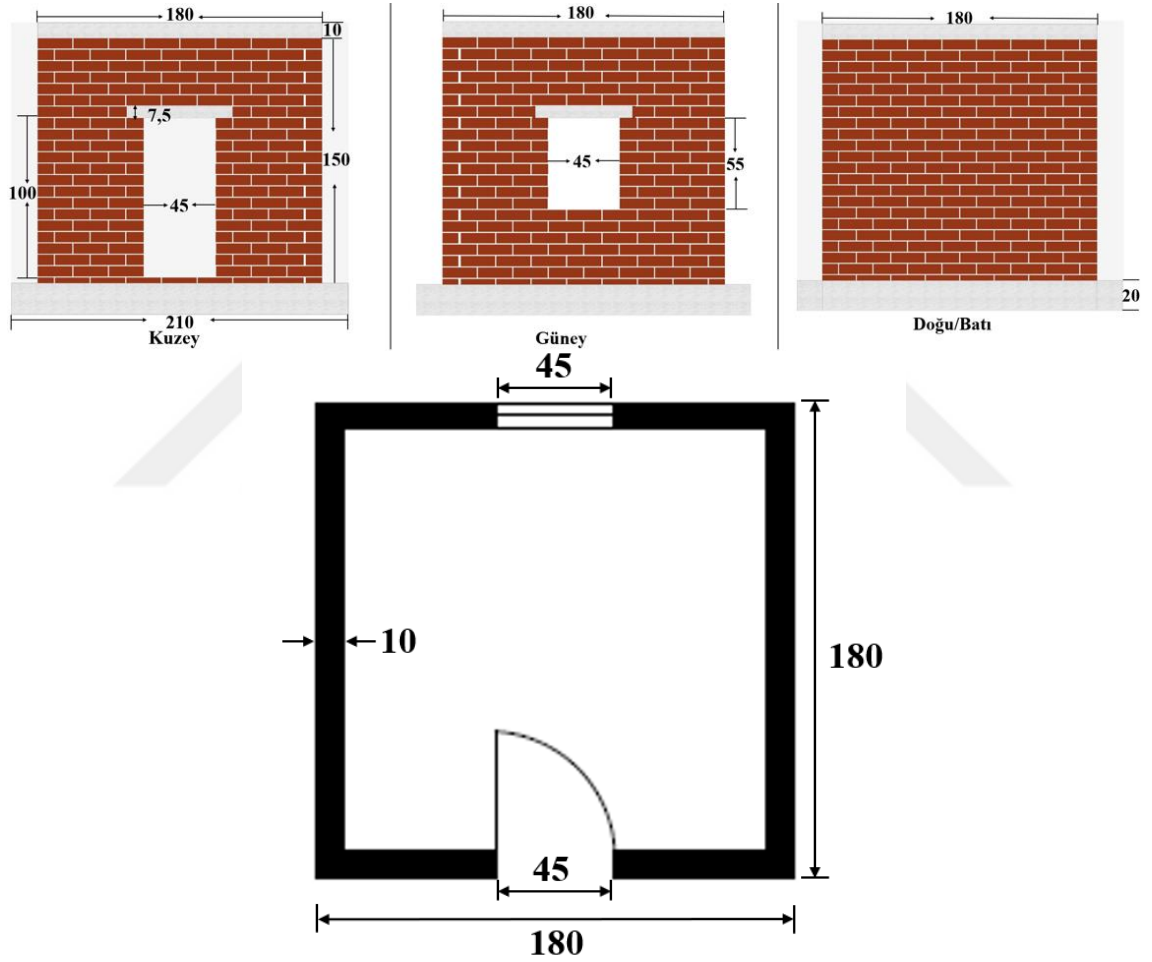
literatürdeki 1/1 ölçekli çalışmalar ve TBDY-2018 yönetmeliği dikkate alınarak ½ ölçekli yığma yapı modelleri kullanılmıştır. Laboratuvar imkanları, inşaat güçlükleri ve güvenlik riskleri nedeniyle kat yüksekliği 150 cm olan yarım ölçekli, tek açıklıklı ve tek katlı model tercih edilmiştir. Yığma duvarı oluşturan birim elemanlar ulaşılması kolay ve yapı stoğunda bulunan yapıları temsil etmek açısından Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [61] (DBYBHY-2007) yönetmeliği esas alınarak seçilmiştir. Yapı modelinin detaylandırılması da ilgili yönetmeliğe uygun yapılmıştır. Taşıyıcı duvar boşlukları, duvar kalınlıkları ve duvar boşluk oranlarının köşeye olan yakınlıkları gibi maddeler yönetmelik hükümlerini karşılamaktadır.

Bu tez kapsamında, betonarme bir temel üzerine 1,5 m kat yüksekliğinde yarı ölçekli 1,8 x 1,8 m 3 adet yığma yapı modeli inşa edildi (3600×3600×3200 mm tam ölçekli yığma yapı modeli dikkate alındı). Çalışma kapsamında 102mm×215mm×65mm ölçülerinde delikli tuğla, 100mm×195mm×9mm ölçülerinde bims beton ve 100mm×300mm×120mm ölçülerinde gaz beton birim elemanlar kullanılarak yığma yapı modeli inşa edilmiştir. Modeller, Türkiye’de uygulanan yaygın inşaat uygulamasına göre inşa edilmiştir. İlk olarak 2,1 x 2,1 x 0,2 m ölçülerinde betonarme temel yapılmıştır. Deprem yüklerinin yapılar üzerinde karmaşık etkileri vardır. Test edilmeden önce, modeli sarsma masasına sabitlemek için betonarme temelde 16 adet M20 tij delikleri bırakılmıştır. Duvarlar, sabit sınır koşulunu temsil etmek için temele gömüldü. Bu uygulama, test sırasında modelin tabanından kaymayı/kesmeyi önlemek için yapılmıştır. Ayrıca sayısal analizlerde zemin-duvar bağlantısı, yapı-zemin etkileşimi gibi çeşitli detaylar dikkate alınmalıdır. Genişlik, uzunluk ve kalınlık olarak sırasıyla 1.8m, 1.8m ve 0.1m betonarme döşemeler kullanılmıştır. Sarsma masası üzerinde test edilecek yarım ölçekli model için et kalınlığı 100 mm olarak seçilmiştir. Kuzey yönündeki duvarda 0.45 x 1 m ölçülerinde standart bir kapı açıklığı ve güney yönündeki duvarda 0.45 x 0,55 m ölçülerinde bir pencere açıklığı bulunurken, doğu ve batı duvarlarında boşluksuz dolu bir duvar kullanılmıştır.

Laboratuvar modeli benzerlik yasalarına göre oluşturulmuştur. Cauchy benzerlik yasaları ve Froude benzerlik yasaları, ölçekli modeller için yaygın olarak kullanılır. Froude benzerlik yasaları atalet ve yerçekimi kuvvetleri arasındaki ilişkiyi verirken, Cauchy yasaları atalet ve elastik geri getirme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi verir [42]. Froude benzerlik yasaları dikkate alındığında ek kütleler gereklidir. Bu çalışmalarda her iki kanunun da uygulanması olumludur. Ancak ek kütleler ve laboratuvar olanakları bazı deneylere izin vermemektedir. Ön deney ve gaz beton modelde çoğu çalışmada tercih edilen Cauchy

benzerlik yasaları kullanılırken [39, 42, 43, 196], bims beton model ve ikinci tuğla model üzerinde yukarıda bahsedilen her iki benzetim yasaları da uygulanmıştır. Model boyutları sarsma masasının boyutlarına ve kapasitesine göre oluşturulduğundan ölçek faktörü  $\frac{1}{2}$  kullanılmıştır.

Birçok araştırmacı, tuğla duvarların mekanik özellikleri için çeşitli değerler önermektedir. Bu çalışmada TBDY gerekliliklerine göre mekanik özellikler seçilmiştir. Şekil 2.5'te yığma duvarların ve birimlerin genel görünüşleri ve çizimleri görülmektedir.



Şekil 2.5. Deney modellerinin geometrik özellikleri

#### 2.1.4. Deney Numunelerinin Ölçeklendirilmesi

Sarsma masası deneyleri gerçekleşmiş doğal yer hareketlerinin laboratuvar ortamında ve kontrollü bir şekilde bir yapıya simüle edildiği ve yapı dinamik performansının araştırıldığı deney yöntemidir. Sarsma masası deneyleri kapasite ve boyut sınırlamaları

nedeniyle genellikle küçültülmüş ölçekli modellerde gerçekleştirilir. Fiziksel modelleme ve ölçekleme, yığma sistemlerin tam ölçekli testinin yüksek maliyeti ve laboratuvar koşulları nedeniyle yığma yapıların karmaşık davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlayan ekonomik bir yöntemdir. Ayrıca fiziksel modelleme tekniği, yapıların tepkisini belirlemek için çok önemli olan kontrollü koşullar altında üç boyutlu karmaşık yapıların modellenmesini ve test edilmesini sağlar. Fiziksel model yönteminde bir yapının tam ölçeğine “prototip”, tam ölçekli yapının belli bir ölçekte oluşturulmuş kopyasına ise “model” adı verilir. Bu metodoloji, prototipe eşdeğer olan model sonuçlarını yeniden üretebilir.

Fiziksel modelin gerçek bir yığma yapının davranışını tahmin etme yeteneği, bazı ölçeklendirme yasalarının yerine getirilmesi ile yakından ilişkilidir. Literatürde, uygun ölçeklendirme yasalarını türetmek için iki temel teknik kullanılmaktadır; boyut analizi ve benzerlik teorisi [197].

Boyutsal analiz, yapıların fiziksel niceliklerinin boyutsuz güç çarpımlarından oluşan bir denklemi kullanan matematiksel bir tekniktir. Bu denklem, yapının fiziksel büyüklüklerle boyutsal olarak homojen denklemi kullanılarak belirlenir ve hem prototiplerde hem de modellerde aynı fiziksel olguyu tanımlar. Boyutsuz ürünler aynı fiziksel olayı tanımladığından, model tasarlamak ve modeller için ölçeklendirme ilişkileri yönünden çok uygundur.

Benzerlik teorisi, sistemdeki etki eden kuvvetleri tanımlar ve model ve prototip için boyutsuz terimleri oluşturmak ve eşitlemek için boyutsal analizi kullanır [198]. Model ve prototip, geometrik, kinematik ve dinamik benzerlikleri paylaşıyorsa, bir modelin gerçek yapıyla benzerliği vardır. Bu benzerlikler, fiziksel olayların boyutsal bir analizinden türetilir ve prototipe eşit test sonuçlarını yeniden üretebilen test koşulları sağlar.

Aynı yere gelen tüm uzunlukların orantılı olması ve aynı yere gelen tüm açıların eşit olması gibi prototip yapı ve ölçekli model benzer geometriye sahip olduğunda geometrik benzerliğe sahip oldukları söylenebilir.

Prototip ve modelin benzer hız ve ivme zaman geçmişine sahip olması durumunda, bu sistemlerin kinematik benzerliğe sahip olduğu düşünülebilir.

Kinematik benzerlik ve benzer kütle dağılımlarına sahip olmaları koşuluyla hem prototip sistemin hem de modelin dinamik benzerliğe sahip olduğu düşünülebilir [199]. Prototip sistemlerin ve modellerin fiziksel ölçümleri arasında bir ilişki vardır. Bu oran benzerlik katsayısı olarak kabul edilir. Malzemelerin akma ve nihai dayanımları ile model ve prototip arasındaki gerilme-gerinim ilişkisi gibi benzer özellikler olması durumunda,

model davranışının benzerliğini doğrusal bölgeden doğrusal olmayan bölgeye sürdürmek mümkündür. Benzerlik parametreleri, temel parametrelere göre belirlenebilir veya bağımsız benzerlik katsayılarına sahiptir.

Dinamik olarak yüklenen yapılar için benzerlik gereksinimleri ek bir değişken, zaman içermelidir. Dinamik ölçekleme katsayıları, en zor ve önemli benzerlik faktörlerinden biridir ve Cauchy sayısı ve Froude sayısı kullanılarak uygun şekilde tanımlanabilir. Cauchy sayısı, dinamik atalet kuvvetleri ile elastik geri yükleme kuvvetleri arasındaki oran olarak ifade edilebilirken, Froude sayısı atalet ve yerçekimi kuvvetleri arasındaki oran olarak tanımlanır. Hem Cauchy hem de Froude sayıları, uzunluk ölçek faktörünün tersi olması gereken kütle için aynı ölçek faktörüne sahiptir ve uzunluk ölçek faktörünün karekökü olması gereken zaman ölçek faktörünün tersidir.

Tablo 2.8, m sembolünün modeli ve p sembolünün prototipi ifade ettiği [200] yapı mühendisliğinde daha genel olarak ele alınan bazı büyüklükler için Cauchy ve Froude benzerlik ilişkilerini özetlemektedir. Cauchy benzerlik ilişkilerine göre frekans, dinamik benzerlik yasalarının gerekliliklerine dayalı olarak ölçek faktörünün karekökü ile ölçeklenir. Başka bir deyişle, zaman tanım alanında bu faktör tarafından zamanda sıkıştırılmalıdır.

Bu çalışmada numune, sarsma masasının kapasitesi ve boyutu dikkate alınarak 1:2 ölçek faktörü ile oluşturulmuştur. Önceki çalışmalar [201], prototip davranışına olabildiğince yakın doğrusal olmayan davranış elde etmek için Cauchy ve Froude benzerlik yasalarının beraber kullanılmasını önermiştir. Her parametrenin ölçek faktörü, Tablo 2.8'de sunulan Cauchy ve Cauchy-Froude benzerlik yasaları kullanılarak hesaplanır. Cauchy-Froude benzerlik kanunları ivmeyi gerçek yer hareketine eşit tutar. Cauchy-Froude benzerlik yasaları, modelin kütlesi için dört ölçek faktörü gerektirir. Bu, model orijinal malzemenin iki katı özgül kütleyle sahip yeni malzemelerle yapılmadıkça elde edilemez. Alternatif olarak, önceki çalışmaların çoğu [196, 201], kütle ölçeği faktörünü karşılamak için modelin zeminlerine yapay bir kütle eklemiş ve modeller için aynı malzemeleri kullanmıştır. Bu benzerlik modeline yapay kütle benzeştirme modeli denmektedir. Tuğla ve bims model yapılarda, malzeme için ölçeklendirme katsayısı olarak 1.0 alınmıştır ve ek bir kütle eklenerek benzerlik gereksinimleri karşılandı. Öyle ki, bu şekilde yapılan benzerlik yönteminde prototip ve model binada aynı malzemeler kullanılabilir ve herhangi bir malzeme açısından ölçeklendirme yapılmamıştır. Deneylerde kullanılan bir diğer ölçeklendirme maddesi olan yer hareketi verisinin ivme ölçeği tabloda da görüldüğü gibi 1.0

olarak ele alınırken, yer hareketi verisinin zaman eksenine ise ölçek katsayısının karekökü ile ölçeklendirme işlemi yapılmıştır.

Cauchy benzerlik yasaları ve Froude benzerlik yasaları, ölçekli modeller için yaygın olarak kullanılır. Froude benzerlik yasaları gereğince ek kütleler gereklidir. Bu çalışmalarda her iki kanunun da uygulanması olumludur. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi ön deney ve gaz beton model çalışmalarında Cauchy benzerlik yasaları kullanılmıştır.

Tablo 2.8. 1:2 ölçekli bir dinamik model için benzerlik ölçeği faktörleri (Ölçek Katsayısı ( $\lambda$ ))

| Parametre         | Sembol        | Yapay Kütle Benzeştirme Modeli<br>Cauchy + Froude modeli                                        | Cauchy modeli                                       |
|-------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Uzunluk           | $l$           | $\lambda_l = \lambda = 2$                                                                       | $\lambda_l = \lambda = 2$                           |
| Elastisite Modülü | $E$           | $\lambda_E = 1$                                                                                 | $\lambda_E = 1$                                     |
| İvme              | $a$           | $\lambda_a = 1$                                                                                 | $\lambda_a = \lambda^{-1} = 0.5$                    |
| Hız               | $v$           | $\lambda_v = (\lambda_l \lambda_a)^{1/2} = \lambda^{0.5} = \sqrt{2}$                            | $\lambda_v = 1$                                     |
| Kuvvet            | $F$           | $\lambda_f = \lambda_E \lambda_l^2 = \lambda^2 = 4$                                             | $\lambda_f = \lambda^2 = 4$                         |
| Gerilme           | $\sigma$      | $\lambda_\sigma = \lambda_E = \lambda = 1$                                                      | $\lambda_\sigma = 1$                                |
| Şekil Değiştirme  | $\varepsilon$ | $\lambda_\varepsilon = 1.0$                                                                     | $\lambda_\varepsilon = 1.0$                         |
| Alan              | $A$           | $\lambda_A = \lambda_l^2 = \lambda^2 = 4$                                                       | $\lambda_A = \lambda_l^2 = \lambda^2 = 4$           |
| Hacim             | $V$           | $\lambda_V = \lambda_l^3 = \lambda^3 = 8$                                                       | $\lambda_V = \lambda_l^3 = \lambda^3 = 8$           |
| Yoğunluk          | $\rho$        | $\lambda_\rho = \lambda_E / (\lambda_l \lambda_a) = \lambda^{-1} = 0.5$                         | $\lambda_\rho = \lambda = 1$                        |
| Kütle             | $m$           | $\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_l^3 = \lambda^2 = 4$                                          | $\lambda_m = \lambda^3 = 8$                         |
| Enerji            | $e$           | $\lambda_e = \lambda_E \lambda_l^3 = \lambda^3 = 8$                                             | $\lambda_e = \lambda_E \lambda_l^3 = \lambda^3 = 8$ |
| Zaman             | $t$           | $\lambda_t = (\lambda_l \lambda_a)^{1/2} = \lambda^{0.5} = \sqrt{2}$                            | $\lambda_t = \lambda = 2$                           |
| Frekans           | $\omega$      | $\lambda_\omega = 1 / \lambda_t / (\lambda_E \lambda_\rho)^{1/2} = \lambda^{-0.5} = 1/\sqrt{2}$ | $\lambda_\omega = \lambda^{-1} = 0.5$               |
| Sönüm             | $\zeta$       | $\lambda_\zeta = 1.0$                                                                           | $\lambda_\zeta = 1.0$                               |
| Yerçekimi İvmesi  | $g$           | $\lambda_g = 1.0$                                                                               | $\lambda_g = 1.0$                                   |

### 2.1.5. İlave Kat Kütleleri

Delikli tuğla, güçlendirilmiş model ve bims model deneylerinde ilave kütleler ile benzerlik gereksinimleri karşılanmıştır. Bu modellerin sarsma masası deneylerinde döşemeye ilave edilecek kütlelerin belirlenmesi için yapay kütle simülasyon (artificial mass simulation model) yöntemi kullanılmıştır [202]. Bu yöntemde deney modeli ile prototip model arasındaki kütle oranı aşağıdaki Denklem (2.1) ile verilen durumu sağlamalıdır. Deney modeli için ölçekli malzeme bulmak her zaman kolay bir durum değildir. Prototip ve model için aynı malzemelerin kullanılması için malzeme gerilme ölçek faktörü 1.0 olarak dikkate alınmıştır.

$$M_r = M_M/M_P = L_r^2 ; L_r^2 = 1/ S_L^2 \quad (2.1)$$

Burada  $M_r$ , kütle oranını,  $M_M$  deney modelinin ağırlığı,  $M_P$  prototip model ağırlığı,  $S_L$  ölçek faktörüdür. Yapıya eklenecek ilave kütle hesabı Denklem (2.2) ile yapılmaktadır.

$$M_{m1} = M_P/S_L^2 - M_{m0} \quad (2.2)$$

Burada  $M_{m1}$  deney modeline ilave edilecek kat kütlesini,  $M_{m0}$  deney modelinin kütlesidir. Bu denklemlere bağlı olarak yapılan hesaplamalar ile bir modele eklenecek ilave kütle 2.3 ton olarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu ağırlıklar döşeme üstüne 14 adet M14 tij ile monte edilmiştir. Ağırlıklar 25cmx100cmx1.6 cm ölçülerinde çelik levhalardan oluşmaktadır.

## 2.2. Tuğla Bina Modelleri

### 2.2.1. Ön deney Modeli

Türkiye'deki üniversitelerin çok azında bulunan 4x4 m boyutlarındaki sarsma masası olanakları oldukça önemli bir konuma sahiptir. Tecrübe ve bütçeye bağlı olarak deneyler öncesi gerçekleştirilecek ön deneyler çalışmanın amacına ulaşması ve istenilen bulguların sağlıklı bir şekilde elde edilmesi ve değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Asıl deneylere ışık tutacak, laboratuvar modellerinin tasarımı, yapısal tepkilerin anlaşılması ve deney düzeneğinin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ön deney olarak sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

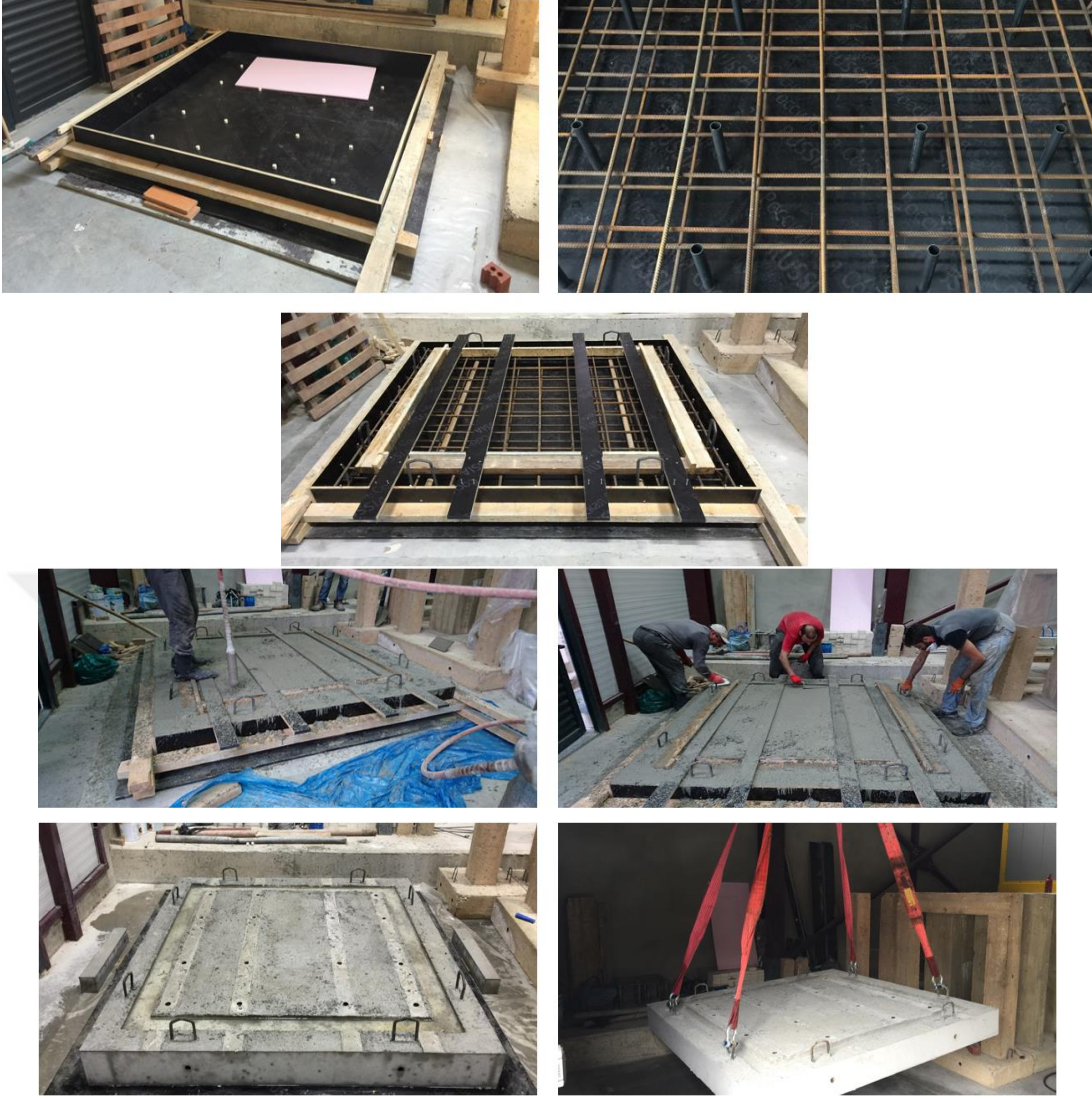
Ön deney laboratuvar modeli benzerlik yasalarına göre oluşturulmuştur. Cauchy benzerlik yasaları ve Froude benzerlik yasaları, ölçekli modeller için yaygın olarak kullanılır. Froude benzerlik yasaları atalet ve yerçekimi kuvvetleri arasındaki ilişkiyi verirken, Cauchy yasaları atalet ve elastik geri yükleme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi verir [42]. Froude benzerlik yasaları nedeniyle ek kütleler gereklidir. Bu çalışmalarda her iki kanunun da uygulanması olumludur. Ancak ek kütleler ön deneyler için kullanılmamıştır. Bu çalışmada çoğu çalışmada tercih edilen sadece Cauchy benzerlik yasaları kullanılmıştır [39, 42, 43, 196]. Model boyutları sarsma masasının boyutlarına ve kapasitesine göre oluşturulduğundan ölçek faktörü ½ kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ölçekli yığma

modelin geometrik boyutları ve ölçek faktörleri, Saleem ve ark. [42]'nin çalışmalarından alınmıştır.

Bu deney kapsamında ülkemizin yapı stoğunda sık kullanılan düşey delikli tuğla kullanılmıştır. Ön deney modeli olarak ½ ölçekli tek açıklıklı ve tek katlı yığma duvar modeli tasarlanmıştır. Kuzey ve güney yönlerindeki duvarlarda sırasıyla kapı ve pencere boşlukları bulunmaktadır. Ön deney, hasar öncesi dinamik karakteristikler için DMA yöntemini, sarsma masası deneylerini ve her hasar durumundan önce ve sonra DMA yöntemi ile yapı dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi çalışmalarını içermektedir.

### 2.2.1.1. Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları

Ön deney modelinin üretimi delikli tuğla ile 1/2 ölçekli olarak KTÜ Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney modellerinin üretimi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 2.1x2.1x0.2 m boyutlarında betonarme temel üretilmiştir. Daha sonra taşıyıcı yığma duvar üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise 1.8x1.8x0.1 m ölçülerinde betonarme döşeme üretilmiştir. İlk önce yığma yapı modelinin temel kalıpları uygun ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır. Kenarlardan 5cm, alt ve üstten 2,5 cm paspayı bırakılarak çift yönlü ve alt üst donatı olmak üzere 44 adet 14 mm çapında S420 donatı çubuğu temel kalıbı içerisine yerleştirilmiştir. Yığma modelin temelden sarsma masasına sabitlemek için sarsma masası üzerindeki tij yuvalarına uyumlu ölçüde ve simetrik bir biçimde 16 adet 25 mm çapında boşluklar bırakmak için plastik borular kullanılmıştır. Temel yüzeyinde, taşıyıcı duvardaki ilk sırada bulunan birim elemanların geleceği alan, yapının en kesiti ölçülerinde boşluk bırakılması için tahtalar kullanılmıştır (Şekil 2.6). Duvarlar, sabit sınır koşulunu temsil etmek için temele 2-3 cm olacak şekilde gömülmüştür (Şekil 2.7). Bu uygulama, test sırasında modelin tabanından kaymayı/kesmeyi önlemek için yapılmıştır. Hazır beton santrallerinden temin edilen beton ile temel betonu dökülmüştür. Döküm esnasında küp ve silindir numuneler malzeme deneyi için alınmıştır. Beton dökümüne ait görseller Şekil 2.8'de verilmiştir.

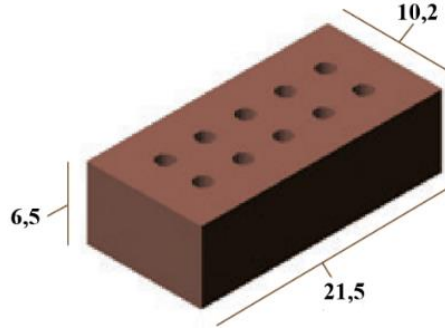


Şekil 2.6. Modelin kalıp hazırlanmasına ait görüşler ve beton dökümü



Şekil 2.7. İlk duvar birimlerin temele gömülmesi

Tüm kalıp işlemlerinde plywood malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme modelde daha düzgün ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için kullanılmıştır. Temel beton dökümünden sonra betonun priz alması beklenmiş ve ilk sıra yığma birim elemanların geleceği bölgedeki ahşap çıkarılmıştır. Beton dökümünden 28 gün sonra delikli tuğla yığma duvar imalatına geçilmiştir. Delikli tuğla, üretici firmadan temin edilen NT tipi taşıyıcı özellikteki 10 cm kalınlıktaki %23 boşluklu birim elemanlardan oluşmaktadır. Fabrika üretim ölçüleri bizim kullandığımız yarım ölçekli birim elemana uygundur (Şekil 2.8). Duvar imalatına hazır olan duvar birim elemanlar ile 1800x1800x1500mm ölçülerinde tek açıklıklı ve tek katlı yığma model duvarı üretilmiştir. Kuzey duvarında 0.45 x 1 m ölçülerinde standart bir kapı açıklığı bulunmaktadır. Güney duvarında 0.45 x 0.55 m ölçülerinde bir pencere açıklığı bulunurken, doğu ve batı duvarlarında boşluksuz dolu bir duvar kullanılmıştır. Bu boşlukların üzerinde duvarın devam etmesini sağlamak amacı ile betonarme lentolar kullanılmıştır. Bir kat yüksekliği boyunca 22 sıra delikli tuğla ve bağlayıcı eleman olan A tipi harç için ise hacimce 1/3 oranında çimento/kum karışımı kullanılmıştır. Harçların kullanıldığı derz kalınlıkları 7.5 mm civarındadır. Birim elemanların yerleştirildiği ilk sıra temele gömülmesi için temel yüzeyinde hazırlanan yuvaya ilk tuğla elemanlar yerleştirilmiştir ve harç ile temele gömülmüştür. Şekil 2.9’da duvar üretimine ait ayrıntılı görseller sunulmuştur.



Şekil 2.8. Yarım ölçekli boşluklu tuğla birim eleman görünüşü ve boyutları (cm)

Taşıyıcı duvar imalatından 7 gün sonra döşeme kalıp çalışmalarına başlanmıştır. Model içine düzgün bir şekilde yerleştirilen 5x10 cm’lik dikmeler ile döşeme kalıbı sabit tutulmuştur. Döşeme kalıbı hazırlığı bittikten sonra döşeme yüzeyi düzgün ve pürüzsüz olması için yağlanmıştır. Döşeme kalıbı imalatına ait görseller Şekil 2.10’da verilmiştir. Bu tez kapsamında hatıl imalatı yapılmadığı için döşemenin duvardan sabit sınır koşulunu

sağlaması için belli aralıklarla döşeme donatılarının uç kesimleri bükülerek tuğla deliklerinin içerisine geçirilmiştir. Bu işlemin yapılma sebebi döşemenin duvardan kesme/kayma durumunu minimize etmektir. Kenarlardan 5cm paspayı bırakılarak çift yönlü olmak üzere toplamda 24 adet 8 mm'lik boyuna donatılar kalıp içine yerleştirilmiştir. Döşeme donatı çalışması tamamlanmış modele ait resimler Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.9. Delikli tuğla duvar örümü



Şekil 2.10. Döşeme kalıp üretimi



Şekil 2.11. Döşeme donatı uygulaması



Şekil 2.12. Ön deney model döşeme beton dökümü ve inşası tamamlanmış model

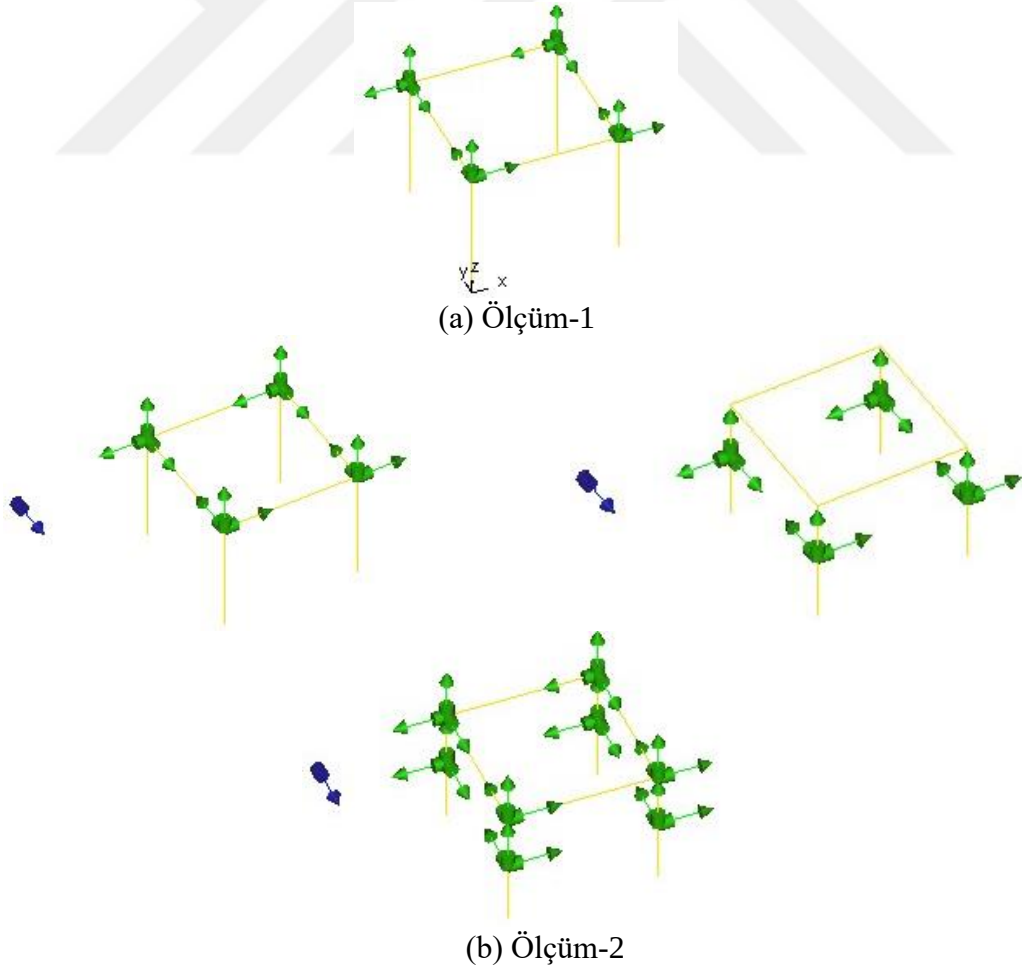
Son işlem olan döşeme beton dökümü ve inşa aşaması tamamlanmış ve teste hazır durumda olan ön deney yığma modele ait görseller Şekil 2.12’de verilmiştir.

#### **2.2.1.2. Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi**

Ön deney tuğla modeli inşa süresi boyunca ve üretim bittikten sonra uygun kür koşullarında model sulanmıştır. Dayanımını kazandıktan sonra hasarsız durumları için dinamik davranışlarını elde etmek için Çevresel Titreşim Yöntemi-Deneysel Modal Analiz (ÇTY-DMA) yöntemi uygulanmış ve dinamik parametreler (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar modellerinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için kullanılan DMA yönteminde frekans aralığı 0,3–2000 Hz olan dört adet B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçer, 1 adet B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçer, B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama sistemi, PULSE (2006) [90] ve Operational Modal Analysis (OMA) [91] yazılımı kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında üretilen modellerin dinamik karakteristiklerini elde etmek için yapılan deneysel ölçümlerde ortamda herhangi bir çevresel etki (rüzgâr, taşıt vb. titreşimler) bulunmadığından yapıya titreşim vermek için darbe çekiçleri kullanılmıştır. İnşa edilen modellerin deneysel ölçümler için veri toplama ünitesine tanıtılmamış olan darbe çekicinden gelen etki, sistemde doğal bir etki gibi ele alınmıştır. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama sistemi ivmeölçerlerden gelen verileri toplayarak PULSE (2006) [90] yazılımına aktararak işlenebilir hale getirilmektedir. Bu veriler daha sonra OMA yazılımı ile işlenmiş ve Geliştirilmiş frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemlerine göre laboratuvar modellerin dinamik parametreleri elde edilmektedir. Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmaların büyük bir kısmında ele alınan GFOA yöntemi dikkate alınmıştır. Çevresel titreşim testleri her model için benzer koşullarda ve aynı cihazlarla gerçekleştirilmiştir. Her model için ölçüm deneylerinde frekans aralığı 0-100 Hz olarak seçilmiştir.

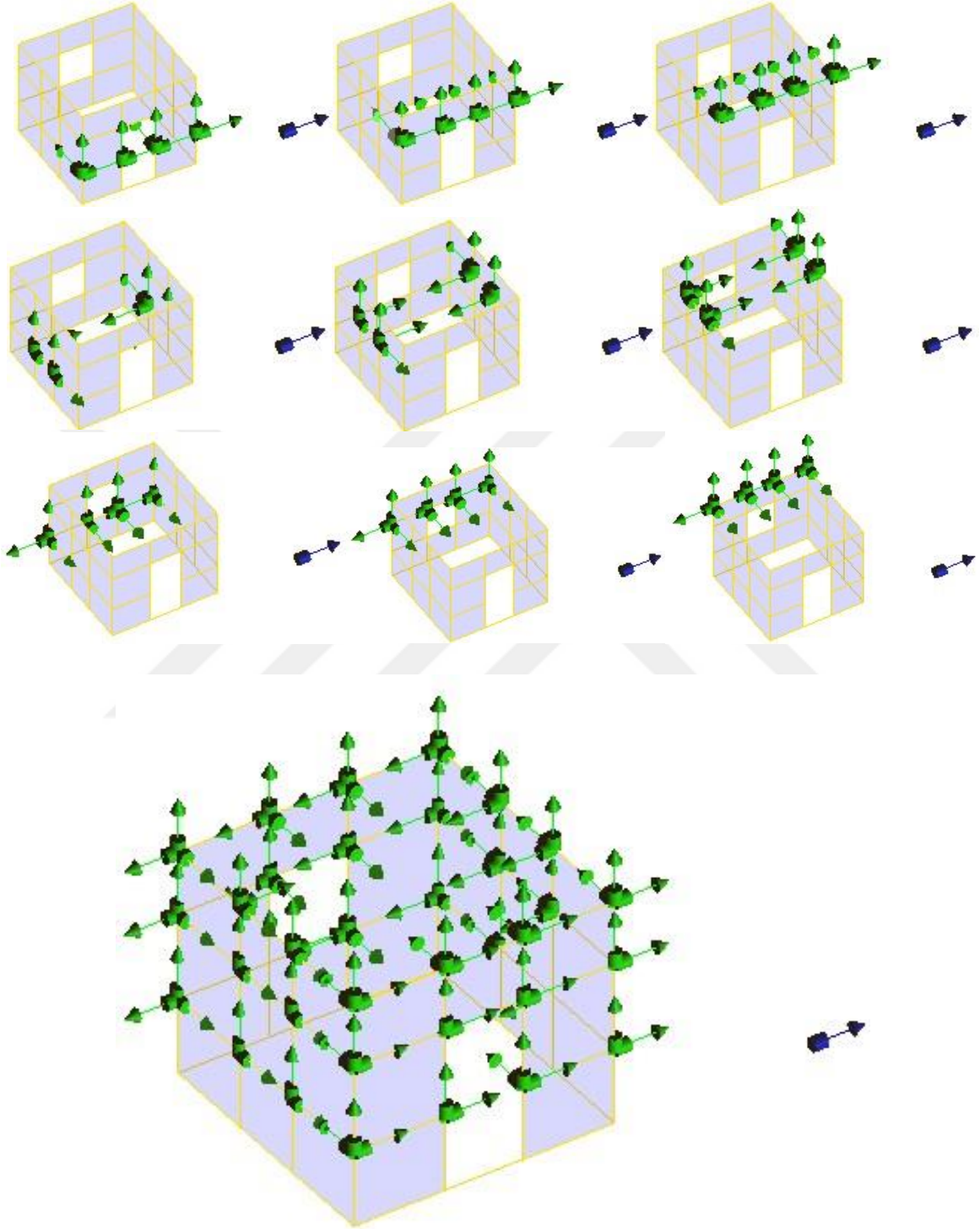
Model üzerinde çevresel titreşim ölçümlerinin hangi noktalardan alınacağı dinamik davranışının belirlenmesinde önemli bir etkidir. Bu bağlamda analitik olarak modellerin muhtemel mod şekilleri elde edilmiş ve bu mod şekillerine bağlı olarak yapının hareket noktalarından ölçümler alınmıştır. Yapının üst bölgeleri ivmeölçer yerleri olarak ele alındığında döşeme ve tuğla üzerinden olmak üzere iki farklı yerden ölçüm alınmıştır ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden çalışma kapsamında sadece yığma birim

üzerinden alınan ölçümler dikkate alınmıştır. Deneysel ölçümler incelendiğine yatay doğrultuda boyuna ve enine olmak üzere her iki yönde ve burulma mod şekli elde edilmiştir. Yığma model üzerinden, dinamik karakteristiklerin daha net bir şekilde incelenmesi için DMA ölçümleri 3 farklı şekilde alınmıştır. Ölçüm 1 için 4 adet üç eksenli ivmeölçerler (B&K 4506 B 003) kullanılmıştır. Modelin üst dört köşesine yerleştirilen ivmeölçerler kullanılmıştır. Ölçüm 2’de ise 8 adet ivmeölçer kullanılarak ölçüm alınmıştır. Fakat laboratuvar bünyesinde 4 adet üç eksenli ivmeölçer bulunduğu için referanslı ölçüm alınmıştır. Ölçüm 2, bina üst köşelerinden ilk ölçümü aldıktan sonra ivme ölçerler bina orta yüksekliğine taşınmıştır ve ikinci aşama gerçekleşmiştir. Ölçüm 2 ve ölçüm 3 için tek eksenli ivmeölçer (B&K 4507 B 005) referans olarak kullanılmıştır. Ölçüm 3, 36 ivmeölçer yeri kullanılarak 9 aşamada referanslı olarak gerçekleşmiştir. Tüm bu ölçümlere ait PULSE yazılımında oluşturulan model ve ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 2.13’te şematik olarak verilmiştir. Ölçümlerin alınmasına ait görseller ise Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.13. Ölçümlere ait ivmeölçer dizilimi

Şekil 2.13'ün devamı

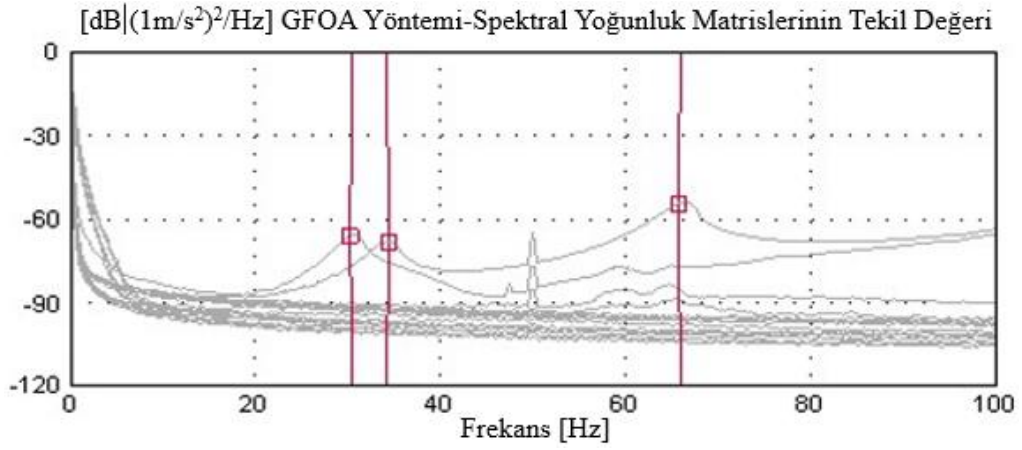
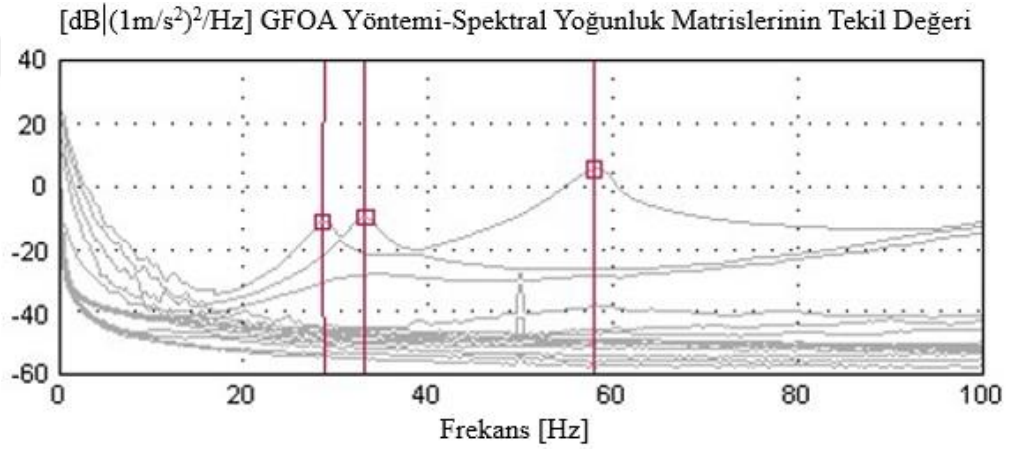
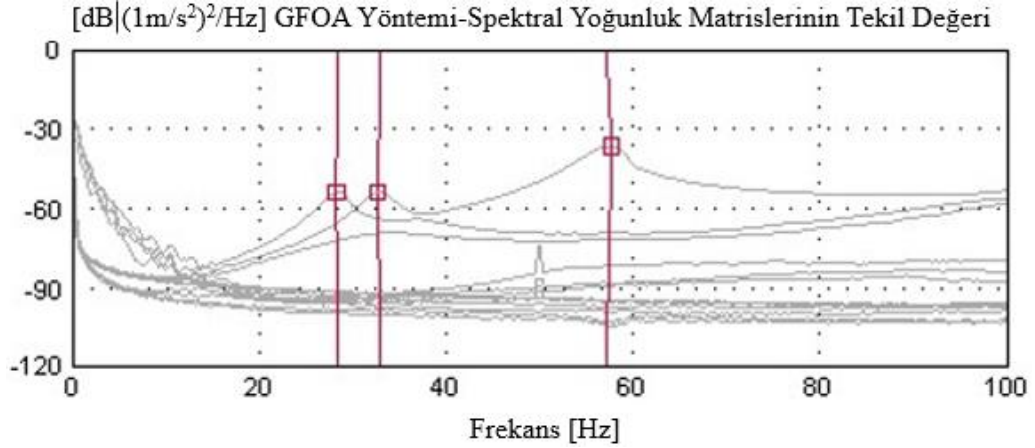


(c) Ölçüm-3

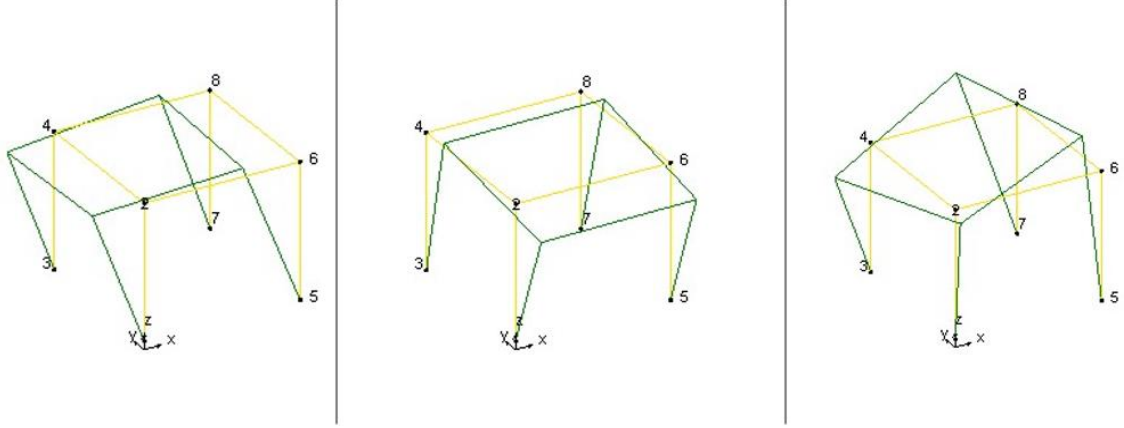


Şekil 2.14. DMA ölçümlerine ait görseller

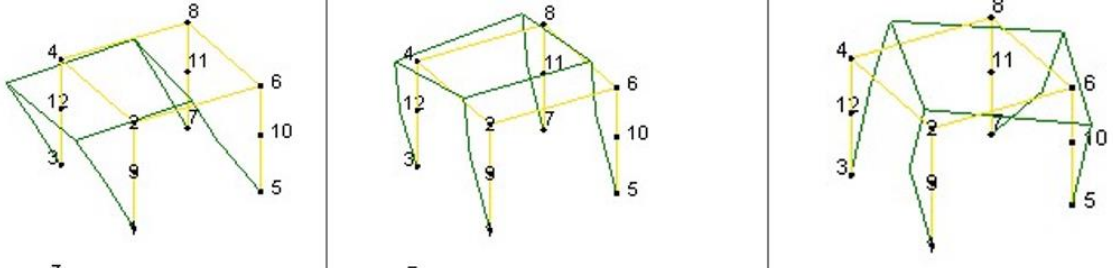
Ön deney için verilen hasarsız dinamik karakteristikler sarsma masasına yerleştirilmeden önce yerde alınan ölçümlerdir. Tuğla model binanın çevresel titreşim testlerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması ile elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin grafiği 3 ölçüm içinde şekil 2.15'te verilmiştir. Bu grafiklerdeki pik yapan değerler yapısal modları vermektedir. Yazılımda bu piklerin seçilmesi ile dinamik karakteristikler (doğal frekans, sönüm oranları, mod şekilleri) hesaplanmaktadır. Laboratuvar modelleri için dinamik karakteristikler ilk üç mod için dikkate alınmıştır. Tuğla için elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.16'da verilmiştir. Laboratuvar modelleri simetriktir ve bu nedenle mod şekillerinin daha iyi anlaşılabilmesi için enine mod, doğu-batı doğrultusunu ve boyuna mod ise kuzey-güney doğrultusunu ifade etmektedir.



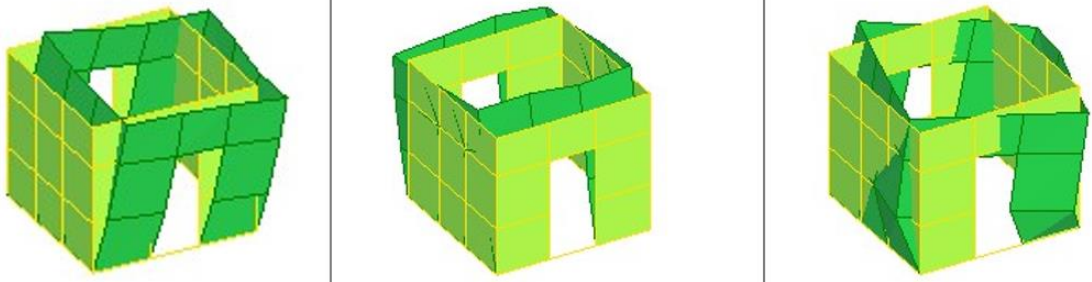
Şekil 2.15. Ön deney tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



Ölçüm-1



Ölçüm-2



Ölçüm-3

Şekil 2.16. Ön deney tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Ön deney tuğla model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.9’de verilmektedir. Tablo 2.9 incelendiğinde ön

deney numune model için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla ölçüm-1 için 28.42-57.12 Hz ve %2.928-3.885 arasındadır. Ölçüm-2 için ise doğal frekans ve sönüm oranı 28.79-57.98 Hz ve %2.933-3.637 arasında elde edilmiştir. Ölçüm-3 için ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 30.53-66.03 Hz ve %2.432-3.418 arasında olduğu görülmektedir.

Tablo 2.9. Ön deney tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler

| Mod No.    | Ölçüm-1         |                    | Ölçüm-2         |                    | Ölçüm-3         |                    |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|            | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) |
| 1(Enine)   | 28.42           | 3.328              | 28.79           | 3.065              | 30.53           | 2.48               |
| 2(Boyuna)  | 32.89           | 3.885              | 33.14           | 3.637              | 34.17           | 3.418              |
| 3(Burulma) | 57.12           | 2.928              | 57.98           | 2.933              | 66.03           | 2.432              |

### 2.2.1.3. Sarsma Masası Deneyleri

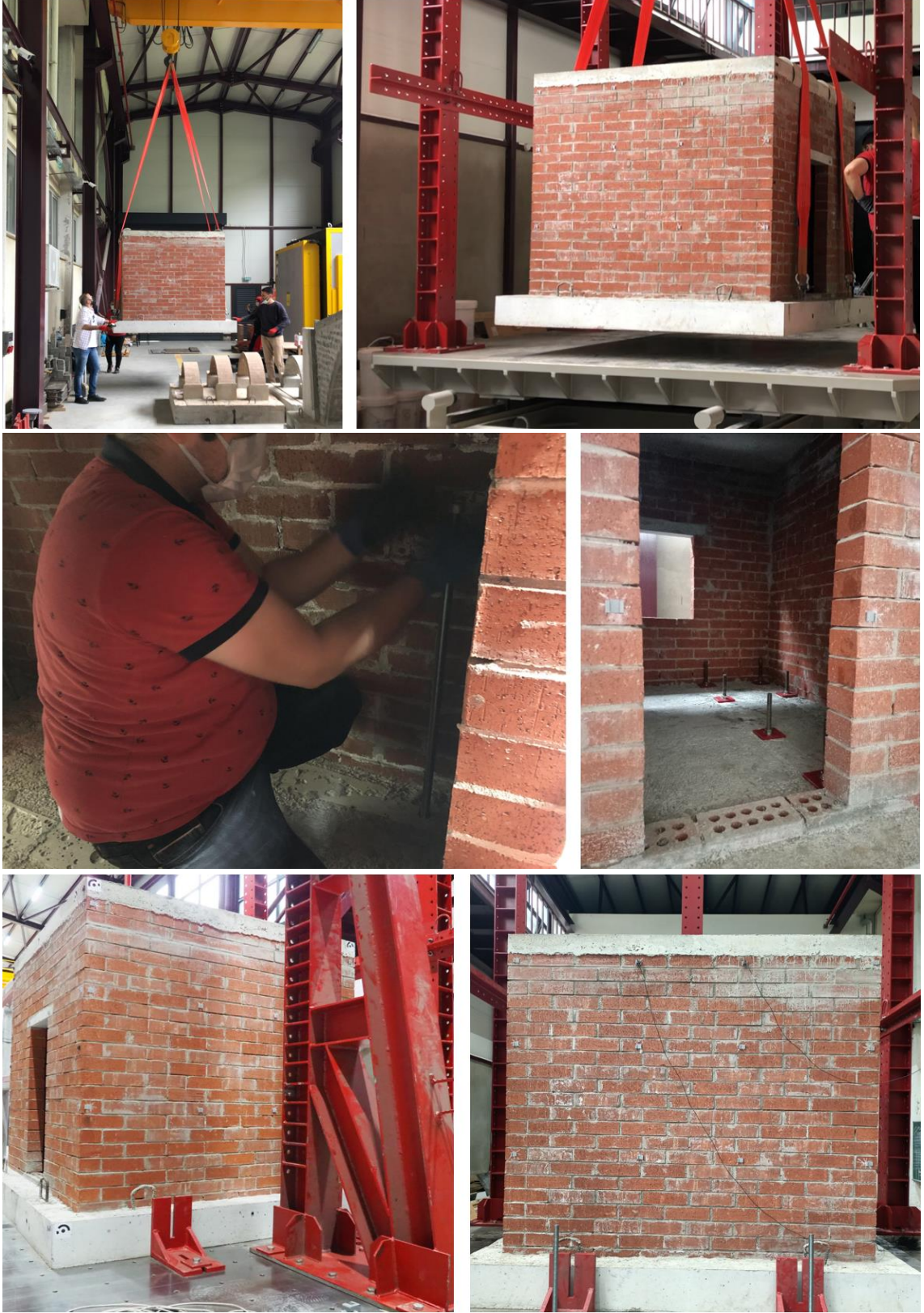
Ölçekli tuğla binanın deprem davranışının incelenebilmesi amacıyla sarsma masası deneyleri uygulanmıştır. Sarsma masasının temel çalışma prensibi, rijit tablaya bağlı numuneyi istenilen ivme fonksiyonu ile titreştirmektir. Sismik uyarılar, gerçek deprem kayıtları veya yapay uyarılar olabilir. Sarsma masası boyutlarının ve yükleme kapasitesinin sınırlamaları nedeniyle, genellikle ölçekli test numuneleri kullanılır. Sismik uyarılmaların yapılarda ve yapı elemanlarında neden olduğu iç kuvvetler ve deformasyonlar sarsma masası deneylerinde doğru bir şekilde belirlenebilir.

Bu çalışmada, inşa edilen test modelinin yapısal performansı ve hasar durumları, artımlı yer hareketleri dikkate alınarak tek eksenli bir sarsma masası kullanılarak belirlenmiştir. Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde bulunan bu sarsma masası 4×4 m ebadında rijit çelik platform ile 35 ton taşıma kapasiteli bir sisteme sahiptir. Farklı hasar durumlarını elde etmek için seçilen sismik uyarılar yapıya artımlı olarak uygulanmıştır. Altı farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir. Yer hareketi verileri için geçmiş depremlerden ve sinüs dalgalarından elde edilen kayıtlar kullanılmıştır.

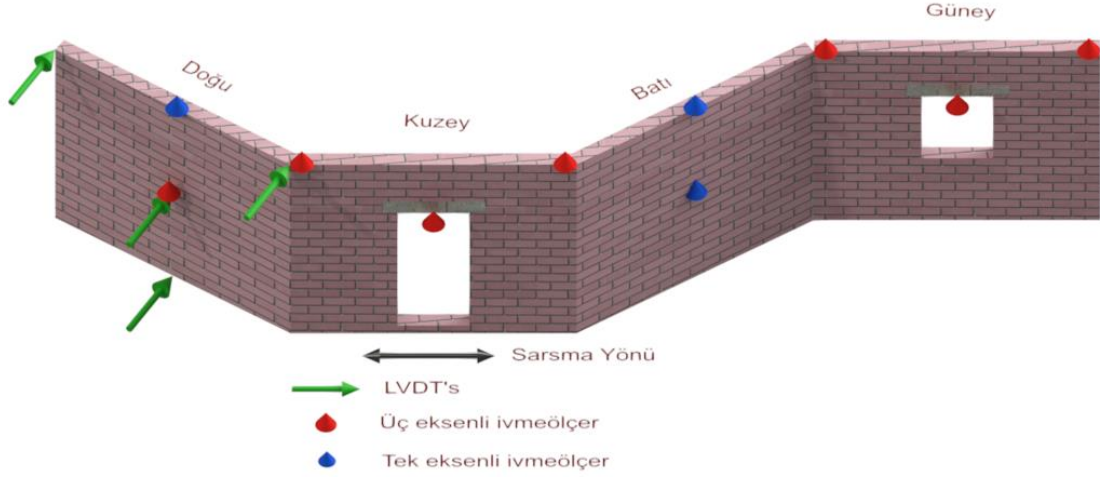
### 2.2.1.3.1. Sarsma Masası Deney Kurulumu

Laboratuvar zemininde inşa edilen deney modeli daha sonra düz bir polyester kaldırma askısı ve tek kirişli bir gezer vinç kullanılarak sarsma masasına taşınmıştır. 16 adet M20 tij ile model sarsma masasına sabitlenmiştir. Mükemmel bir şekilde sabitlenmiş bir model sağlamak için yapı, her biri modelin hem doğu hem de batı tarafında ikişer adet açılı çelik köşebentler ile sabitlendi. Modelin sarsma masasına taşınması ve montajı ile ilgili görseller Şekil 2.17’de verilmiştir.

Sarsma masası deneyleri sırasında modelin genel ve lokal davranışını ölçmek için ivmeölçerler ve lineer potansiyometrik cetveller (LPDT) kullanıldı. Ayrıca ölçüm sistemlerinden elde edilen yapısal tepkiler işlenerek hasarlarla ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla, uygulanan ve ölçülen sismik uyarımları karşılaştırmak için sarsma masasının rijit platformuna çift eksenli bir ivmeölçer sabitlenmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller arası atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başlangıcının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu nedenle, test numunesinin farklı bölgelerine birçok ivmeölçer yerleştirilmiştir. Doğuya ve batıya bakan duvarlarda düzlem dışı tepkiyi ölçmek için üç adet tek eksenli ivmeölçer kullanıldı. Test modelinin farklı yüksekliklerinde ve bölgelerinde düzlem içi ve düzlem dışı yapısal tepkileri izlemek için yedi adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirildi. Titreşim yönünde test numunesinin yüksekliği boyunca görelî yer değiştirmeler ve sürüklenme oranlarındaki değişiklikler dört adet LPDT ile izlendi. Bunlardan biri temel seviyesinde ve diğeri orta yükseklikte yerleştirilmiştir. Diğeri ikisi çatı seviyesinde bulunuyordu. Sarsma masası deneyleri sırasında oluşabilecek olası burulma tepkileri de çatı hizasına yerleştirilmiş iki adet LPDT ile izlenmiştir. Şekil 2.18, ivmeölçerlerin ve LPDT’lerin düzenini göstermektedir.



Şekil 2.17. Deney modelinin sarsma masasına taşınması ve montajı



Şekil 2.18. LPDT ve ivmeölçer konum ve doğrultuları

Ön deneyde de esas deneylerde düşünülen deney düzeneği dikkate alınmıştır. Fakat sonuçlar incelendiğinde bazı ölçüm cihazlarının yerlerinin değiştirilmesi ve ilave ölçüm cihazları eklenmesi gerekli görüldü. Ayrıca ön deneyde esas deneylerden farklı olarak kat kütleleri dikkate alınmamıştır. Ön deneyler için tasarlanan deney düzeneğine ait resimler Şekil 2.19’da verilmiştir.

Literatürde hem geçmiş depremlerden kaydedilen ivme kayıtları hem de sinüs dalgaları, yığma yapıların sismik performansını değerlendirmek için sarsma masası deneylerinde araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir [195, 203-206]. Sarsma masasının kapasitesi, sismik yükleme koşullarını seçmek için önemli bir rol oynar. Geçmiş depremlerden kaydedilen ivme kayıtları ile yapılan bazı deneylerde, en yüksek yer ivmeleri (PGA) ve en yüksek yer hızı (PGV) gibi giriş genlikleri, sarsma masasının kapasite sınırına ulaşsa bile, test numuneleri beklenildiği gibi ciddi şekilde hasar görmez. Bu durumda test prosedürlerine sinüs dalgası uyarımları eklenebilir [207]. Ayrıca, bu basit uyarımlar, test sonuçlarının ve sayısal modellemenin daha anlaşılır olması için yapısal yanıtı basit tutmada avantajlar sağlar [208]. Bu nedenle, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında yer hareketi girdisi verileri için geçmiş depremlerden ve sinüs dalgalarından kaydedilen ivme kayıtları kullanılmıştır.

Farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun artırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Bu süreçte yoğunluk ölçüsü olarak PGA değerleri dikkate alınmıştır. Test için farklı PGA'ya sahip üç farklı doğal yer hareketi seçilmiştir [209,210]. Sarsma masası testi için doğal yer hareketleri aşağıdakilerden oluşmaktadır: (i) Newhall- W Pico Canyon Rd'den alınan 1994 Northridge

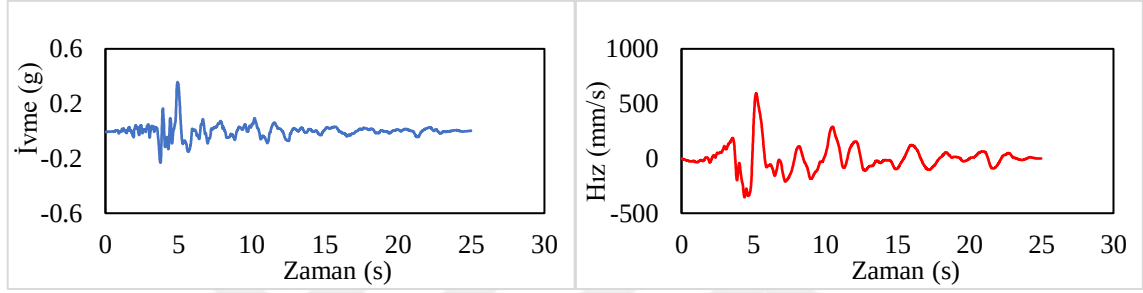
Depremi ivme kaydı (PGA=0.35g), (ii) 1979 Coyote Lake Depremi'nden bir kayıt (PGA=0.42g), (iii) 2004 Parkfield Depremi sırasında Fay Bölgesi 1 istasyonundan alınan ivme kaydı (PGA=0.60g). Bu ivme kayıtları, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi Veri tabanından (PEER, 2021) alınmıştır. Ayrıca genliği 50mm, frekansı 2.00Hz ve 0.80g olan üç sinüs dalgası farklı döngüler dikkate alınarak uygulanmıştır. Afreen ve ark. [211], faya yakın (NF) yer hareketlerinin, uzak fay yer hareketlerine kıyasla tuğla yığma binaların yapısal tepkilerini önemli ölçüde artırdığını buldu. Bilgin ve Hysenliu [212], yığma yapılarda hasar potansiyelini artırmada NF yer hareketlerinin önemli bir rol oynayabileceğini bildirmiştir. Bu nedenle, doğal yer hareketleri NF etkilerini içerecek şekilde seçilmiştir. Bu amaçla, üç kriter dikkate alınarak doğal kayıtlar seçilmiştir: (i) PGV'nin PGA'ya oranının 0,1 saniyeden büyük olması; (ii) görünür hız darbe sinyallerine (hız darbe süresi ( $T_p$ ) 1.0s'den büyük) sahip bir fayın yakınında seçilen yer hareketi; (iii) 10 km'den küçük yer hareketlerinin Joyner-Boore mesafesi ( $R_{jb}$ ) [213-217]. Ayrıca, süre karakteristiği yer hareketi seçim sürecinin önemli bir parçasıdır. Yığma yapıların sismik davranışı üzerine daha önce yapılan deneysel çalışmalarda, kısa anlamlı süre ile karakterize edilen yer hareketleri tercih edilmiştir [205, 218]. Chandramohan ve ark. [219], Todorov ve Billah [220], önemli  $D_{55-75} < 25s$  süreli ivme kayıtlarını kısa süreli yer hareketleri olarak sınıflandırdı. Bu nedenle, seçilen doğal yer hareketlerinin önemli süreleri ( $D_{55-75}$ ) 0.89s ile 3.79s arasındaydı. Sarsma masası deneyleri için girdi sismik uyarımlarının belirlenmesinde bir diğer önemli konu da yerel zemin durumudur [44]. Ancak yukarıda belirtilen NF ve kısa süreli kayıt kriterlerini karşılamak ve sarsma masası kapasitesine uygun kayıtlar seçmek için farklı zemin sınıflarından doğal yer hareketleri elde edilmiştir. Tablo 2.10, geçmiş depremlerden seçilen yer hareketlerinin test sırasını ve özelliklerini özetlemektedir. Son yer hareketi olan sinüs (10 çevrim) ikinci kez uygulandı ve yapı göçmüştür. Şekil 2.20, deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve tepki spektrumlarını (%5 sönüm oranı için) göstermektedir.



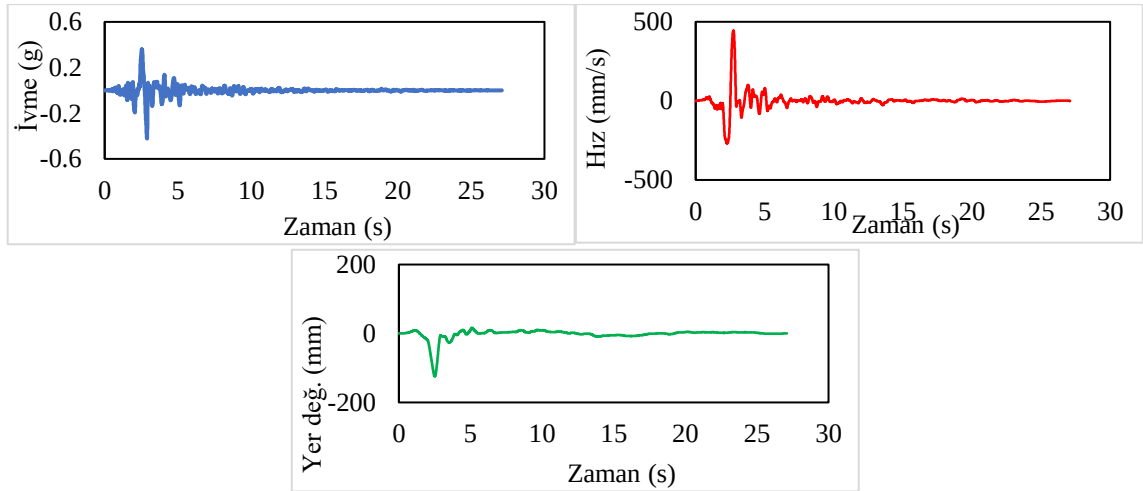
Şekil 2.19. Ön deney için kurulan deney düzeneğine ait görseller

Tablo 2.10. Uygulanan yer hareketleri

| No   | Deprem            | İstasyon            | PGA<br>g | PGV<br>cm/s | PGV/PGA<br>s | PGD<br>cm | Mag. | $R_{jb}$<br>km | $V_{S30}$<br>m/s | $D_{S5-75}$<br>s |
|------|-------------------|---------------------|----------|-------------|--------------|-----------|------|----------------|------------------|------------------|
| GM-1 | Northridge        | W Pico Canyon Rd.   | 0.35     | 59.22       | 0.17         | 16.03     | 6.69 | 2.11           | 285.93           | 2.12             |
| GM-2 | Coyote Lake       | Gilroy Array #6     | 0.42     | 44.34       | 0.11         | 12.44     | 5.74 | 0.42           | 663.31           | 0.89             |
| GM-3 | Parkfield         | Park.- Fault Zone 1 | 0.60     | 63.77       | 0.11         | 8.46      | 6.00 | 0.02           | 178.27           | 3.79             |
| GM-4 | Sinüs (4 çevrim)  |                     |          |             |              |           |      |                |                  |                  |
| GM-5 | Sinüs (6 çevrim)  | -                   | 0.80     | -           | -            | 5.00      | -    | -              | -                | -                |
| GM-6 | Sinüs (10 çevrim) |                     |          |             |              |           |      |                |                  |                  |



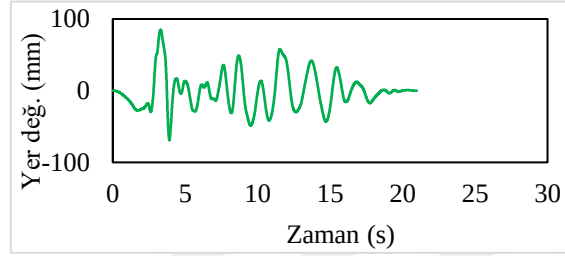
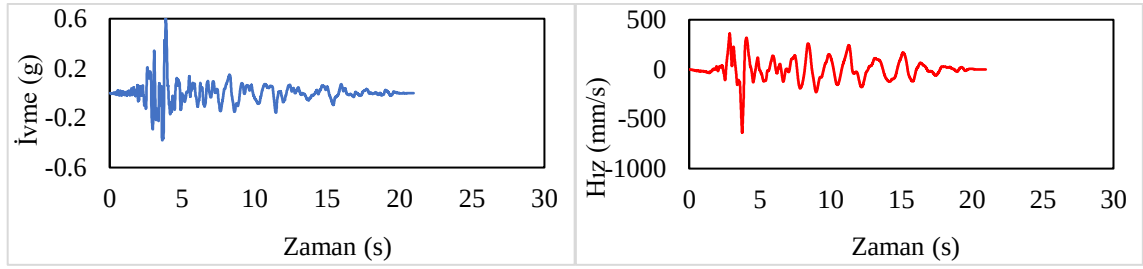
(a) Northridge depremi



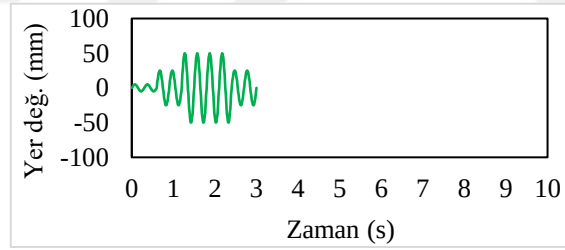
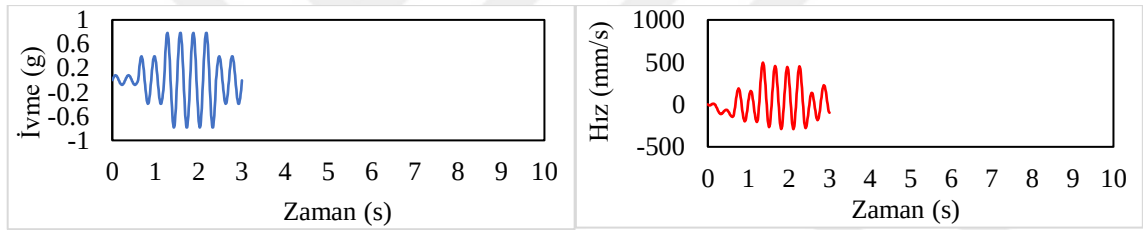
(b) Coyote Lake depremi

Şekil 2.20. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri

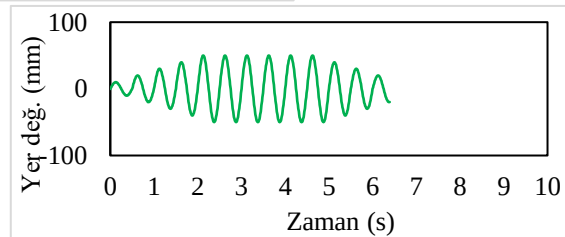
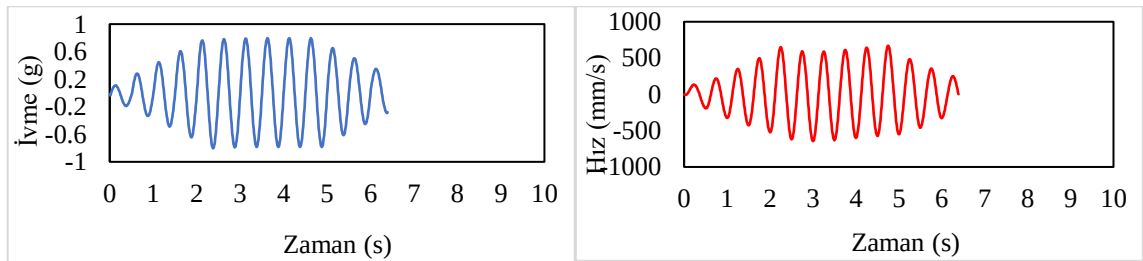
Şekil 2.20'nin devamı



(c) Parkfield depremi

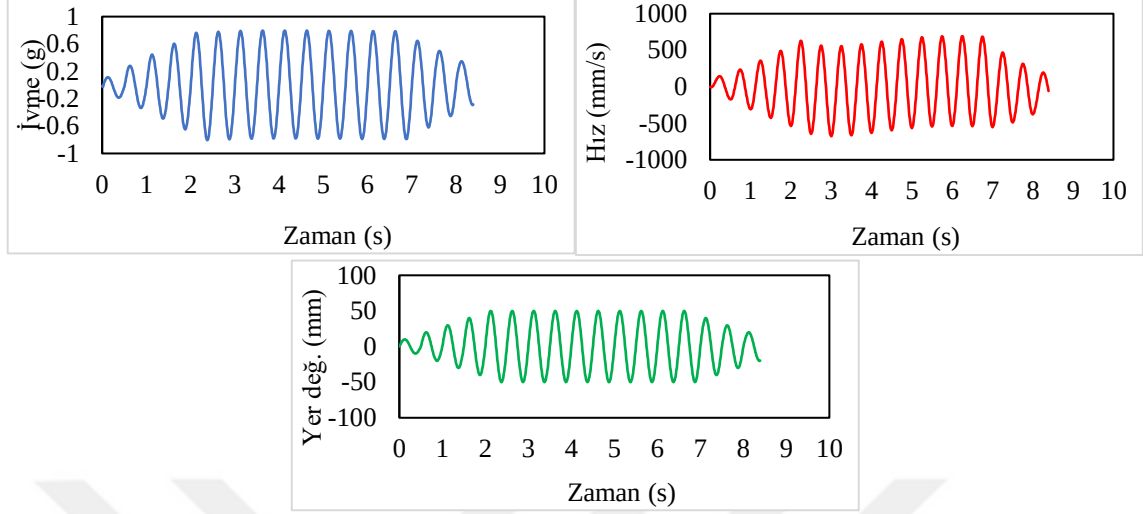


(d) Sinüs (4 çevrim)

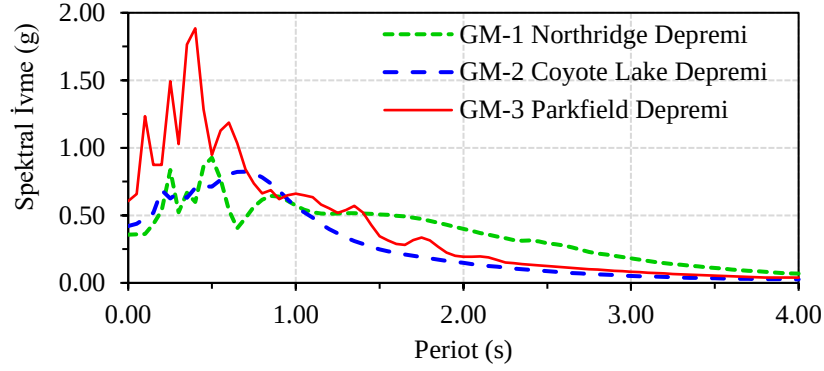


(e) Sinüs (6 çevrim)

Şekil 2.20'nin devamı



(f) Sinüs (10 çevrim)



(g) Spektral ivme (%5 sönüm oranı için)

### 2.2.1.3.2. Deney Sonuçları

#### 2.2.1.3.2.1. Deney Sonrası Hasar Tespitleri

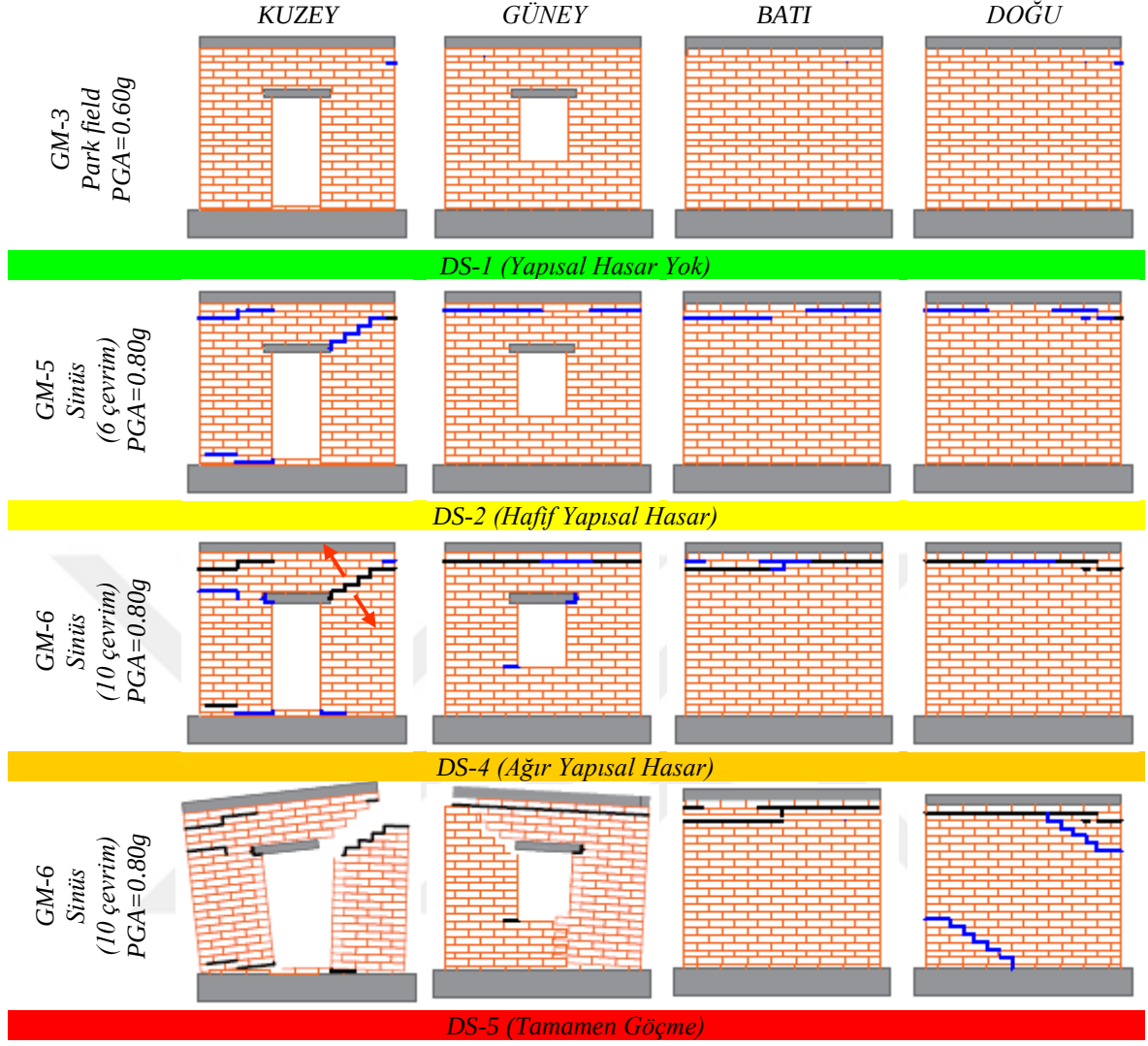
Her yer hareketinin sarsma masasına uygulanmasından sonra test numunesi görsel ve deneysel olarak incelenmiştir. Görsel gözlemlerde, test sonrası hasarı değerlendirmek için çatlak yayılımları duvarlarda işaretlendi. Hasarın deneysel olarak gözlemlenebilmesi için test numunelerinin hasarsız (başlangıç) ve hasarlı durumları için modal parametreler, test öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim yöntemleri ile belirlenmiştir.

Deney numunesindeki hasarın niteliksel bir tanımı için, Avrupa Makrosismik Ölçeği'nde (EMS-98) [81] tanımlanan hasar sınıflandırması dikkate alınmıştır. EMS-98'de yığma yapılara verilen hasar sınıflandırması için beş hasar durumu (DS) vardır. Bunlar: DS-

1, yapısal hasar yok; DS-2, hafif yapısal hasar; DS-3, yapısal elemanlarda orta derecede hasar; DS-4, ağır yapısal hasar ve kısmi hasar; DS-5, yapısal elemanların tamamen veya bölgesel çökmesi. EMS-98'e göre, bir yığma bina, duvarlarında kılcal çatlaklar gösteriyorsa, birkaç küçük sıva parçası ve binaların tepelerinden düşen gevşek birim elemanları varsa, DS-1 olarak sınıflandırılır. DS-2, birçok duvarında çatlakların olduğu, büyük sıva parçalarının döküldüğü ve bacalarının kısmen çöktüğü bir yapıda tanımlanır. DS-3 hasar durumu olarak tanımlanan yapı, çoğu duvarda geniş çatlaklar, çatı hattında baca hasarı ve yapısal olmayan tek elemanların çökmesini gösteriyor. DS-4, çok ağır çatlak modeline, çatlakların büyük ölçüde genişlemesine, kısmi çatı ve zemin çökmesine karşılık gelir. Son olarak, DS-5 binanın çökmesine karşılık gelir.

#### 2.2.1.3.2.2. Görsel Tespitler

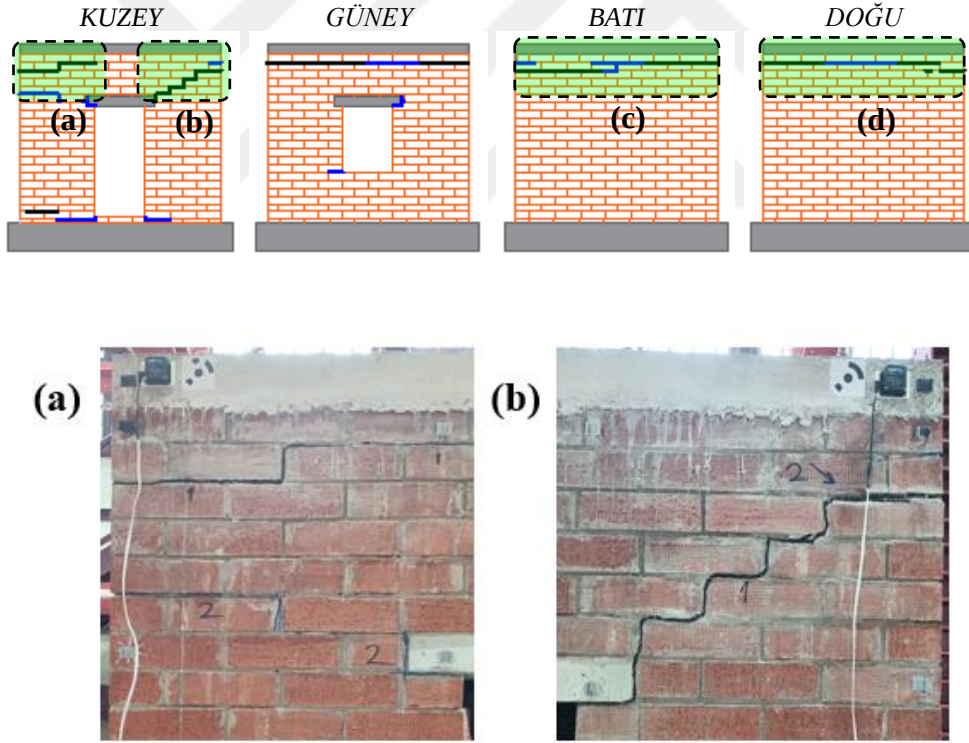
Şekil 2.21, DS-1 ve DS-5 arasındaki dış yüzlerden görüntülenen deney numunesinin çatlak ilerlemesini özetlemektedir. Siyah işaretler, geçmiş testlerden oluşan mevcut çatlakları temsil ederken mavi işaretler, deney sırasında gözlemlenen çatlaklarla ilişkilendirilir. Sarsma masası deneyi sırasında 0.35g ve 0.41g PGA'lara karşılık gelen ilk iki yer hareketinde herhangi bir bina yüzeyinde görünür çatlaklar gözlenmedi. Duvardaki ilk mikro çatlakların GM-3 Parkfield Depreminde (PGA=0.60g) ortaya çıktığı gözlemlendi. Bunlar kuzeye bakan duvarın çatı seviyesindeydi ve tam olarak gelişmemişti. Diğer duvarlarda gözle görülür bir çatlak yoktu. Dolayısıyla bu aşamadaki yapısal hasar DS-1 tipi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.21. Test numunesinin dış yüzeyinin kümülatif hasar modeli. Siyah ve mavi işaretler, sırasıyla mevcut ve yeni çatlakları temsil eder.

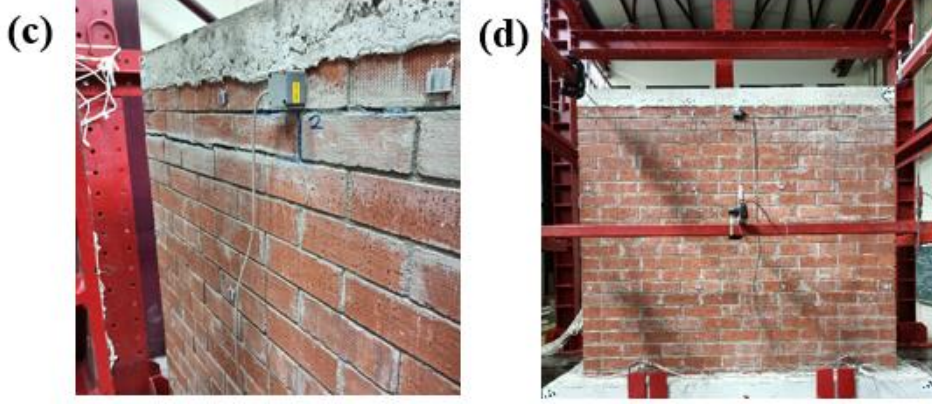
0.80g PGA'ya karşılık gelen dört ve altı çevrimli sinüs dalgaları ile yapılan sonraki deneylerde, mevcut mikro çatlakların önemli ölçüde genişlediği ve tüm dış yüzlerde birçok yenisinin oluştuğu gözlemlendi. Bu aşamada, çatlakların önemli bir kısmı yataya yakındı ve döşeme seviyesinin hemen altındaki ilk iki tuğla sırasındaki kayma hareketinden kaynaklandı. Yığma yapılar için önceki deneysel çalışmalarda benzer çatlak yayılmaları rapor edilmiştir [221]. Ayrıca düzlem içi deformasyon, kapının üst köşesinden çatı katına kadar uzanan kuzeye bakan duvarda çapraz bir çatlağa neden olmuştur. Bu diyagonal çatlaklar harç yatağı derzleri boyunca oluşmuştur. Yataya yakın ve diyagonal çatlağın artık genişlikleri 1 mm'den azdı. Bu nedenle yapısal hasar, EMS-98'e göre DS-2 tipi olarak sınıflandırılmıştır, çünkü birçok duvarda orta derecede hasar gözlenmiştir. Son deneyde

GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgasının ( $PGA=0.80g$ ) hareketi, duvarların üst kısmında bulunan mevcut çatlakların genişlemesine neden olmuştur. Temel seviyesinin hemen üzerinde ilk iki tuğla sırasında ve lento kirişleri çevresinde de kesme/kayma çatlakları gözlenmiştir. Sarsma deneyi sonunda, mevcut yataya yakın ve diyagonal çatlakların artık genişliklerinin önemli ölçüde artmadığı gözlemlendi. Ancak sarsma masası deneyi sırasında kaydedilen videolardan, kapının üst köşesindeki diyagonal çatlağın genişliğinde önemli artışlar olduğu gözlemlendi. Gözlemlenen durumda çatlaklar sarsma masası deneyleri esnasında açılıp kapanmaktadır. Test sırasında bu çatlak genişliklerinin santimetre mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle yapısal hasar DS-4 tipi olan ağır yapısal hasar olarak sınıflandırıldı. Hasarın DS-4'e ulaşması üzerine deney düzeneği üzerindeki ölçüm sistemleri (ivmeölçerler ve LPDT'ler) güvenlik amacıyla kaldırıldı. Şekil 2.22, dış yüzden bakıldığında DS-4 için test numunesinin son durumdaki hasar modelini göstermektedir.



Şekil 2.22. DS-4 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli: (a ve b) kuzeye bakan duvarda diyagonal çapraz çatlaklar ve (c ve d) üstte yataya yakın kayma çatlakları doğu ve batıya bakan duvarların bir kısmı

Şekil 2.22'nin devamı



Son deneyde DS-5 tipine bağlı yapısal hasarı elde etmek için GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası ( $PGA=0.80g$ ) hareketi binaya tekrar uygulandı. Bu aşamada, sismik uyarımların yönüne dik yerleştirilmiş doğuya bakan duvarlardaki düzlem dışı deformasyonlar göçmeyi başlatmıştır. Bu nedenle, test numunesinin statik kararlılığı bozuldu. Bu bozulmaya paralel olarak kapının üst köşesindeki kesme adımlı diyagonal çatlağın genişliği önemli ölçüde artmış ve sonunda deney numunesi çökmüştür. Bu sonuca göre ise yapı çökmesine karşılık gelen DS-5 tipi yapısal hasar düzeyi olarak belirlenmiştir

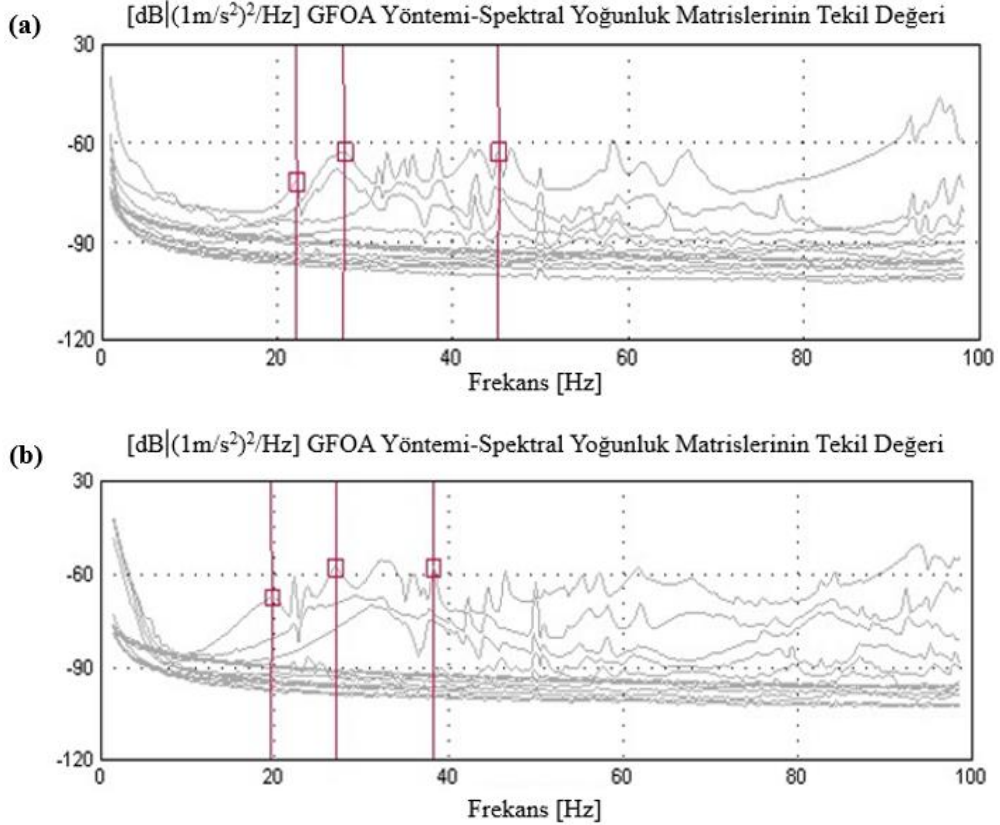
#### 2.2.1.3.2.3. Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, görsel gözlemlere ek olarak, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında oluşan hasar ile yığma yapının modal parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her sarsma masası deneyinden sonra ÇTY ile DMA yapılmış ve modal parametreler elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, hasar öncesi ölçümde dikkate alınan aynı ivmeölçer konumları ve ölçüm özellikleri kullanılarak tekrarlandı. Böylece elde edilen hasarsız ve hasarlı modal parametreler karşılaştırılarak hasarın modal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha önce verilen hasarsız modelin dinamik karakteristikleri yerde alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Fakat bu bölümde, model sarsma masasına yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır. Sarsma masasının yapı modal parametreleri (doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri) üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Frekans alanındaki GFOA yöntemi, deney numunesinin sistem tanımlaması için kullanıldı. GFOA sonucunda ilk üç doğal frekans ve mod şekli için veri setinin Spektral

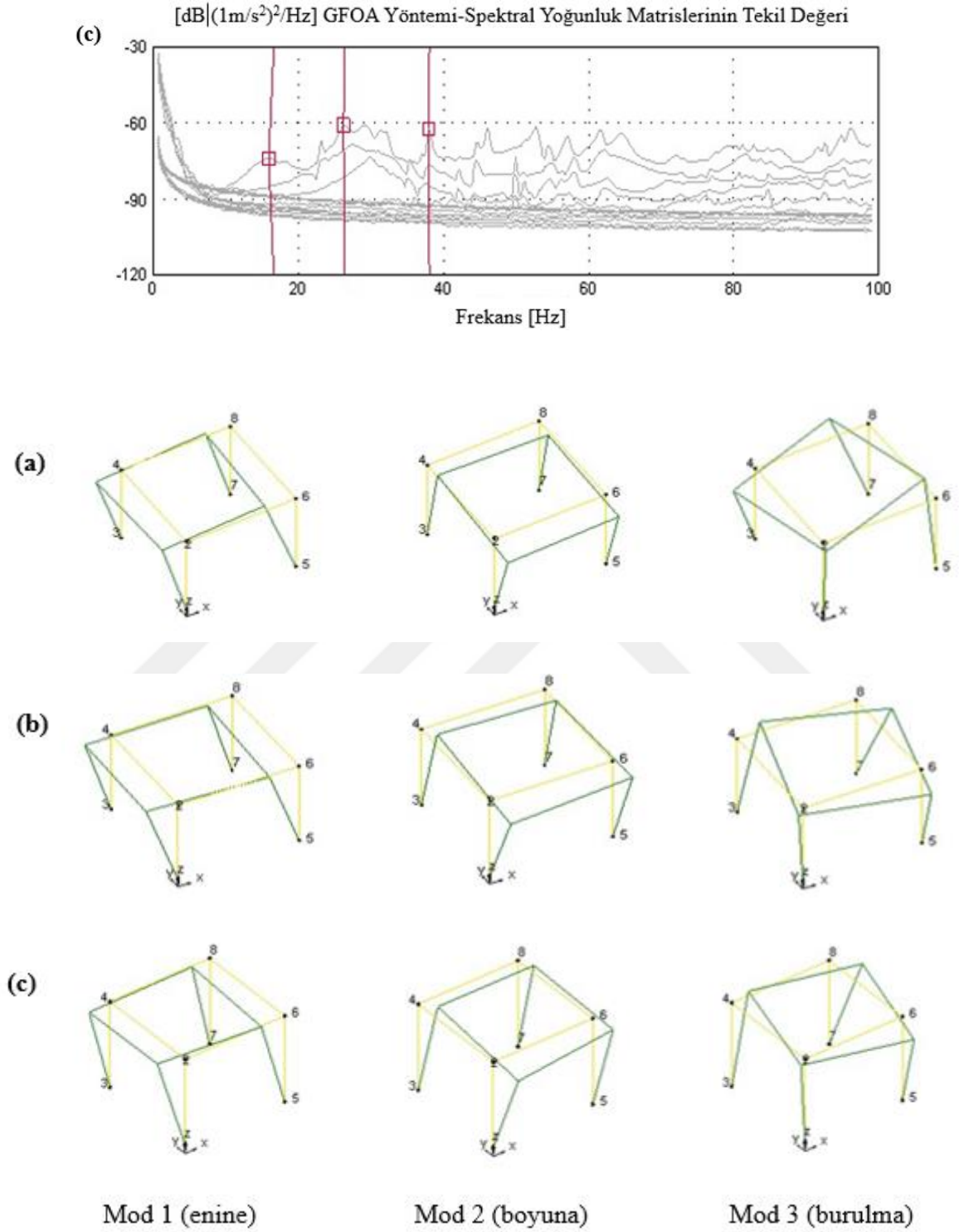
Yoğunluk Matrislerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 2.23(a), sarsma masasındaki modelin hasarsız durumunun Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafiğini göstermektedir. Ayrıca DS-2 ve DS-4 tipleri için hasar durumlarının Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafikleri şekil 2.23 (b) ve (c)'de verilmiştir. Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafikleri mod şekillerine göre seçildikleri için grafikler otomatik olarak seçilmektedir. Bu nedenle Şekil 2.23(c)'deki ilk mod için oluşan çizgi gibi düz bir çizginin oluşmama ihtimali vardır. Hasarsız durum için ilk üç doğal frekans sırasıyla 22.07Hz, 27.49Hz ve 45.16Hz olarak elde edilmiştir. Binanın ilgili mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.23'ten görülebileceği gibi, DS-2 ve DS-4 için hasarlı koşulların üç doğal frekansı enine mod için 19.51Hz/16.69Hz, boyuna mod için 27.06Hz/26.46Hz ve burulma modları için 38.28Hz/38.11Hz elde edilmiştir.

Şekil 2.24, ön deney ölçümlerinden ve hasarlı durumlardan (DS-2 ve DS-4 tipleri) elde edilen ilk üç mod şeklini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Yapının mod şekillerinin yapısal hasar ile belirgin şekilde değişmediği sonucuna varılmıştır. Her modun genliğinin farklı salınım genliklerine sahip olduğu da belirtilmelidir.



Şekil 2.23. Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) hasarsız durum için, (b) DS-2 için (hafif yapısal hasar) ve (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme)

Şekil 2.23'ün devamı



Şekil 2.24 Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) hasarsız durum için (b) DS-2 için (hafif yapısal hasar) ve (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme)

Yapı elemanları hasara maruz kaldıklarında rijitlikleri azalır. Bu, yapının kütlesi ve rijitliği ile doğrudan ilişkili olan dinamik karakteristiklerinde önemli değişikliklere neden olur. Ayrıca rijitlik dağılımındaki değişiklikler mod şekillerinde kırılmalara yol açabilir. Dinamik karakteristiklerdeki bu değişiklikler, inşaat mühendisliği yapılarının yapısal bütünlüğünün değerlendirilmesi için çok önemli bilgiler sağlar. Yapısal hasar ve dinamik özellikler arasındaki ilişki, doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümleme oranları kullanılarak ele alınabilir. Salawu [222], uygulama kolaylığı nedeniyle yapısal bütünlüğün değerlendirilmesi ve yapısal durum izleme için doğal frekanslardaki değişimlerin kullanılmasının yararlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca birçok yapıda hasar, doğal frekans kaymaları ile ilişkilendirilmiştir [223-226]. Bu nedenle, deney numunesinin hasarsız ve hasarlı durumları için tanımlanan deneysel doğal frekansların gelişimi Şekil 2.25'te özetlenmiştir. Artımlı dinamik testler sonucunda, duvarların üst ve alt kısımlarında çok sayıda çapraz ve yataya yakın çatlaklar görsel olarak gözlemlendi. Yapısal rijitliği azaltan bu hasarların özellikle enine ve burulma modlarında doğal frekanslarda düşüşlere neden olduğu Şekil 2.25'te görülmektedir. Tek eksenli bir sarsma masası ile sismik uyarımların uygulanmasından dolayı, boyuna moda karşılık gelen ikinci doğal frekanslarda gözle görülür bir gelişme olmamıştır. Hem GM-1 ( $PGA=0.35g$ ) hem de GM-2 ( $PGA=0.42g$ ) deney numunesinde görünür bir hasara neden olmadı ve bu nedenle doğal frekanslarda önemli bir değişiklik gözlenmedi. GM-3 Parkfield Depremi'nden ( $PGA=0.60g$ ) sonra ilk mikro çatlaklar işaretlendi ve başlangıç frekanslarında ilk gözle görülür azalma tespit edildi: azalma enine mod için %3.91, boyuna mod için %0.66 ve hasarsız duruma göre burulma modu için % 8.69 olarak hesaplandı. GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası ( $PGA=0.80g$ ), duvarların üst kısımlarında kesme/kayma çatlaklarına ve DS-2 tipi yapısal hasarlara neden olmuş ve bu aşamada doğal frekanslardaki değişimler enine mod için %11.6, boyuna mod için %1.56 ve burulma modu için %15.2 olmuştur. GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası ( $PGA=0.80g$ ) ile yapılan testte diyagonal çatlak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve yapısal hasar DS-4 tipi olarak sınıflandırılmıştır. Numuneler, DS-4 hasar durumuna ulaşıldığında en yüksek frekans düşüm oranına maruz kaldı. Düşüşler hasarsız duruma göre enine mod için %24.38, boyuna mod için %3.75 ve burulma modu için %15.6 olarak hesaplandı. Son deneyde, tekrarlanan GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası ( $PGA=0.80g$ ), DS-5 tipiyle ilişkili yapısal hasara neden oldu. Bu aşamada test numunesinin çökmesi nedeniyle ölçüm gerçekleştirilememiştir. Tablo 2.11'de ön deney tuğla model için GFAO yöntemine

göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki durumları ve hasarsız durumu için dinamik karakteristikler verilmiştir.

Tablo 2.11. Ön deney tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler

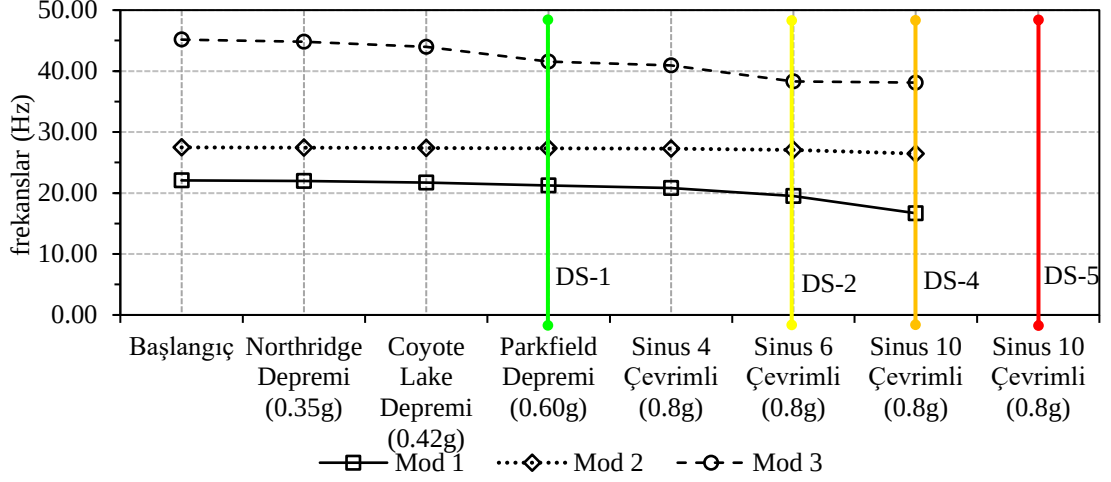
| Mod Şekli | Hasarsız Durum |                 | DS-2 (Hafif Yapısal Hasar) |                 | DS-4 (Ağır Yapısal Hasar) |                 | Frekans Farkı* (%) |
|-----------|----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|--------------------|
|           | Frekans (Hz)   | Sönüm Oranı (%) | Frekans (Hz)               | Sönüm Oranı (%) | Frekans (Hz)              | Sönüm Oranı (%) |                    |
| Enine     | 22.07          | 1.173           | 19.51                      | 6.53            | 16.69                     | 14.91           | 24.38              |
| Boyuna    | 27.49          | 1.935           | 27.06                      | 3.67            | 26.46                     | 2.123           | 3.75               |
| Burulma   | 45.16          | 0.465           | 38.28                      | 0.63            | 38.11                     | 0.466           | 15.6               |

\*Hasarsız duruma göre DS-4 tipi hasar durumunun frekans farkları

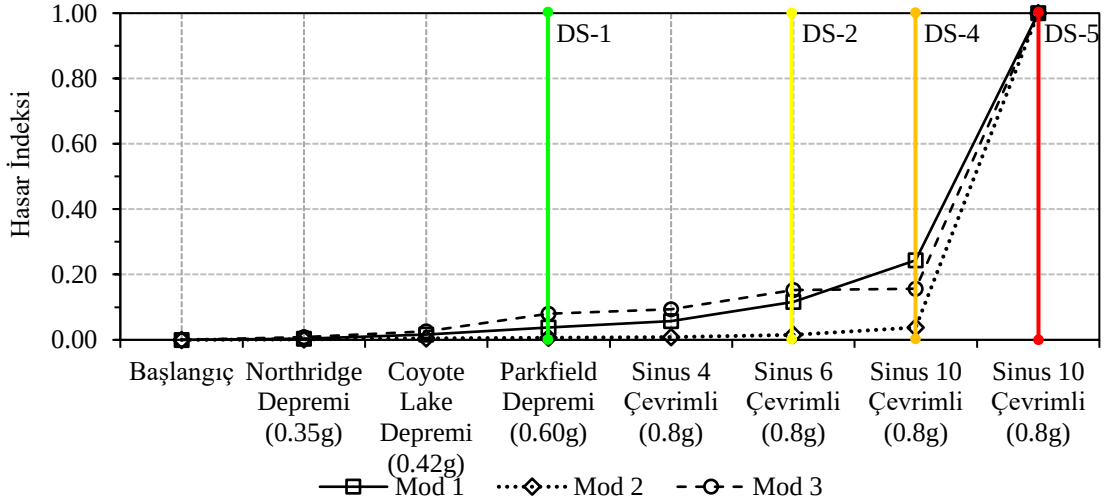
Mendes ve ark. [80], her bir yapısal moda karşılık gelen hasarları ölçmek için bir Hasar İndeksi (DI) sunmuştur. DI değerinin 1 olması, tam güç kaybını yansıtırken, 0 değeri, hasar olmadığı anlamına gelir. Sarsma deneyleri sonucunda kümülatif hasara bağlı olarak değişen DI değerinin formülü Denklem 1.3'te verilmiştir. Hasar durumları için test numunesinin ilk üç doğal frekansına ilişkin DI, Şekil 2.26'da verilmiştir.

İlk iki sarsma masası deneyinden sonra doğal frekanslarda gözle görülür bir değişiklik olmadı. Bu nedenle DI değerlerinde önemsiz artışlar gözlemlendi ve bu görsel gözlemlerle de uyumluydu. Yapıdaki hasar durumunun DS-2 olarak sınıflandırıldığı GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.80g) sonrasında DI değerleri 0.02-0.15 arasında belirlendi. GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.80g) ile yapılan test sonrasında ulaşılan DS-4'te DI değerleri enine mod için 0.24, boyuna mod için 0.04 ve burulma modu için 0.16 olarak belirlendi. Betonarme yapılar için DI'nın çeşitli limitleri önerilmiştir. Ancak, yığma binalarında her bir yapısal moda karşılık gelen hasarları ölçmek için DI eşik değerleri mevcut literatür incelemesinden elde edilememiştir. Bu nedenle DI değerleri, bir dizi sarsma masası deneylerinden sonra elde edilen hasar durumlarını yığma binalarının temel titreşim periyoduyla ilişkilendiren önceki çalışmalar dikkate alınarak tartışılmıştır. Tomassetti ve ark. [205], tek katlı bir yığma binasını ele aldı ve test numunesinin başlangıçtaki ve DS-4 hasar durumundaki temel periyodunu sırasıyla 0,22s ve 0,26s (DI, 0,15 olarak hesaplandı) olarak tanımladı. Kallioras ve ark. [227], Miglietta ve ark. [218], tarafından yürütülen yığma binalarının sarsma masası deneylerinde DS-4 hasar durumu için DI değerleri 0,51 ve 0,32 idi. Görüldüğü gibi hem literatürden hem de bu çalışmadan elde edilen değerler arasında bir

uyum bulunmamaktadır. Bu, seçilen malzeme özellikleri, dikkate alınan simülasyon yasaları ve uygulanan sismik uyarımlar gibi birçok nedenden kaynaklanabilir.



Şekil 2.25. Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler



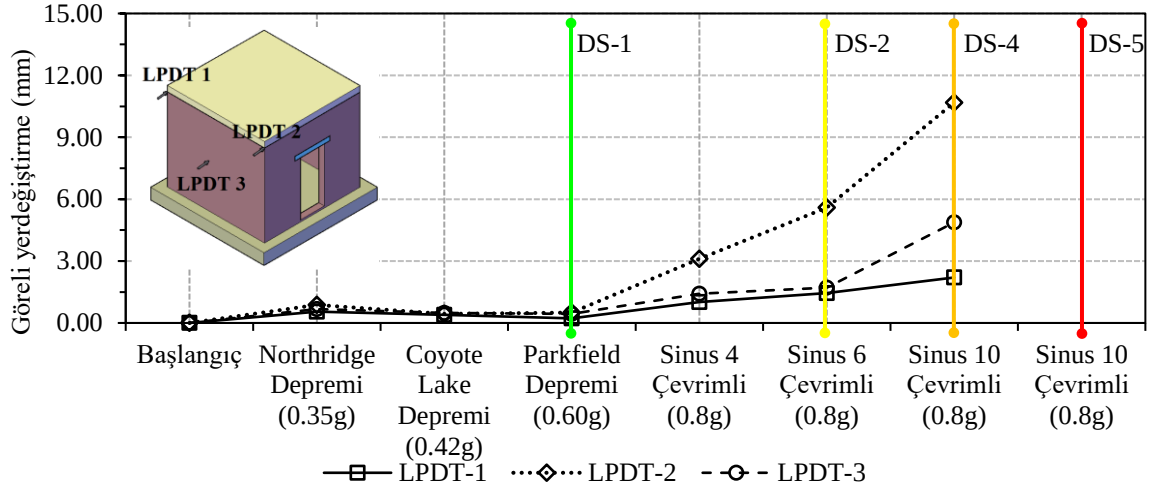
Şekil 2.26. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI

#### 2.2.1.3.2.4. Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi

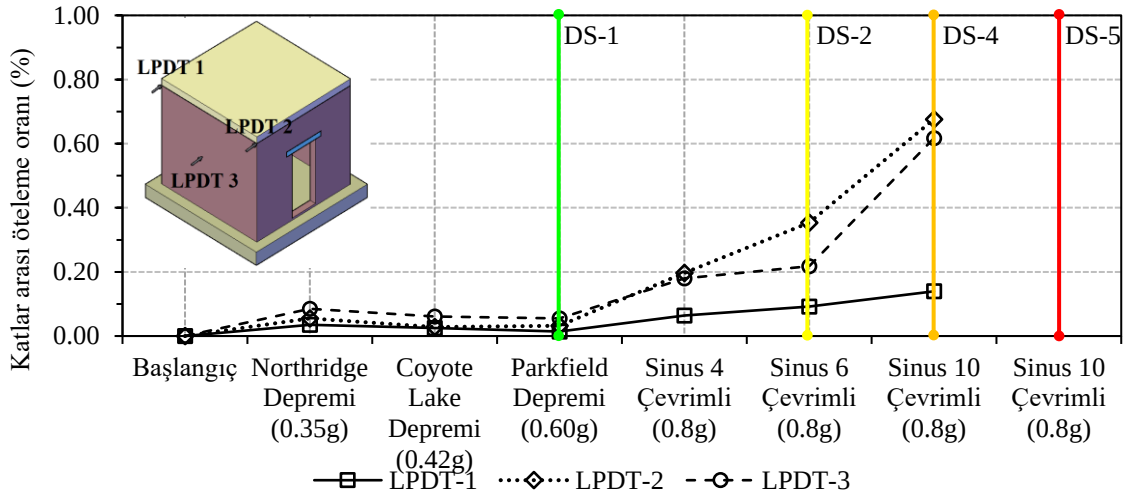
Bu bölümde, ölçüm sistemlerinden elde edilen çıktılar işlenerek deneysel yapısal tepkiler sunulmaktadır. Sarsma masası deneyleri sırasında 7 adet üç eksenli ve 3 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Ek olarak, deney numunesinin yüksekliği ile birlikte değişen yer değiştirme tepkisini yakalamak için 4 LPDT kullanılmıştır. Elde edilen deneysel

çıktılar ışığında, her bir sismik uyarım için görelî yer değiştirmeler, görelî kat öteleme oranları (IDR) ve mutlak ivmeler karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Yapısal tepkiler ve hasar arasındaki ilişki de tartışılmıştır.

şekil 2.27, her bir sismik uyarım için maksimum görelî yer değiştirmelerdeki değişiklikleri göstermektedir. Bu amaçla deney numunesinin döşeme ve orta yüksekliğinde elde edilen görelî yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. şekil 2.27'dan GM-2 Coyote Lake Depremi ( $PGA=0.42g$ ) ve GM-3 Parkfield Depremi ( $PGA=0.60g$ ) haricinde artan  $PGA$ 'lar nedeniyle görelî yer değiştirmelerin arttığı görölmektedir. şekil 2.28, sarsma masası deneylerinden sonra maksimum görelî yer değiştirmeler kullanılarak hesaplanan görelî kat öteleme oranlarının varyasyonunu göstermektedir. Calvi [228], yığma binalar için hasar durumlarına bağlı olarak öteleme limitleri önermiştir. Yığma yapıların eşik öteleme oranları DS-1 yapısal hasarın olmadığı durum için %0,1'den az, DS-2 hafif yapısal hasar durumu için %0,1, DS-3 yapısal elemanlarda orta dereceli hasar durumu için %0,1-%0,3, DS-4 ağır yapısal hasar ve kısmi hasar durumu için %0,3-%0,5 ve DS-5 çökme durumu için %0,5'ten büyük olarak tanımlandı. Hasarların DS-1 tipi olarak sınıflandırıldığı GM-3 Parkfield Depremi ( $PGA=0.60g$ ) kapsamında yapılan sarsma masası testinde, test numunesinde ölçölen maksimum IDR %0.05 olmuştur. Öte yandan, DS-2 ve DS-4 tiplerinde hasara neden olan sismik uyarımlar için maksimum IDR %0,35 ve 0,68 olarak elde edilmiştir. Bu değerler önerilen eşik değerlerle kısmen uyumluydu. Bu durumun bir nedeni, sarsma masası deneylerinde mühendislik parametreleri (yer değiştirme, IDR vb.) ile hasar arasındaki ilişkinin sürekli olarak izlenememesi olabilir. Bu durum, belirli bir hasar durumunun belirli bir eşik değerle değil, yalnızca bir dizi deformasyonla ilişkilendirilmesine izin verir [205, 229].



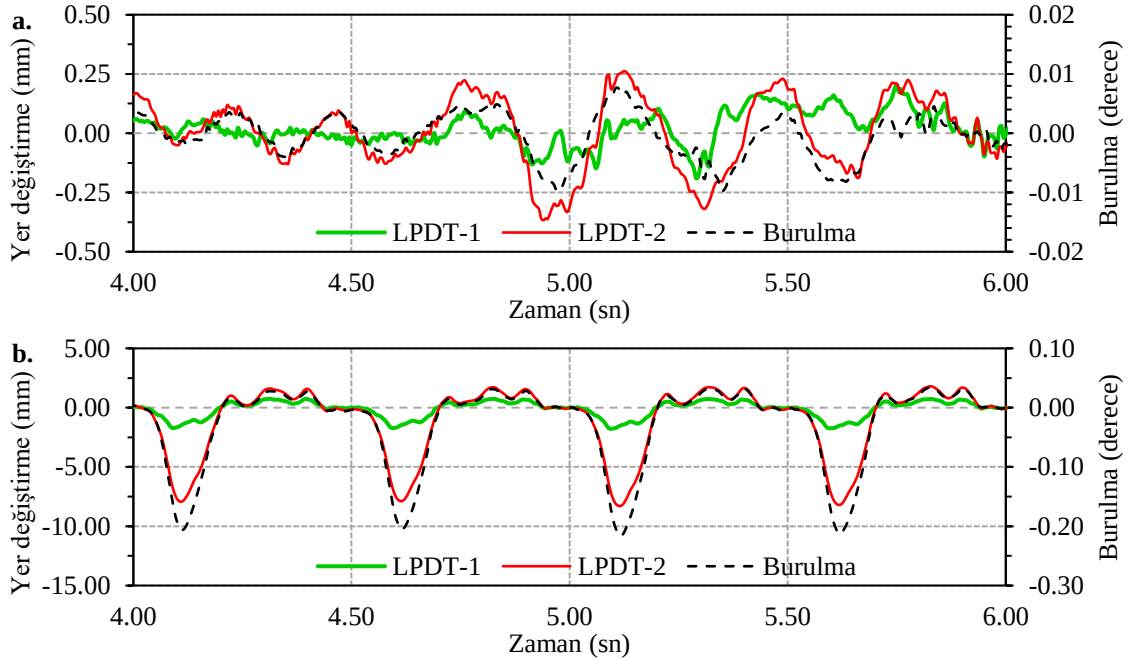
Şekil 2.27. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değıştirmelerin değışimi



Şekil 2.28. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değışimi

Deney numunesinde kuzeye ve güneye bakan duvarların açıklık alanları birbirinden farklı tasarlanmıştır. Kuzeye bakan duvar için  $0.45\text{m}^2$  ve güneye bakan duvar için  $0.25\text{m}^2$ 'lik açıklık alanları vardır. Bu durum, beklendiği gibi duvarların düzlem içi rijitliğini etkiledi. Bu nedenle, kuzeye ve güneye bakan duvarlar olarak döşemenin köşelerinde yakalanan görelî yer değıştirmeler arasında farklılıklar vardı ve deney numunesi belirgin burulma tepkilerine sahipti. Bu farklar GM-3 Parkfield Depremi ( $\text{PGA}=0.60\text{g}$ ) için %56,88, GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası ( $\text{PGA}=0.80\text{g}$ ) için %73,97 ve GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası için %79,37 ( $\text{PGA}=0.80\text{g}$ ) (Şekil 2.25). Burulma tepkileri, kuzeye bakan kesme adımlı diyagonal çatlağın genişliğindeki artışla daha belirgin hale geldi. Ayrıntılı bir açıklama için,

DS-1 ve DS-4 tiplerinin hasar durumlarının gözlemlendiği sismik uyarım sırasında döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmelerin zaman tanım alanında Şekil 2.29'da verilmiştir. Öte yandan bu durum asimetrik çöküş mekanizmasını harekete geçirdi. Şekil 2.21 ve 2.22'de görülebileceği gibi, hasarlar kuzeye bakan duvarda yoğunlaşmıştır. Benzer şekilde De Felice ve ark. [49], Ma ve ark. [230], deneysel sonuçlara dayanarak duvar açıklıklarının alanındaki farklılıkların burulma davranışını tetiklediğini bildirmiştir. Yığma yapıların yapısal hasarlarında da burulma tepkisinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

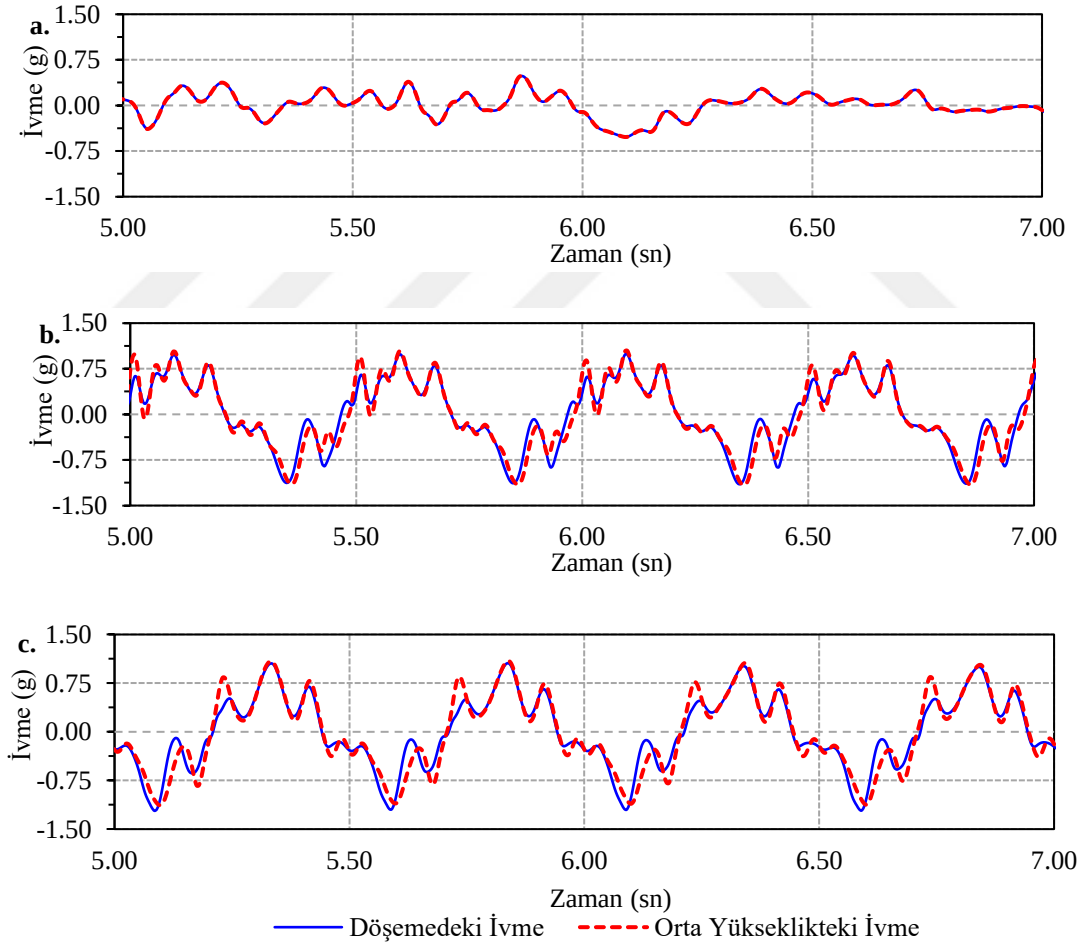


Şekil 2.29 Döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-3 Parkfield Depremi (PGA=0.60g); b. GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.80g))

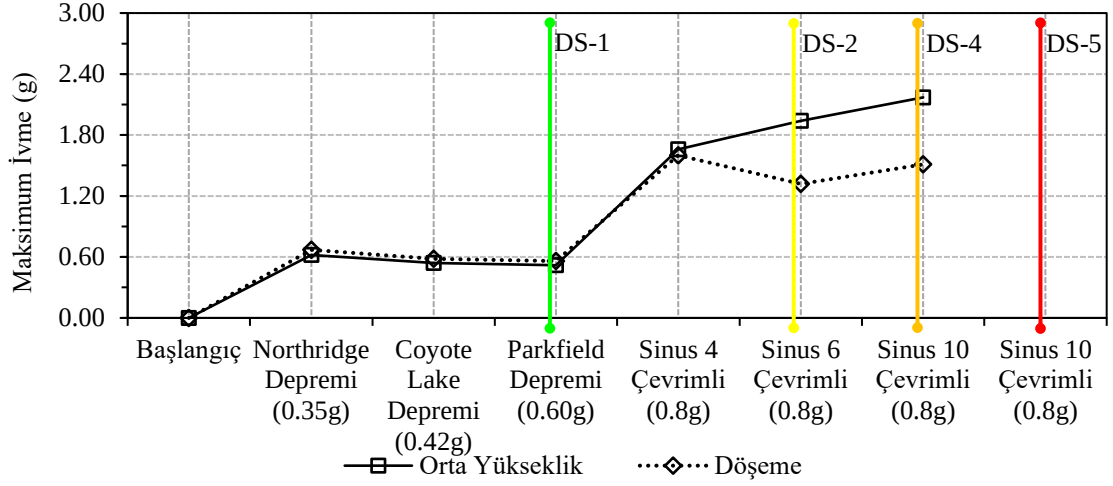
Sarsma masası deneyleri sırasında, ivmeölçerlerden elde edilen sinyal verileri arasındaki atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başladığının göstergesi olarak kullanılabilir. Yığma yapılar üzerine daha önce yapılan çalışmalarda bu veriler arasındaki farklılıklar hasarla ilişkilendirilmiştir [224, 232]. Bu amaçla, DS-1, DS-2 ve DS-4 tiplerinin hasar durumlarının gözlemlendiği sarsma masası deneyleri için orta yükseklik ve döşeme kotlarındaki ivme tepkileri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir (Şekil 2.30). Kılcal çatlakların gözlemlendiği GM-3 Parkfield Depreminde (PGA=0.60g) ivmelerin zaman kayıtlarının uyum içinde olduğu ve sinyal verileri arasında faz kayması ve sıçrama olmadığı görüldü. Şekil 2.29(b), hasarın artmasıyla birlikte orta yükseklikte ve döşeme

kotlarında ivme tepkileri arasında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koydu. Bununla birlikte, DS-2 tipi hasar durumu için önemli faz kaymaları izlenmedi. Şekil 2.30(c)'de görüldüğü gibi kritik hasarın işaretlendiği DS-4 tipi hasar durumunda ivmeölçer çıkışları arasında faz kaymaları ve atlamalar elde edilmiş ve çatlak genişlikleri santimetre mertebesine ulaşılmıştır. Artımlı sismik hareketlerle oluşan hasarlar faz kaymalarını ve atlamaları belirgin hale gelmesine neden olmaktadır.

Test numunesinin orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ölçülen maksimum ivme değerleri Şekil 2.31'da karşılaştırılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, hasarsız durumda elde edilen bu değerler arasında ihmal edilebilir farklılıklar olduğu, ancak maksimum ivmelerin artan hasarla uyumsuz hale geldiği görüldü.

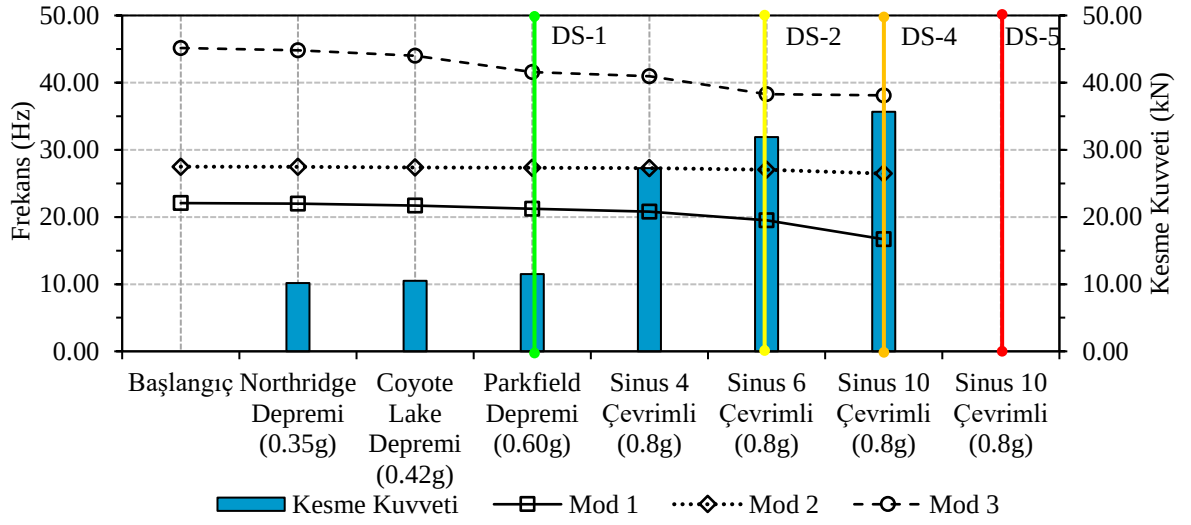


Şekil 2.30 Orta yükseklik ve döşemedeki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,: (a) GM-3 Parkfield Depremi için (PGA=0.60g), (b) GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g) ve (c) GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g))



Şekil 2.31 Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi

Şekil 2.32, uygulanan sarsma masası sekansı sırasında doğal frekanslardaki ve taban kesme kuvvetlerindeki değişiklikleri özetler. Taban kesme kuvvetleri döşeme seviyesine yerleştirilen her bir ivmeölçerin etki alanına ait kütle ile o ivmeölçerden elde edilen ivmelerin çarpımından elde edilen değerler toplanarak elde edilmiştir. Toplam kütle 1.675 ton olup, duvarların yarısı ile betonarme döşeme ağırlıklarının toplamı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları, doğal ivme kayıtları ile yapılan testlerde taban kesme kuvvetlerinin benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekanslar azalmıştır. Özellikle, duvarların üst kısımlarında kesme/kayma ve kesme adımlı diyagonal çatlaklara ve 31.8 kN'lık bir taban kesme kuvvetine neden olan GM-5 altı çevrimli Sinüs Dalgası, doğal frekansları kritik olarak zayıflattı. 35.7 kN taban kesme kuvvetine neden olan GM-6 on çevrimli Sinüs Dalgası ile yapılan deneyde, kayma adımlı diyagonal çatlakların genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve numuneler en yüksek frekanslı büzülmeye maruz kalmıştır.



Şekil 2.32. Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekansların değişimi

#### 2.2.1.4. Sayısal Simülasyon

##### 2.2.1.4.1. Giriş

Bu bölümde, deneysel olarak elde edilen hasar durumlarının sayısal modellerle kanıtlanması amaçlanmaktadır. Bir depremin yığma yapı üzerindeki etkisinin sayısal olarak görselleştirilmiş simülasyonu, uyum içinde çalışan üç program bileşeninden oluşan simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım paketi, uyum içinde çalışan üç program modülünden oluşur. Programın bileşenleri şunları içerir:

- The Bullet Constraints Builder (BCB) programı [233]
- Bullet Physics Engine [234]
- Blender [235]

BCB, açık kaynaklı Bullet Physics Engine ve Blender kullanılarak çökme senaryolarının simülasyonunu sağlayan Ayırık Öge Yöntemine (DEM) dayalı, görselleştirilmiş bir simülasyon eklenti aracıdır. Ücretsiz olarak sunulan Bullet Physics Engine ve Blender yazılımını kullanarak göçme senaryolarının simülasyonu sağlanabilir. DEM, bağımsız hareket eden deforme olabilen ve/veya sert nesnelerin etkileşimini tahmin etmek için sayısal bir yaklaşımdır. DEM, tohumlar ve tahıllar gibi dökme malzemeleri işleyebilecek tarımsal ekipman tasarlamaktan toprak işleme sektöründe agrega ve kumların viskozitesini ve jeomekaniğini incelemeye kadar çeşitli çalışmalar için kullanılır [236-238].

DEM artık "Etkileşimli Katı Cisim Dinamiği"nde algoritmalar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kullanıcı ile simülasyon arasında kolay etkileşime ve sonuçların "gerçek zamanlı" olarak sunulmasına izin verir. Bu durumlarda en önemli faktör hız olduğu için doğruluk önemli ölçüde azalır [239]. Bakeer [240], yığma yapıların göçmesini modellemek ve simüle etmek için DEM'i ve yaklaşımın varyantlarını kullanmaya yönelik birkaç başarılı çalışmayı incelemiştir. Sert gövdeler içinde hiçbir malzeme davranışı dikkate alınmadığından, malzemenin mukavemet özelliklerini daha geniş bir bağlamda açıklamak için bileşenler arasındaki bağlantı, gelişmiş genel sınırlama düzenlemeleri ile oluşturulmalıdır.

Kütle ve momentum korunumu gibi temel fizik ilkeleri DEM'in temelidir. Sonuç olarak, sayısal algoritmalar geleneksel mekaniğin temel ilkelerini, özellikle Newton'un hareket denklemlerini kullanır. Bir parçacığa etki eden kuvvetler, uygulanan kuvvetin bir cismin momentumunun zaman içindeki değişim hızına eşit olduğunu belirten Newton'un 2. hareket kuralı kullanılarak hesaplanır. DEM'de bağlantıyı ele almak için çeşitli modeller ve yöntemler mevcuttur. Enerji tüketim ve elastisitenin etkilerini dikkate alan Lineer Spring-Dashpot Modeli ilk modellerden biridir [240]. Daha karmaşık modeller [241] ve [242]'de sunulmuştur. Bu modeller ise süneklik, adezyon ve plastisite etkileri gibi farklı özelliklere sahip kürelerin ve diğerlerinin ayrık elemanları tasvir etmek için kullanıldığı "yumuşak küre" senaryolarına uygulanabilir. DEM'in yaygın olarak Katı Cisim Dinamiği (RBD) olarak bilinen, iç gerilmeleri ve gerinimleri tanımlama ihtiyacını ortadan kaldırarak hesaplamayı basitleştiren, kullanılan yükseltilmiş versiyonunda yalnızca rijit cisimler dikkate alınır. Ayrıca, cisimler arasındaki sürtünme hariç tutularak, plastisite gibi enerji tüketen mekanizmalar da göz ardı edilmektedir.

Her eleman için son derece karmaşık bir malzeme davranışının tahmin edildiği süreklilik (continuum) tekniklerle karşılaştırıldığında, temel RBD simülasyon yaklaşımının önemli avantajları vardır. Yalnızca rijit cisimler ele alındığından ve bu cisimler öncelikle Newton denklemleri kullanılarak ilişkilendirildiğinden, genel sorunu tanımlamak ve analiz etmek için sayısal çaba önemli ölçüde azalır. Sonuç olarak, RBD genel olarak oldukça hızlı bir yöntemdir ve "gerçek zamanlı" ayarlarda da kullanılabilir. Ayrıca, basitleştirilmiş mühendislik formüllerinde çok sayıda yapısal özelliğin ortalaması alınır ve geometri yalnızca kabaca tahmin edilir. Sonuç olarak, yürütülebilir bir simülasyon modeli geliştirmek için gereken süre çok azalır. Bu faydalar, gövdelerdeki sürekli deformasyonların tahmin edilememesi ve yalnızca aralarındaki mesafedeki göreceli bir değişiklik olarak görülebilmesi

dezavantajıyla birlikte gelir. Bu, kabaca ayrıklaştırılmış bir yapıyla birlikte, daha düşük doğrulukta bir yaklaşımla sonuçlanır. Yapısal unsurlara dikkat edilmemesi elbette olumsuz olarak görülebilir. Yönetici denklemler, yapısal dinamik davranışın temel fiziğini uygulasa da, yalnızca ayırık nesneler için geçerlidir. Çöküş durumlarında başlangıç noktası işlevi gören sürekliliğe uygulanamazlar.

Tuğla yığma yapılarının düzgün bloklardan oluşan bir ızgaraya sahip olduğu ve hasarın ağırlıklı olarak harç birleşim derzlerinden meydana geldiği düşünüldüğünde, RBD mükemmel bir seçimdir. Harç özellikleri, gelişmiş kuvvet modellerine dahil edilebilir. Genel olarak aynı durum, sayısal ve yapısal elemanlar arasındaki ayırt edici bağlantının kaybolduğu betonarme yapılar için de geçerlidir. Bununla birlikte, bu türdeki tüm tekniklerin bir ortak noktası vardır: Yöntemin birincil algoritmasında değişiklikler uygulanmalıdır. Kullanılan uygulama durumunda, fizik motorunda herhangi bir değişiklik yapılmamış, bunun yerine algoritmanın sunduğu mevcut potansiyellerden yararlanılmıştır. Bu nedenle, belirli bir eşik aşıldıktan sonra çözünmüş nesneler arasındaki sınırlama olasılığı dikkate alınır. Eşiklerin fiziksel olarak anlaşılmasıyla birlikte kullanılırlar.

#### **2.2.1.4.1.1. The Bullet Constraints Builder (BCB) Programı**

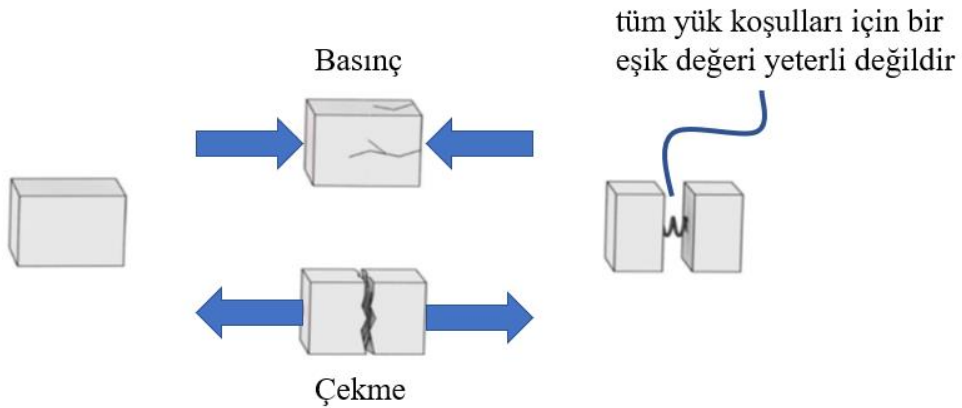
Daha önce belirtildiği gibi, RBD orijinal olarak ayrı ayrı hareket eden nesnelerle malzemeyi simüle etmek için geliştirilmiştir. Öte yandan rijit cisimler, bir bina yapısının elemanlarını tasvir edebilmek için önce birbirine birleştirilmelidir. Sert gövdeler içinde hiçbir malzeme davranışı dikkate alınmadığından, malzemenin mukavemet özelliklerini daha geniş bir bağlamda açıklamak için bileşenler arasındaki bağlantı sınırlamalarla oluşturulmalıdır. BCB eklentisi, Blender'ın Bullet Physic özelliklerini etkili bir şekilde genişletir. Bileşenleri oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerini hesaba katarak karmaşık çökme simülasyonlarına izin veren, ayırık rijit gövdeleri gelişmiş sınırlayıcı düzenlemeleriyle birleştirir.

BCB'nin temel ilkeleri aşağıdaki gibidir:

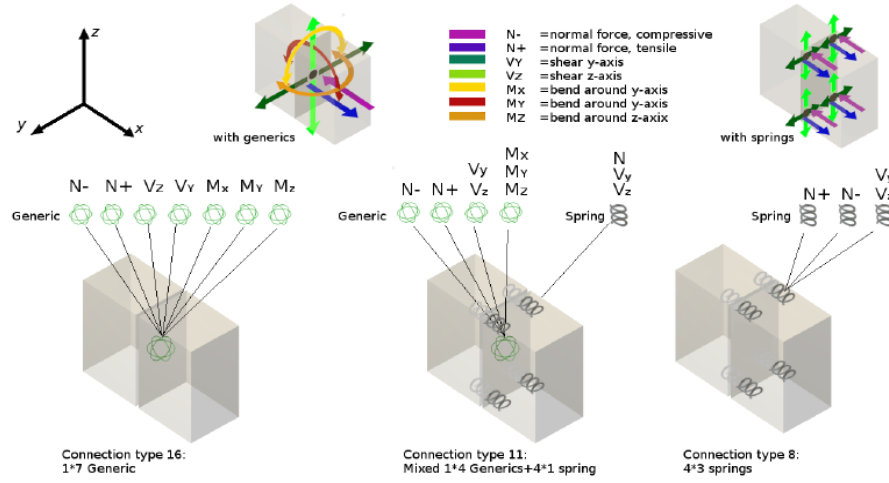
- Çoklu sınırlamalar kullanarak her eleman çifti için uygun serbestlik derecelerinin açıklaması,
- Sınırlamanın kesin yerleşimi,

- Yapı elemanının fiziksel yapısal özelliklerine dayalı kabul edilebilir kuvvet hesaplamaları.

Sınırlamalar iki katı cismi birbirine bağlar ve "kırılma eşiği" olarak bilinen belirli bir noktada çözülmesine izin verilir. Bu değer, Bullet Physics Engine’de varsayılan olarak geneldir; bu, kuvvet bileşenlerinden birinin ( $F_i$ ) veya moment bileşenlerinden ( $M_i$ ) birinin büyüklüğünün belirtilen eşiği aştığı anda sınırlamanın kaldırıldığı anlamına gelir. Her yinelemeli hesaplama adımında madde işareti çözücü, her bir kuvvet bileşenini ( $F_i$  veya  $M_i$ ) bağımsız olarak değerlendirir ancak kuvvetler, momentler, bunların yönelimleri veya birleşik etkileri arasında ayırım yapmaz. Değerlendirilen bileşenlerden herhangi biri tanımlanan kırılma noktasını aştığında, sınırlama otomatik olarak devre dışı bırakılır ve bağlantı kesilir. Bu, yapının gerçek davranışını temsil etmek için kritik bir sınırlamadır çünkü çeşitli yükleme koşulları, uygulanan yükün yönüne ve türüne bağlı olarak malzemenin farklı davranmasına neden olabilir. Şekil 2.33, basit bir beton elemanı yardımıyla çok sayıda sınırlamanın gerekliliğini göstermektedir. Beton, güçlü bir basınç gerilimi direncine sahiptir, ancak zayıf bir çekme dayanımına sahiptir. Bir beton gövde içindeki gücün, basınç dayanımı  $f_c$  tarafından belirlenen kırılma eşiği ile tek bir sınırlama ile temsil edildiğini varsayarsak, eleman bu gerilim büyüklüğü karşılanana kadar- çekme gerilimi durumlarında bile başarısız olmayacaktır. Bu nedenle, aynı serbestlik derecesi kapsansa bile her bağlantıya birden fazla sınırlama uygulanmalıdır. BCB eklentileri [243] 23 yeni bağlantı türü önermektedir. Bir nokta veya tek bir sabit sınırlama kadar basit veya jenerik ve yay sınırlamalarının bir kombinasyonu kadar karmaşık olabilirler. Birkaç bağlantı türünden bazıları Şekil 2.34’te gösterilmektedir.

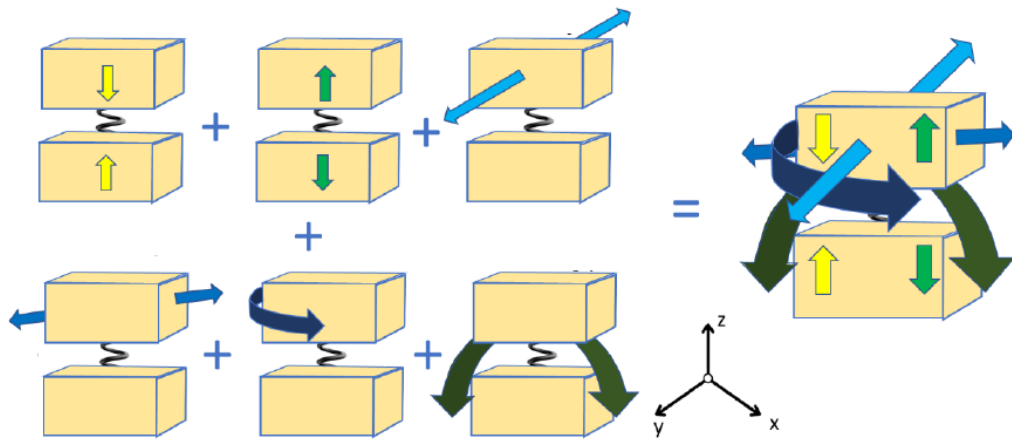


Şekil 2.33 Birden çok sınırlamaya duyulan ihtiyacı gösteren örnek



Şekil 2.34 BCB'deki bağlantı tipleri [234].

Genel sınırlama türü, bir serbestlik derecesini sınırlandırırken diğer altısını serbest bırakmanıza izin verir. Bundan sonra, kısıtlı serbestlik derecesini güvence altına almak için kuvvet hesaplamalarına dayalı bireysel bir kırılma eşiği kullanılır. Şekil 2.35 genel bir sınırlama düzenlemesinin bir örneğini gösterir. Genel sınırlamalar, bir yapının ne zaman başarısız olabileceğini belirlemek için etkili araçlardır. İlgili sınırlamalardan birinin eşiği aşıldığında, BCB simülasyon işlemi sırasında genel sınırlamaların durumunu izler ve söz konusu bağlantının diğer sınırlamalarını çözer.



Şekil 2.35 Bağlantı türü 15 sınırlama yapılandırmasının görsel sunumu [244].

BCB'nin geliştirilmesi başlangıçta bileşik malzemeler için özel olarak betonarme için tasarlanmıştır. Genel olarak, betonun göçmesi, inşaat demirine kıyasla nispeten düşük

gerilimde meydana gelir ve beton hasarından sonra bile, inşaat demirinin varlığı nedeniyle tüm yapı hala işlevselliğini koruyabilir. Bu, bağlantının sünek yapısından dolayı önemli ölçüde deformasyonla karakterize edilen inşaat demiri hasarına kadar tamamen çözülmediği anlamına gelir. Aynı kavram, son derece yüksek basınç mukavemetine sahip olan ancak çok düşük çekme geriliminde başarısız olan yığma yapılara da genişletilebilir. Bu tür senaryoların simülasyonunu, genel sınırlamalara ek olarak yayların BCB bağlantı türlerine entegrasyonu mümkün kılar. Yaylar, rijit bileşenler arasında geri döndürülemez ve döndürülebilir deformasyona izin vererek duvarın sünekliğini etkili bir şekilde yeniden oluşturabilir. Sertlik, yayın plastik durumundaki düşük doğrusal ve açısız eşikler ve yayın çözülmesindeki doğrusal ve açısız daha yüksek eşikler, yay özelliklerini karakterize eden durumlardan bazılarıdır.

Daha önce belirtildiği gibi, BCB özellikle betonarme yapılar için tasarlanmıştır, bu nedenle genel formülasyon varsayımları betonarme yapılara yöneliktir ancak büyük ölçüde yığma yapılara uygulanabilir. Varsayımlar, basitleştirilmiş RBD çerçevesi içindeki karmaşık davranışlarla başa çıkmak ve sınırlama eşiklerinin belirlenmesi ve düzenlenmesi için formüle edilmiştir. Varsayımlar şu şekildedir:

- Tüm kesitin göçmesine neden olan izin verilen kuvvetler, basit mühendislik formülleri kullanılarak tahmin edilebilir.
- Çekme gerilmeleri gibi belirli bir gerilme durumundan kaynaklanan enkesit arızası, kesitin sonraki yükleri (kesme gibi) farklı yönlerde iletme kabiliyetinin ani ve tamamen kaybına neden olur.
- İnşaat demirinin bütünlüğü, beton matris arızasından etkilenmez ve çekme kuvvetlerine karşı koyma kabiliyetinden ödün verilmez.

İzin verilen bir dayanım aşıldığı anda, tüm genel bağlantılar kaldırılır. Geçiş yayları, rijit gövdeler arasındaki kaybolan bağ geri kazandırır ve bağlantı sökülmeden önce elde edilemeyen artık çekme dayanımını sunar. Yukarıda açıklanan varsayımlara dayanan bariz genel yaklaşım nedeniyle, gerçekte ortaya çıkmış olabilecek ek yük taşıma kapasiteleri ele alınamaz.

#### 2.2.1.4.1.2. Fracture Modifier (FM)

DEM tekniği, simülasyon sorununu “gerçek zamanlı” ve kısa sürede çözmek amacıyla geliştirilmektedir. Çok daha kısa işlem süresine sahip RBD tekniği kullanılmasına rağmen, mevcut Blender versiyonundaki simülasyonlar bu hedefin oldukça gerisinde kalıyor. Örneğin, 625’in üzerinde simülasyon karesiyle Northridge depremine tabi tutulan duvar modelinin gerçek simülasyon süresi 13.620 saniye (yaklaşık olarak dört saat) sürmüştür. Kısıtlamalarının kurulumlarıyla büyük ölçüde ayrıklaştırılmış modeller, karmaşık Blender sahnelerini yönetecek kadar karmaşık ve zaman alıcı hale getirir. Sahnedeki nesne sayısı arttıkça Blender’ın mevcut nesne yönetimi performansı hızla düşüyor. Bu bağlamdaki sahne, Blender’ın model uzayına atıfta bulunurken, Blender’daki nesne örneklerinden bazıları ise kameralar, lambalar, kısıtlamalar ve sert cisimler. Bu nedenle, Fracture Modifier (FM) adlı özel yapım değiştirilmiş bir Blender sürümü geliştirilmiştir. Model analiz için FM’e aktarıldığında önemli ve harika bir hız artışı elde edilebilir. Standart Blender’da 13.620 saniye süren aynı yığma duvar modeli analizi, aynı koşul altında FM ile sadece 347 saniye sürdü (yaklaşık %3900 hız artışı).

#### 2.2.1.4.1.3. Görelî Yer Değiştirme Görseli

Burada açıklanan DEM uygulaması, iç kuvvetlerin büyüklüğünü görselleştiremez. Bunun nedeni, Blender’ın Python API’sinin, BCB gibi eklentilerin doğrudan temel Blender işlevlerine ve verilerine bağlanmasına izin vermesidir. Ancak Bullet engine simülasyonlar sırasında analiz ettiği kuvvetlere doğrudan erişmenin bir yolu yoktur. Fakat, bu kuvvetler tarafından üretilen komşu rijit cisimlerin yer değiştirmeleri gözlemlenebilir ve bu, yüksek gerinim bölgelerinin nerede bulunduğunu gösterir. Bir deformasyon görselleştiricisi olan v1.10 Python komut dosyası, öğelerin başlangıç çerçevesi konumlarına göre öğelerin yer değiştirmelerini görsel olarak oluşturmak için Blender’a entegre edildi. Komut dosyası, Kai Kostack tarafından yazılmış ve geliştirilmiştir. Çevreleyen gövdelere kıyasla nispeten küçük bir yer değiştirmeye sahip katı gövdeler mavi renkle, büyük görelî yer değiştirmelere sahip gövdeler ise kırmızı renktedir.

#### 2.2.1.4.1.4. Bullet Physics Engine

Fizik Motoru, DEM ve RBD'nin uygulanması için kullanılan yazılım kodudur (ticari veya açık kaynaklı olabilir). Ayırık-zaman modelin çözümünden sorumludur. Gerçekçi oyun deneyimleri sağlamak için gerçek hayatta meydana gelen fiziksel ve mekanik süreçleri simüle etmek amacıyla oluşturulmuştur. Fizik motorları, sert cisimler (kayalar ve çakıl parçacıkları gibi), yumuşak cisimler (giysi gibi), sıvılar (su gibi) ve bunların etkileşimleri dahil olmak üzere oyunlardaki karmaşık fiziksel süreçleri taklit etmek için tekniklerin bir kombinasyonunu kullanır. Sonuç olarak, fizik motorları gerçekçi parçacıkları simüle edebilmektedir [245]. Ayrıca film yapımında fizik tabanlı olağanüstü görsel efektler ve neredeyse gerçekçi animasyonlar oluşturmak için kullanılır. Bunun uygulaması, NASA'nın gerilim robotik simülatörü [246] veya BBZ tıbbi teknolojilerin robotik cerrahi simülasyonu [247] gibi robotik simülasyonlarda da kullanılmıştır. Gerçek zamanlı ve yüksek hassasiyetli fizik motorları en yaygın iki türdür. Lisans türü, mevcut özellikler, desteklenen platformlar ve çalışma süresi boyunca performans ve doğruluk gibi faktörler iki türü birbirinden ayırır. Araştırmacılar ve bilgisayar animasyonlu filmler tipik olarak, çok ince fiziği hesaplamak için daha fazla bilgi işlem gücü gerektiren yüksek hassasiyetli fizik motorları kullanır. Video oyunlarında ve diğer etkileşimli bilgi işlem biçimlerinde görülenler gibi gerçek zamanlı fizik motorları, oyunun makul bir oranda yanıt vermesi için zamanında hesaplama yapmak üzere basitleştirilmiş hesaplamalara ve daha düşük hassasiyete dayanır.

Diğerlerinin yanı sıra Bullet [235], PhysX [248], Box2D, PhysicsJS, Open Dynamics Engine [249], BeamNG, Havok ve True Axis gibi birkaç gerçek zamanlı fizik motoru mevcuttur. Yüksek hassasiyetli (çevrimdışı olarak da bilinir) fizik motorlarına örnek olarak Icarus ve VisSim verilebilir. "Çevrimdışı" terimi, simülasyon sonuçlarının kullanıcı etkileşiminden ayrıldığı anlamına gelir. Yüksek hassasiyetli fizik motorları, yüksek zaman tüketimi ve kullanıcı etkileşiminden kaynaklanan ayrıştırılmış simülasyon sonuçları gibi dezavantajlara sahiptir. Ancak, son derece doğru sonuçlar verirler. Öte yandan etkileşimli fizik motorları, gerçek zamanlı çözümler yerine yalnızca tatmin edici gerçekçi sonuçlara ihtiyaç duyan durumlardan ilham alır [239, 250]. "Etkileşimli" kavramı, simülasyon sonuçlarının anında sağlanması ve sürekli kullanıcı etkileşimleri ile donatıldığını öne sürer.

Bu çalışmada günümüzde en yaygın kullanılan fizik simülasyonlarından biri olan etkileşimli Bullet Physics motoru [235] kullanılmıştır. Bullet, çarpışma algılamanın yanı sıra

yumuşak ve sert gövde dinamiklerini simüle eden tescilli olmayan gerçek zamanlı bir fizik motorudur. Erwin Couman tarafından Sony'nin PlayStation'ı için oluşturulmuştur.

#### **2.2.1.4.1.5. Blender Yazılımı**

Blender, sürekli kullanıcı etkileşimlerinin sağlandığı ücretsiz olarak kullanılabilen güçlü bir 3B modelleme yazılımıdır. Fizik motoruna bağlıdır ve simülasyon görselleştirmesinin yanı sıra bir modelin oluşturulmasına izin verir. Başlangıçta 1995 yılında Dutch Animation Studio NeoGeo'nun sahip olduğu tescilli bir programdı. Oyun mantığı, gerçek zamanlı fizik simülasyonu, gelişmiş doku eşleme, video düzenleme, yol izleme oluşturma, heykel, animasyon araçları ve diğer özelliklerin tümü aktif ve tutarlı ilerlemenin bir sonucu olarak bu yazılıma eklendi. Artan sayıda kullanıcıya ek olarak artan sayıda programcı, Blender'ın işlevselliğine düzenli olarak katkıda bulunmaktadır. Blender, simülasyon sonuçlarından yararlanmak için güçlü bir araçtır ve aydınlatma, dokular ve gerçekçi gölgeleme içeren ortamlarda etkileşimli "Tam Çözüm"e olanak tanır. Aynı zamanda, bir göçme senaryosu durumunda kazazedinin kavite tanımlaması ve takibi için yetenekler içerir. Özel uzantılar, python tabanlı bir betik dili programı arabirimi aracılığıyla kullanılabilir.

“Bullet Physics” fizik motoru, Blender 2.47 versiyonu ve daha yeni çıkan versiyonları için fizik motoru olarak içerikte sunulmaktadır. Modelleme alanındaki ana araç çubuğunda kolayca madde özellikleri üzerinde değişim ve işlevselliği üzerinde değişim yapılabilmektedir. Statik veya pasif olmak üzere katı cisimler bu iki durumdan birini sağlayabilir. Bu iki durumu karşılaştırdığımız zaman pasif durumdakiler sabit komda iken, aktif durumdaki nesneler yerçekimi ve çarpışma gibi etkenlerden dolayı dinamik bir etki özelliği gösterir. Bir simülasyon oluşturulduğunda, o analiz bağımsız ve temel sınırlamalar ile birbirine bağlı şekilde çok sayıda elemana sahip olabilir. Oluşturulan simülasyon çalışması sonucunda analiz sonucu simülasyon olarak programın ana sayfasında eş zamanlı olarak görüntülenir. İşaretçiyle hareket ettirilebilen modeldeki nesneler etkileşimli olarak kavranabilir. Bu durum ise diğer nesnelerin dinamik olarak etkilenmesine neden olmaktadır.

#### 2.2.1.4.2. Yığma Yapının Modellenmesi

Bina, örgü küpler kullanılarak modellendi ve modelin ön işlemesi sırasında rijitlik sağlandı. Temel duvar birleşim yerlerinde kullanılan çentik şeklinde olan içbükey şekillere izin verilmemesi sebebiyle tüm nesneler için standart olarak kullanılan dışbükey gövde seçeneği tercih edilir. Bu nedenle, temel bloklara bölündüğünden dolayı her alt eleman dışbükeydir ve kolayca ayrıklaştırılabilir. Bu geometrik konfigürasyon değişikliği, şekil çakışmasından dolayı oluşacak problemlerden kurtulmak için önemli bir aşamadır. Ön işleme aşamasındaki Boolean işlemleri, ölçeklendirme 1 olduğunda daha iyi çalıştığı için nesnelerin ölçeklendirilmesi de (Ctrl+A) uygulandı. Daha önceki çalışmalarda, blender simülasyon programının FM versiyonu hesaplama süresini düşürmek için kullanılmıştır [234,243,251].

##### 2.2.1.4.2.1. Basınç ve Çekme Dayanımı

Duvarın mekanik özellikleri, daha önce farklı simülasyon programları ile yapılan analizlerdeki değerler dikkate alınarak seçilmiştir. Duvarın basınç dayanımı [234] literatürde önerildiği gibi 10MPa olarak seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda basınç kapasitesinin %10'luk bölümü çekme dayanımını vermektedir [234]. Bu çalışma kapsamında, simülasyon çalışmasında dikkate alınmayan sismik uyarıların model üzerinde kullanılması ve çekme kapasitesini etkilediği düşünülerek 0.1 MPa alınmıştır. GM-6 (PGA=0.8 g) sinüs fonksiyonunun uygulanmasından önce ve sonra oluşan DS-4 ve DS-2 yapısal hasarlardaki çatlak işaretleri çekme dayanımındaki bu ciddi azalmayı doğrulamaktadır.

##### 2.2.1.4.2.2. Kesme Dayanımı

Çeşitli çalışmalarda [52, 196, 252-254] bildirildiği üzere, bazı araştırmacılar 0.5 MPa'dan daha yüksek bir değer önermesine rağmen, duvarın kesme dayanımı 0.01 ile 0.65 MPa arasındadır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalarda yığma yapı duvarının kesme dayanımını belirlemek için bir matematiksel formül öne sürülmüştür. Bu çalışma kapsamında kullanılan deneysel modelin duvar kesme dayanımını belirleyebilmek için denklem 2.3 kullanılmıştır.

$$\text{Kesme Dayanımı} + \text{abs (Model yüksekliği-z) * Gradyan Faktörü} \quad (2.3)$$

Burada z dikkate alınan noktadaki yüksekliği temsil etmektedir. Gradyan faktörü ise daha önce yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar veren simülasyon değerleri dikkate alınarak 0.1 olarak seçilmiştir [255]. Basıncıdan dolayı daha yüksek bir sürtünme oluşabilir. Bu durumu temsil etmenin çözümü olarak z'ye (küresel koordinatlar) dayalı yapay bir güç gradyanı eklenir.

#### 2.2.1.4.2.3. Eğilme Dayanımı

CSA S304.1-04 "Kagir Yapıların Tasarımı" [256] uyarınca, minimum eğilme dayanımı 0,2 MPa olmalıdır, ancak deneysel sonuçlara dayalı olarak, bazı araştırmalar bundan daha düşük bir sayı göstermiştir. Daha önceki yapılan çalışmalara göre eğilme kapasitesinin 0-0.54 MPa arasında olduğu varsayılmaktadır. Bu analiz için eğilme dayanımı olarak 0.1 kullanılmıştır.

#### 2.2.1.4.2.4. Duvarın Yoğunluğu

Duvar, 1660 ile 2400 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen bir yoğunluğa sahiptir. Bu çalışmada tercih edilen yığma birim elemanların kullanıldığı duvarın birim hacim ağırlığı değişmektedir. Tuğla duvar için ise birim hacim ağırlık 1800 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

#### 2.2.1.4.2.5. Sürtünme Katsayısı

Çeşitli çalışmalara göre, duvarın sürtünme katsayısı (CoF) 0.2 ve 1.3 [257-259] arasındadır. BCB yığma duvar analizinde yüksek değerli sürtünme katsayısı başlangıçta atanmaktadır. Bu değer 5 olarak yığma duvar ön ayarlarıyla birlikte gelmektedir. Bir binanın alt sıralarındaki tuğlalar, ne kadar yüksek miktarda yük altında olurlarsa olsunlar her zaman kayma eğilimindedir. Tralli ve ark. [260], sürtünmeli kayma varlığında rijit cisim çarpışmasının bir analizini önerdi. Yapılan çalışmalarda bir diğer konu ise yığma birimler ile temel arasındaki statik sürtünme katsayısının, sınır koşullar tam olarak sağlandığında 1,3'ten fazla olduğu söylenebilir. Smoljanovic ve ark. [261] yığma birimler ve temel

arasındaki kaydırma ve sınırlama gibi farklı olasılıklardan da bahsetmektedir. Bu durum, 0,75 ve altında bir CoF kullanılarak gerçekleştirilen ilk yığma model deprem analiz setlerinde yaşandı. Lipscombe ve Pellegrino [262], 0,5'ten düşük bir CoF değerinin kaymaya yol açtığını ve bunun da ana hasar kaynağı olabileceğini görerek, yüksek CoF kullanımını uygun olacağını belirttiler. Ayrıca, Auckland Üniversitesi [255] simülasyon testinde CoF'u 5 olarak dikkate almıştır. Bu tez çalışmasının simülasyon bölümünde de CoF değeri 5 olarak seçilmiştir. Tablo 2.12 delikli tuğla yığma modelin Blender simülasyonunda kullanılan duvarın tüm gerekli mekanik özelliklerini vermektedir.

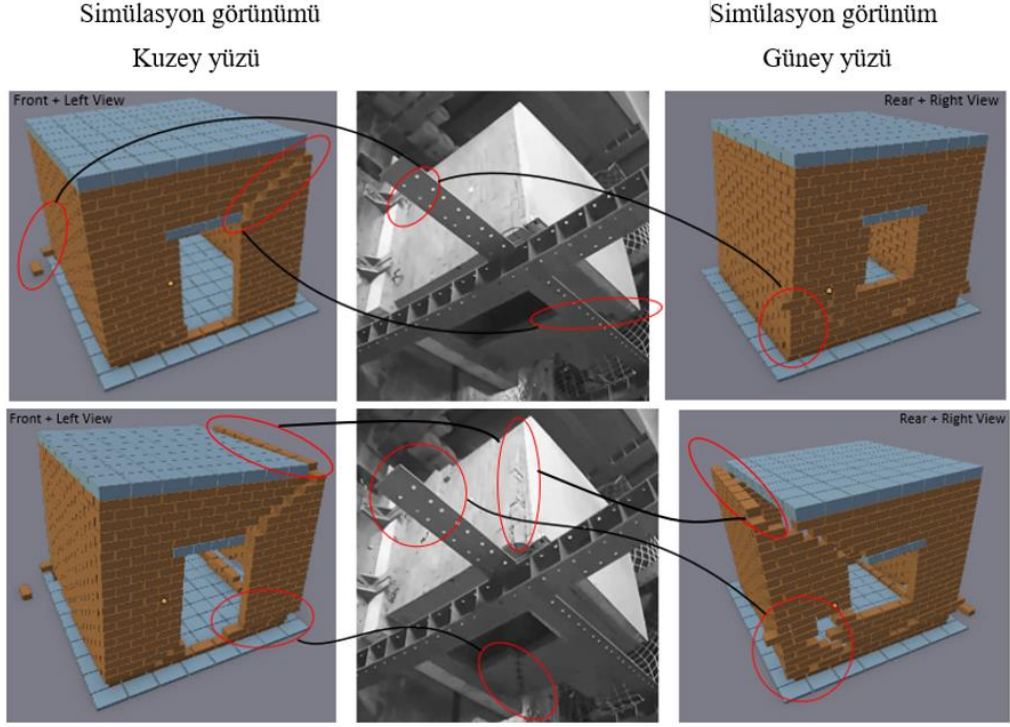
Tablo 2.12. Simülasyonda kullanılan duvarın mekanik özellikleri

| Parametre            | Birim             | Değer                              |
|----------------------|-------------------|------------------------------------|
| Ayrıklaştırma boyutu | m                 | 0.3                                |
| Bağ tipi             | -                 | 15                                 |
| Basınç               | N/mm <sup>2</sup> | 10                                 |
| Çekme                | N/mm <sup>2</sup> | 0.1                                |
| Kesme                | N/mm <sup>2</sup> | $0.1 + \text{abs}(1.85 - z) * 0.1$ |
| Eğilme               | N/mm <sup>2</sup> | 0.1                                |
| Yoğunluk             | Kg/m <sup>3</sup> | 1800                               |
| Sürtünme katsayısı   | -                 | 5                                  |
| Zaman adımı          | -                 | 200                                |
| Çözüm iterasyonu     | -                 | 347                                |

#### 2.2.1.4.3. Analiz ve Sonuçlar

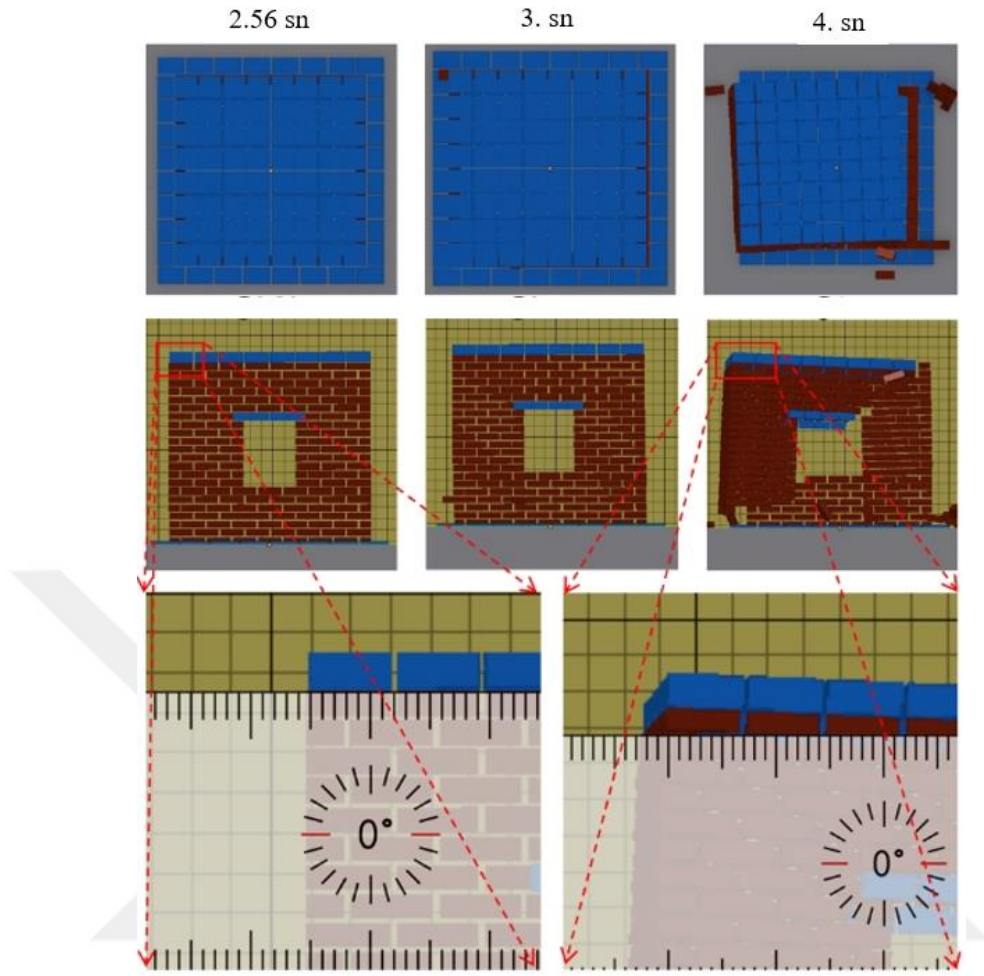
Yığma modelin göçme simülasyonu birçok yönden deneysel sonuç ile örtüşmektedir. Bununla birlikte, göçme oluşumu tam olarak aynı süreçleri yansıtmamaktadır. Bu durum, başlangıç hasarların simülasyona dahil edilememesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte modellerin simülasyon sonuçları, güçlendirme için bir temel olarak kullanılabilecek hasar durumu, çatlakların ilerlemesi ve göçme ilerlemesi hakkında faydalı görsel bilgiler sağlar. Güneybatı kesiminin alt kısmındaki ilk göçme noktası, deneysel sonuçla mükemmel bir uyum içindedir (Şekil 2.36). GM-6 sismik uyarımdan sonra oluşan ve gözlemlenen hasar şekillerinin benzeri Blender simülasyonunda da gerçekleşmiştir (Şekil 2.36). Bu hasarlar, batı duvarında oluşan yatay bir çatlak, güney duvarının alt kısımlarında oluşan basamak

benzeri diyagonal ve hafif eğimli çatlaklardır. Ek olarak kuzey duvarındaki kapı boşluğunun sağ köşesinden döşemeye uzanan diyagonal çatlaklar da deneysel çalışmalarda gözlemlenen hasarlarla uyuşmaktadır. Betonarme döşemenin yapının doğu yönündeki duvardan ayrılarak yıkılma sürecine devam ettiği Şekil 2.36'da gösterilmiştir. Doğu duvarının alt kısmındaki yatay ayrılma da bu çalışma kapsamında doğrulanmıştır.

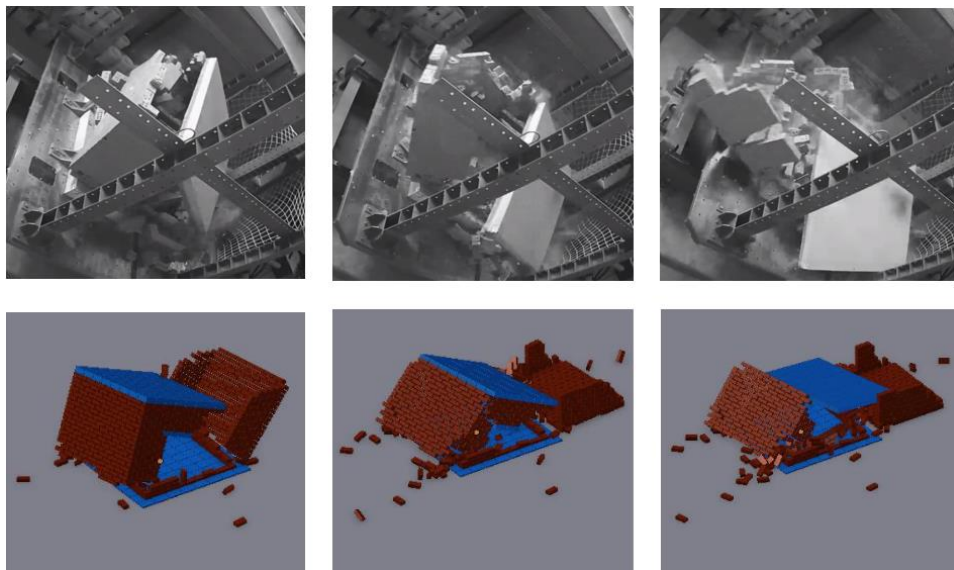


Şekil 2.36. GM-6'dan sonra simülasyon ve deney için yığma modelinin hasar koşulları ve çatlama modelleri

Deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi, modelde burulma hareketi gözlemlendi ve simülasyon da bu hareketi mükemmel bir şekilde tasvir etti. Şekil 2.37, 2.56 saniye, 3 saniye ve 4 saniyedeki model hasar durumundaki karşılaştırmaları göstermektedir. Bu bulguların net bir şekilde gösterimi ve doğrulamak için kılavuz çizgileri ve cetvel kullanımı tercih edilmiştir. Enkaz oluşumunun yönü ve şekli Şekil 2.38'de açık bir şekilde gösterilmektedir.



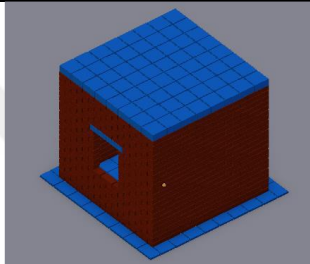
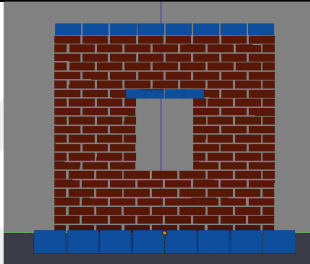
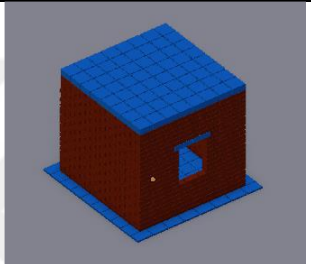
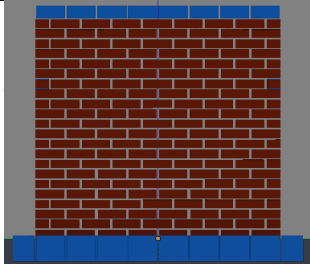
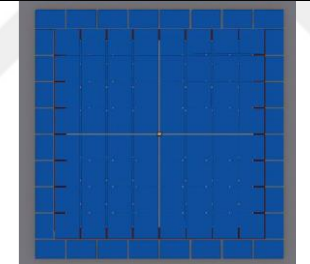
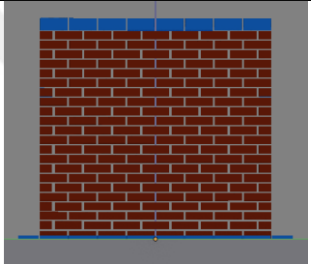
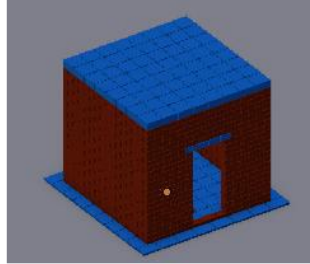
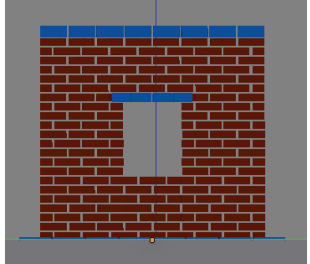
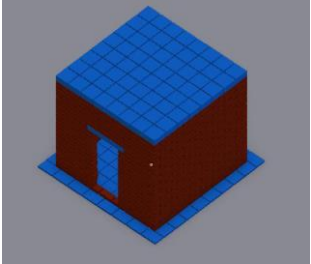
Şekil 2.37 Deneyde gözlemlendiği şekliyle burulma hareketinin gösterimi



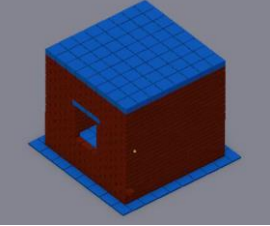
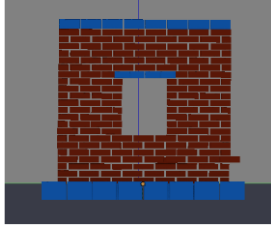
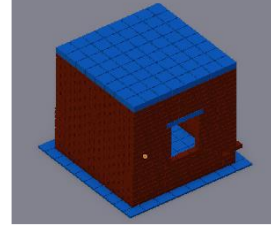
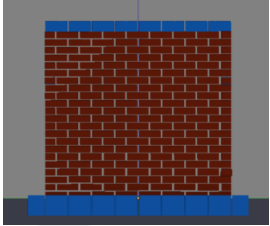
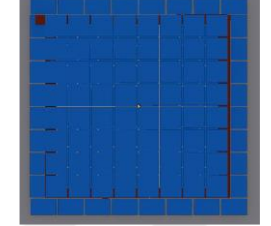
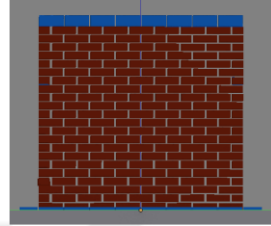
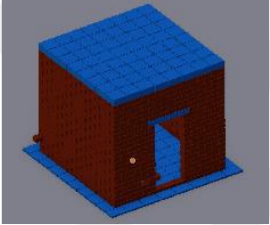
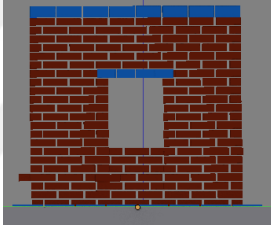
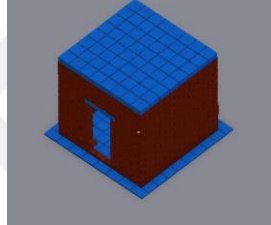
Şekil 2.38 Göçme durumunun yönü ve şekli

Göçmenin ilerleyişinin perspektif ve ortogonal görünümüleri Tablo 2.13- 2.19'de sunulmaktadır. Görüntüler 2,56 saniye (çatlak başlangıç noktası), 3 saniye, 4 saniye, 5 saniye, 6 saniye, 7 saniye ve 8,36 saniye (yer hareketinin sonu) olarak alınmıştır. Ancak, net enkaz oluşumunu sağlamak için analiz 10 saniyeye kadar devam ettirildi. Modelin simülasyondan elde edilen görelî yer değıştirmesinin görselini gösteren görüntüler Tablo 2.20'da verilmektedir.

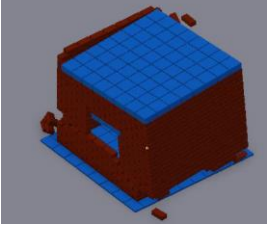
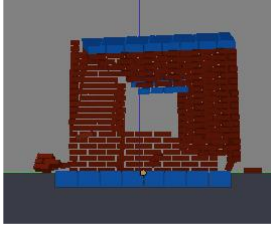
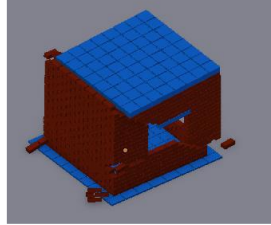
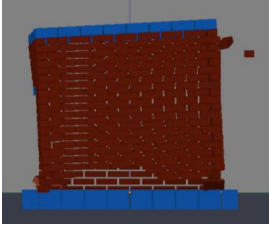
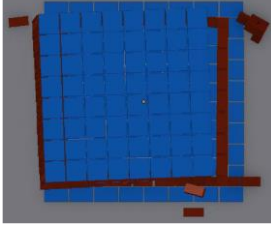
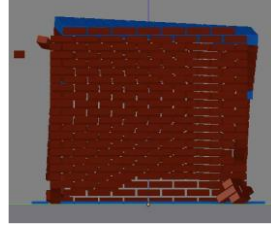
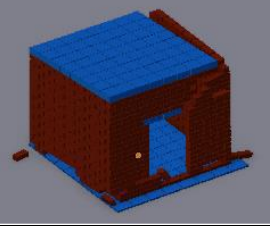
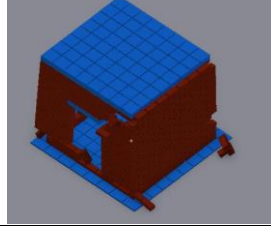
Tablo 2.13. Modelin 2,56. saniyede perspektif ve ortogonal görünümüleri (Çatlak Başlangıç noktası)

|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                                | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                  | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                                | Kuzeybatı                                                                             |

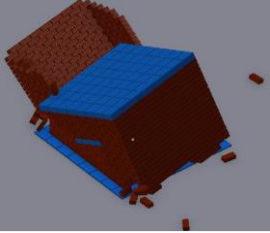
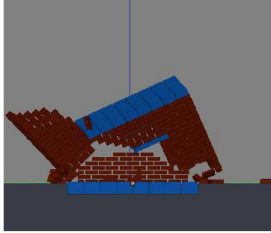
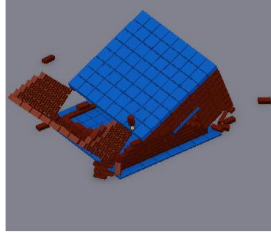
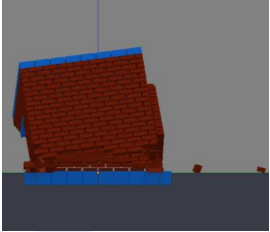
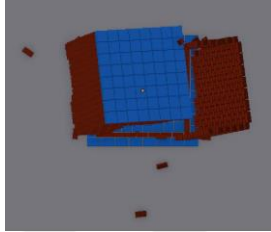
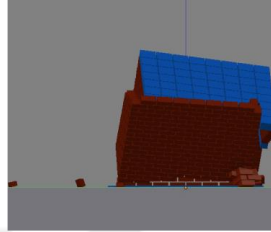
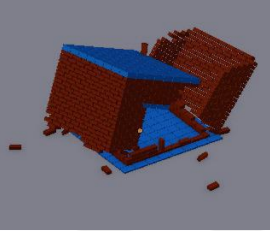
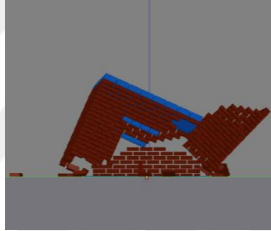
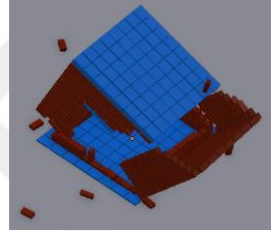
Tablo 2.14. Modelin 3. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

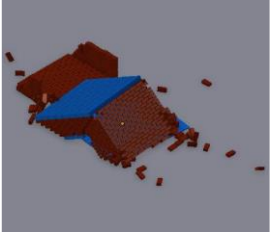
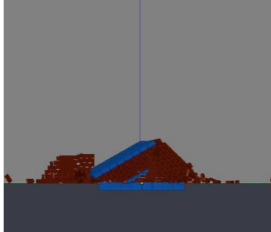
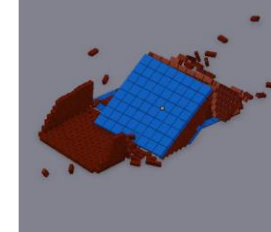
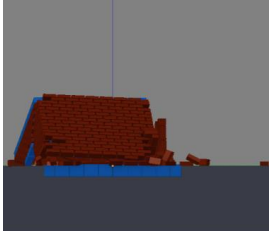
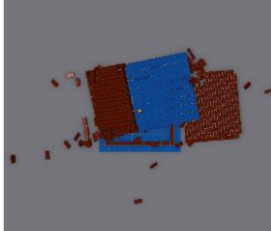
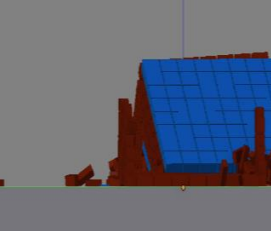
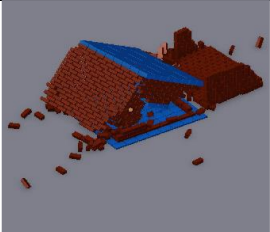
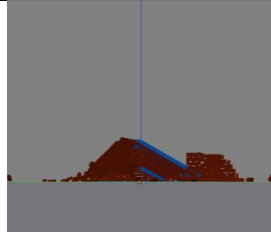
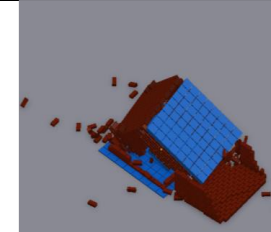
Tablo 2.15. Modelin 4. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                               | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                 | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                               | Kuzeybatı                                                                             |

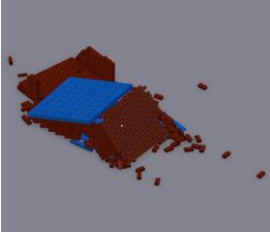
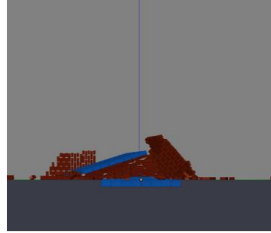
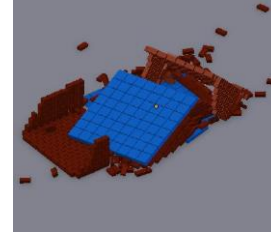
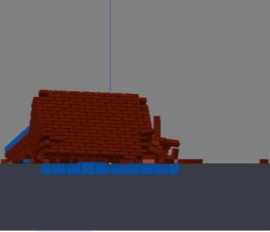
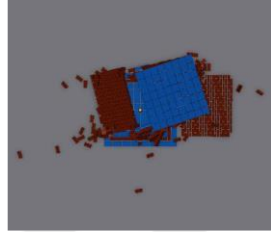
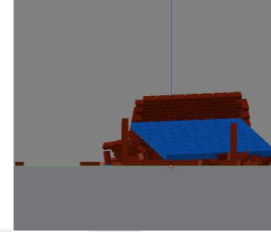
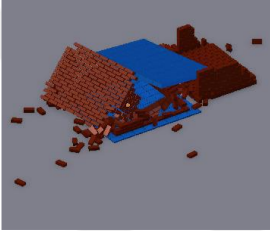
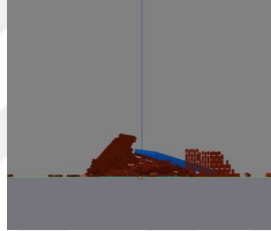
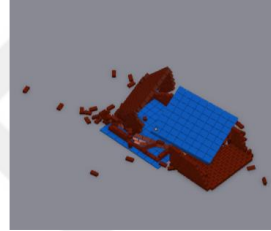
Tablo 2.16. Modelin 5. Saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

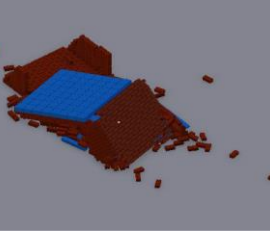
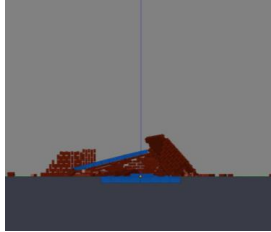
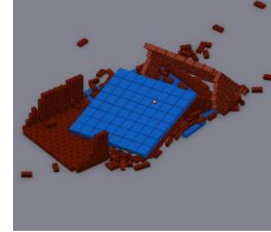
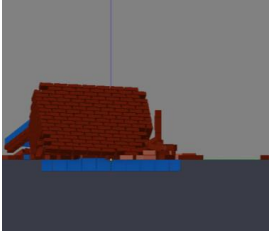
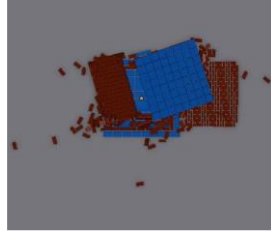
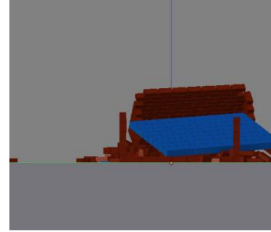
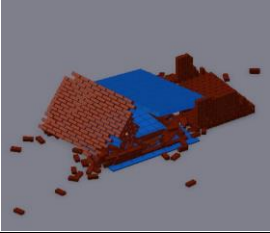
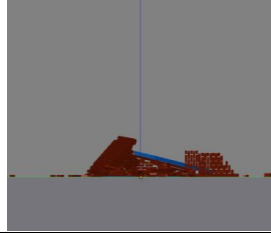
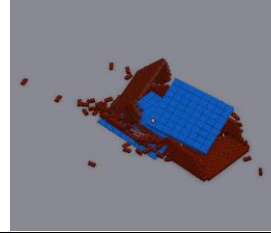
Tablo 2.17. Modelin 6. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                               | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                 | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                               | Kuzeybatı                                                                             |

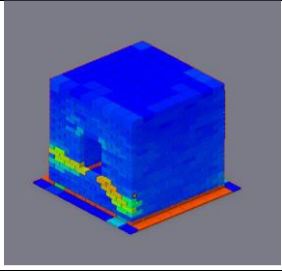
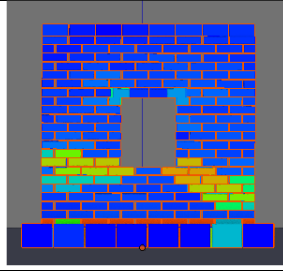
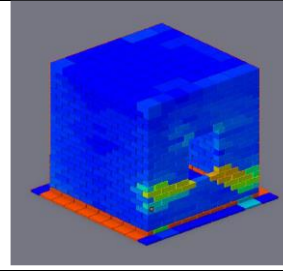
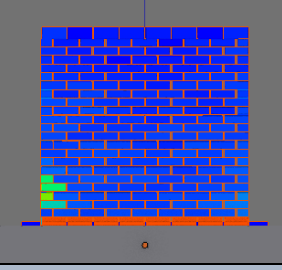
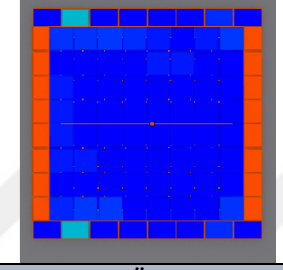
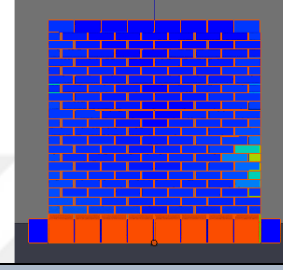
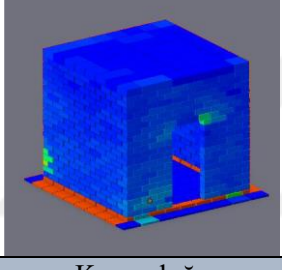
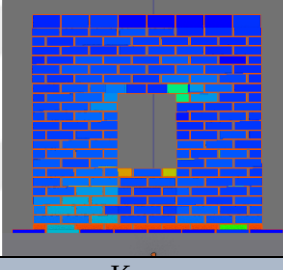
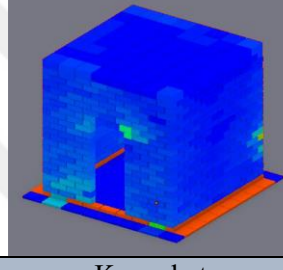
Tablo 2.18. Modelin 7. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

Tablo 2.19. Modelin 8.36. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                               | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                 | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                               | Kuzeybatı                                                                             |

Tablo 2.20. Modelin 2,56. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümleri (Çatlak Başlangıç noktası)

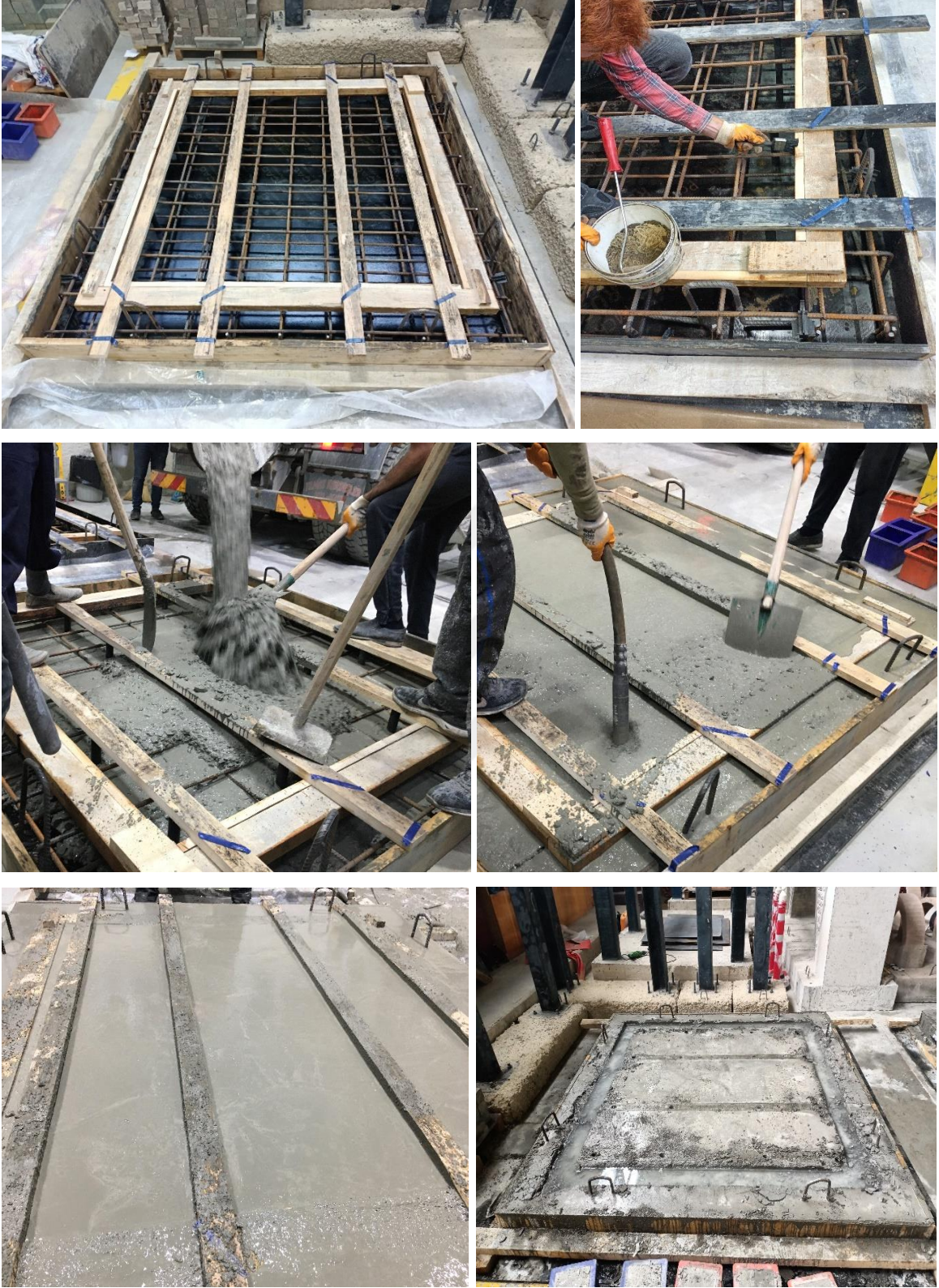
|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

### 2.2.2. Tuğla Bina Modeli

Bu deney kapsamında, ön deney kısmında anlatılan  $\frac{1}{2}$  ölçekli modelin bir benzeri laboratuvar ortamında tekrar inşa edilmiştir. Bu modelin tekrar yapılmasındaki amaç ise asıl deneylerimizi güçlendirme ve döşemede kütle simülasyonunu uygulayarak ek kütleler kullanarak yapabilmektir. Ön deneylerden elde ettiğimiz veriler doğrultusunda deney düzeneğinde birkaç değişiklik olmuştur. Bu bölümdeki deney çalışmaları güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Her bölüm üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki modelin hasarsız durumları için DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin bulunması. İkinci aşama ise sismik koşulların gerçekleştiği sarsma masası deneyleridir. Son aşama ise her sismik uyarım öncesi ve sonrası DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi.

#### 2.2.2.1. Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları

Deney modeli, profesyonel duvar ustaları tarafından  $\frac{1}{2}$  ölçekli olarak laboratuvarda üretilmiştir. Öncelikle temelde bir kare olan modelin temeli üretildi. Daha sonra duvarlar ve döşeme tamamlandı. Duvarların kalınlığı 10 cm'dir. Temele konulan 16 mm'lik demir kancalar yardımıyla model inşasından sonra sarsma masasına taşındı. Duvarlar, sabit sınır koşulunu temsil etmek için temele 2-3 cm derinlikte olacak şekilde gömülmüştür (Şekil 2.7). Yapılan bu gömülme işleminin nedeni test sırasında yığma yapı modelinin temel-duvar birleşim yerinden kaymayı/kesmeyi önlemek içindir. Hazır beton santrallerinden temin edilen beton ile temel betonu dökülmüştür. Döküm esnasında küp ve silindir numuneler malzeme deneyi için alınmıştır. Temel kalıp hazırlanması ve temel beton dökümüne ait görseller Şekil 2.39'da verilmiştir. Ön deney ile asıl deney modellerini farklı ustalar üretmiştir. Harç özellikleri ve derz kalınlıkları ön deneydeki modelde kullanılanların aynıdır. Şekil 2.40'ta duvar üretimine ait ayrıntılı görseller sunulmuştur.



Şekil 2.39 Temel kalıp işlemleri ve beton dökümü



Şekil 2.40. Delikli tuğla duvar üretimi

Taşıyıcı duvar imalatından 7 gün sonra döşeme kalıp çalışmalarına başlanmıştır. Model içine düzgün bir şekilde yerleştirilen 5x10 cm’lik dikmeler ile döşeme kalıbı sabit tutulmuştur. Döşeme kalıbı hazırlığı bittikten sonra döşeme yüzeyi düzgün ve pürüzsüz olması için yağlanmıştır. Döşeme kalıbı imalatına ait görseller daha önceki bölümde bulunan Şekil 2.10’da verilmiştir. Bu tez kapsamında hatıl imalatı yapılmadığı için döşemenin duvardan sabit sınır koşulunu sağlaması için 12 adet 8 mm’lik donatılar yaklaşık 15 cm ara ile en üst duvar birim sırasına yerleştirilmiştir. Bu işlemin yapılma sebebi döşemenin duvardan kesme/kayma durumunu minimize etmektir. Kenarlardan 5cm paspayı bırakılarak

çift yönlü olmak üzere toplamda 24 adet 8 mm'lik boyuna donatılar kalıp içine yerleştirilmiştir. Son inşa aşaması olan döşeme aşaması bitmiş ve inşa aşamaları tamamlanmış tuğla modele ait resimler Şekil 2.41'de verilmektedir.



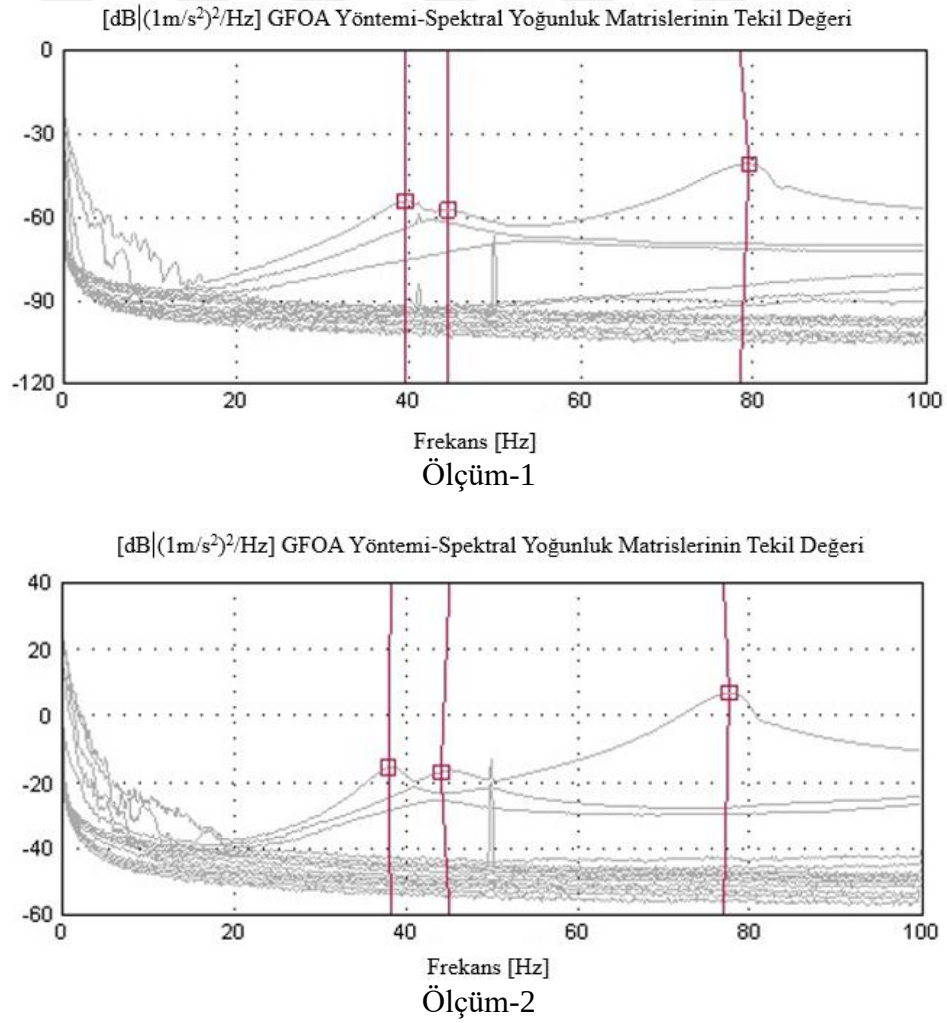
Şekil 2.41 İnşası tamamlanmış tuğla model

#### 2.2.2.2. Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Ön deney çalışmasının ilgili bölümünde de bahsedildiği gibi tuğla modelin inşa süresi bittikten sonra uygun kür koşullarında model sulanmıştır. Dayanımını kazandıktan sonra hasarsız dinamik karakteristiklerini elde etmek için DMA yöntemi uygulanmış ve dinamik parametreler (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar modellerinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için kullanılan DMA yönteminde 2.2.1.2. bölümünde anlatılan ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yine aynı bölümde anlatılan yöntemler ve ölçüm prosedürünün aynısı bu çalışmada da uygulanmıştır. Tüm bu ölçümlere ait PULSE yazılımında oluşturulan model ve ivmeölçere ait yerleşim düzeni ön deney kısmının ilgili bölümünde bulunan Şekil 2.13'te şematik olarak verilmiştir. Ölçümlerin alınmasına ait görsel ise Şekil 2.42'de verilmiştir. Hasarsız durum için alınan dinamik karakteristikler sarsma masasına yerleştirilmeden yerde alınan ölçümlere aittir. Tuğla model binanın OMA deneylerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması ile elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin grafiği 3 ölçüm içinde şekil 2.43'te verilmiştir. Tuğla model için elde edilen ilk üç mod şekli şekil 2.44'te verilmiştir.

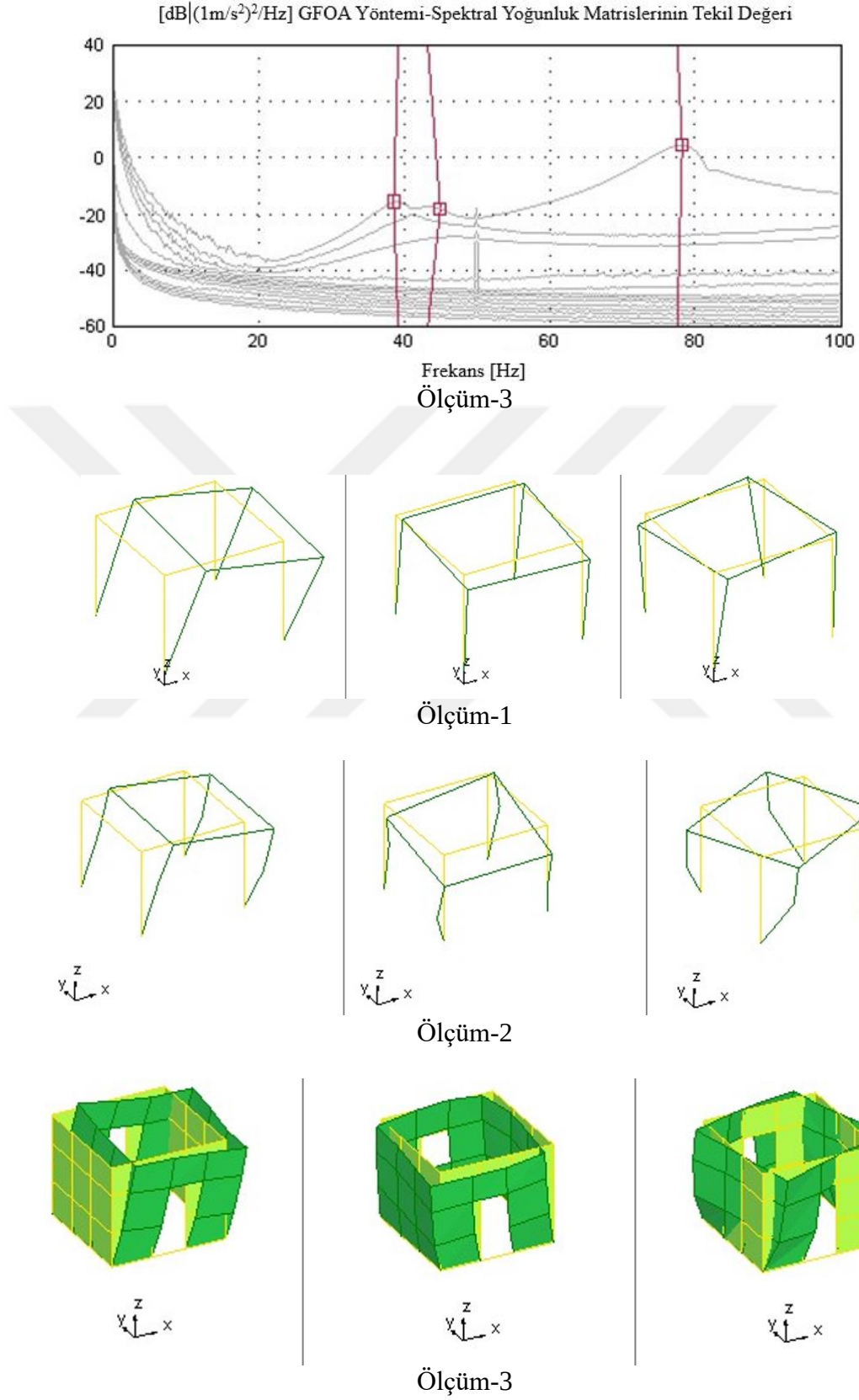


Şekil 2.42. DMA ölçümlerine ait görsel



Şekil 2.43. Tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.43'ün devamı



Şekil 2.44. Tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Tuğla model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.21’de verilmektedir. Tablo 2.21 incelendiğinde tuğla model için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla ölçüm-1 için 39.78-78.5 Hz ve %3.176-3.861 arasındadır. Ölçüm-2 için ise doğal frekans ve sönüm oranı 38.29-76.97 Hz ve %2.811-4.33 arasında elde edilmiştir. Ölçüm-3 için ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 39.23-77.56 Hz ve %2.698-3.036 arasında olduğu görülmektedir.

Tablo 2.21. Tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler

| Mod No.    | Ölçüm-1      |                 | Ölçüm-2      |                 | Ölçüm-3      |                 |
|------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|            | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) |
| 1(Enine)   | 39.78        | 3.861           | 38.29        | 3.74            | 39.23        | 3.036           |
| 2(Boyuna)  | 44.63        | 3.187           | 45.13        | 4.33            | 43.3         | 2.698           |
| 3(Burulma) | 78.5         | 3.176           | 76.97        | 2.811           | 77.56        | 2.988           |

### 2.2.2.3. Sarsma Masası Deneyleri

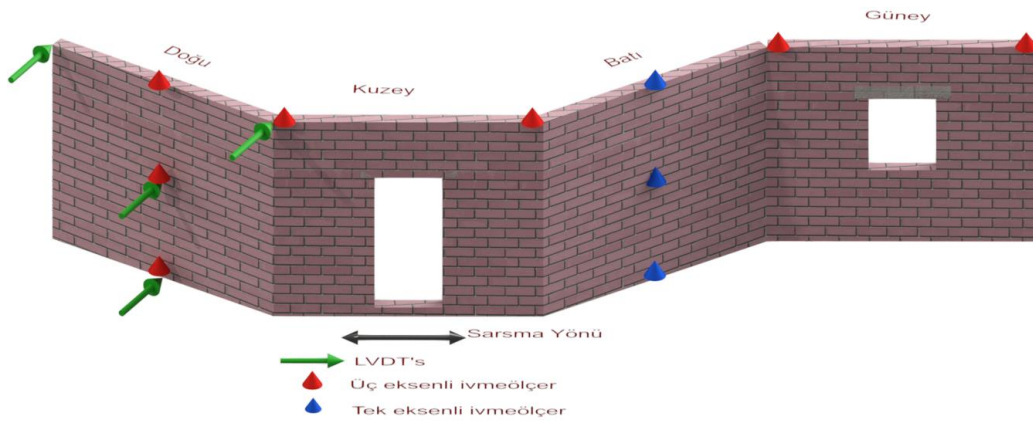
Ölçekli tuğla binanın deprem davranışının incelenebilmesi amacıyla sarsma masası deneyleri uygulanmıştır ve çıktılar işlenerek yapısal tepkiler verilmektedir. Sarsma masası deneylerinde uygulanan sismik uyarılar, gerçek deprem kayıtları veya yapay uyarılar olabilir. Sismik uyarılmaların yapılarda ve yapı elemanlarında neden olduğu iç kuvvetler ve deformasyonlar sarsma masası deneylerinde doğru bir şekilde belirlenebilir.

Bu çalışmada, ön deneyden farklı olarak deney numunelerinin ölçeklendirilmesinde yapay kütle benzeştirmesi modeli kullanılması nedeniyle deneyler sırasında her bir kata ilave kütleler eklenmiştir. Bir diğer fark ise kullanılan yer hareketleridir. Ön deneyden elde ettiğimiz tecrübe ile sonraki deneyler sırasında ülkemizde geçmiş yıllarda meydana gelmiş 1992 Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında ölçekli deney numuneleri kullanıldığı için seçilen Erzincan depreminin ivme kaydının da ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Erzincan depreminin ölçeklendirilmiş 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artımlı olarak uygulandı. Daha sonra hasar durumuna göre iki adet 0.5g ve 0.7 g büyüklüklerinde sinüs dalgasının uygulanması ile altı farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2.3.1. Sarsma Masası Deney Kurulumu

Laboratuvar zemininde inşa edilen deney modeli daha sonra düz bir polyester kaldırma askısı ve tek kirişli bir gezer vinç kullanılarak sarsma masasına taşınmıştır. Ön deney numunesi ile aynı model olduğu için numunenin taşınımı ve montajı benzerdir. Modelin sarsma masasına taşınması ve montajı ile ilgili görseller Şekil 2.17’de verilmiştir.

Sarsma masası deneyleri sırasında modelin genel ve lokal davranışını ölçmek için ivmeölçerler ve LPDT’ler kullanıldı. Ayrıca ölçüm sistemlerinden elde edilen yapısal tepkiler işlenerek hasarlarla ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla, uygulanan ve ölçülen sismik uyarımları karşılaştırmak için sarsma masasının rijit platformuna çift eksenli bir ivmeölçer sabitlenmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller arası atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başlangıcının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu nedenle, test numunesinin farklı bölgelerine birçok ivmeölçer yerleştirilmiştir. Batıya bakan duvarda düzlem dışı tepkiyi ölçmek için üç adet tek eksenli ivmeölçer kullanıldı. Test modelinin farklı yüksekliklerinde ve bölgelerinde düzlem içi ve düzlem dışı yapısal tepkileri izlemek için yedi adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirildi. Titreşim yönünde test numunesinin yüksekliği boyunca göreceli yer değiştirmeler ve sürüklenme oranlarındaki değişiklikler dört adet LPDT ile izlendi. Bunlardan biri temel seviyesinde ve diğeri orta yükseklikte yerleştirilmiştir. Diğer ikisi çatı seviyesinde bulunuyordu. Sarsma masası deneyleri sırasında oluşabilecek olası burulma tepkileri de çatı hizasına yerleştirilmiş iki adet LPDT ile izlenmiştir. Asıl deneylerde kullanılan ivmeölçerlerin yerleri ön deneyde kullanılan ivmeölçerlerden farklıdır. Şekil 2.45, ivmeölçerlerin ve LPDT’lerin düzenini göstermektedir. Tuğla numunesine ait deney düzeneğine ait resimler şekil 2.46’da verilmiştir.



Şekil 2.45. LPDT ve ivmeölçer konum ve doğrultuları



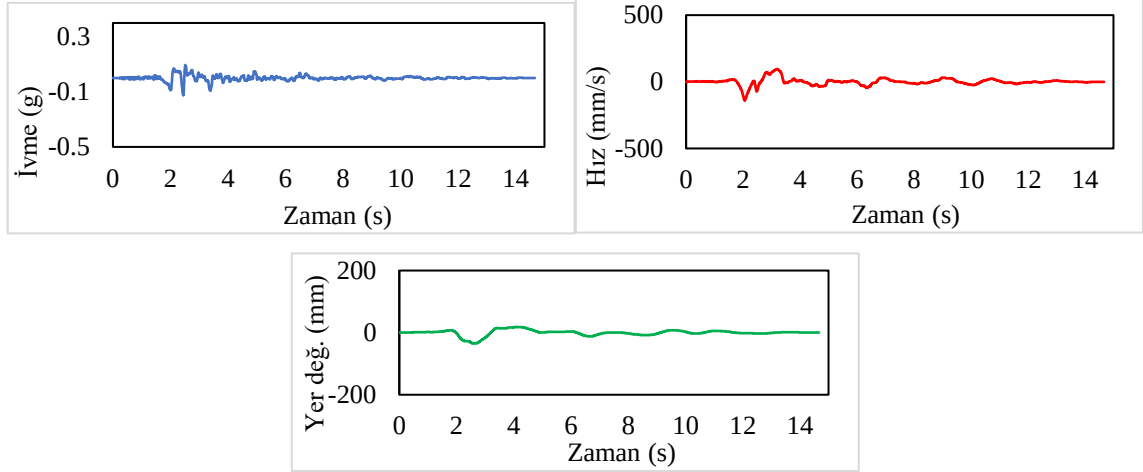
Şekil 2.46. Tuğla modelde kullanılan deney düzeneğine ait görseller

Farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun arttırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Bu süreçte yoğunluk ölçüsü olarak PGA değerleri dikkate alınmıştır. Test için Erzincan depremi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Sarsma masası testi için doğal yer hareketleri Erzincan depreminin %25 (PGA=0.13 g), %50 (PGA=0.25 g), %75 (PGA=0.37) ve %100 (PGA=0.50 g)'ü seçilmiştir. Ayrıca genliği 50 mm, frekansı 1.6 Hz ve 0.5 g olan ve genliği 25 mm, frekansı 2.7 Hz ve 0.7 g olan sinüs dalgası 5 döngülü olarak dikkate alınarak uygulanmıştır.

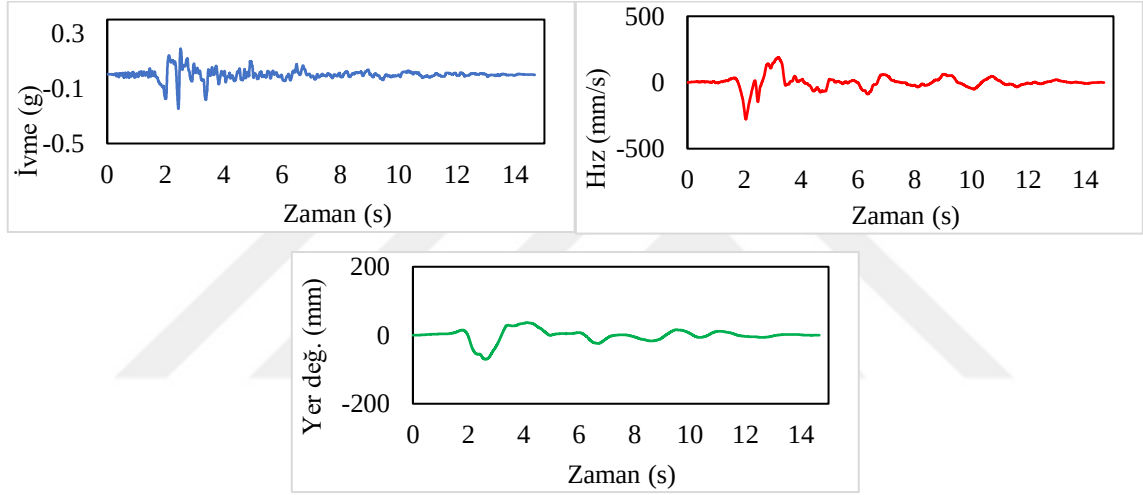
Üretilen deney numuneleri ½ ölçekli olarak imal edildiği ve deneylerde kullanıldığı için seçilen ivme kayıtlarının da ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde anlatılan ölçeklendirme esasları dikkate alındığında deprem verisinin genlik ölçeği “1” alınmalıdır. Yine aynı ölçeklendirme esasları deprem verisinin zaman eksenini deneylerde kullanılan ölçek katsayısının karekökü ile ölçeklendirmeyi belirtmektedir. Bu bağlamda seçilen depremin ivme genliğinde herhangi bir ölçeklendirme uygulanmamıştır. Fakat tasarlanan ölçeklendirme katsayısının yarım ölçek olmasından dolayı seçilen yer hareketinin zaman eksenini 1.41 ( $\sqrt{2}$ ) ile bölünmüştür. Erzincan depreminin ölçeklendirilmiş 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artımlı olarak uygulandı. Daha sonra hasar durumuna göre iki adet 0.5g ve 0.7 g büyüklüklerinde sinüs dalgasının uygulanması ile altı farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.22, geçmiş depremlerden seçilen yer hareketlerinin test sırasını ve özelliklerini özetlemektedir. Şekil 2.47, seçilen kayıtların ivmelerini ve tepki spektrumlarını (%5 sönüm oranı için) göstermektedir.

Tablo 2.22. Uygulanan yer hareketleri

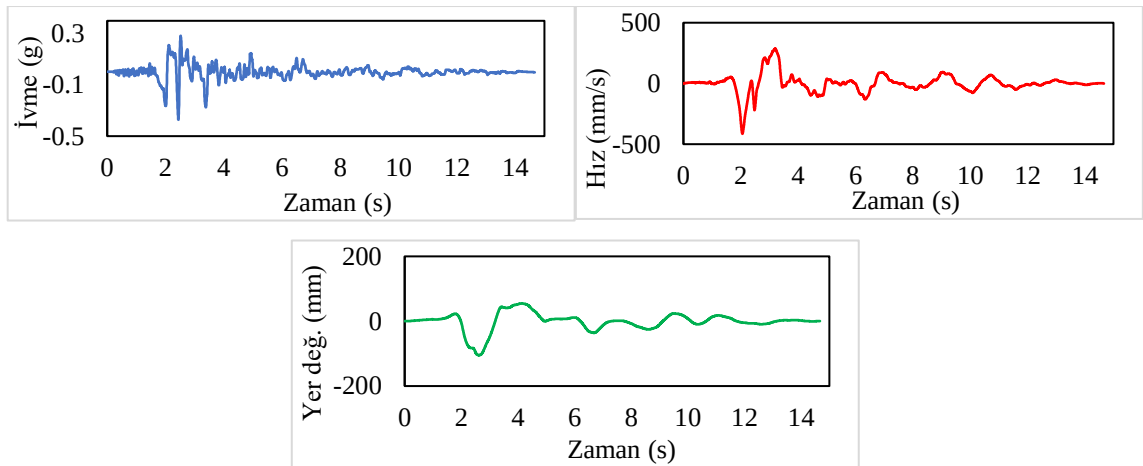
| No   | Deprem           | İstasyon | PGA<br>g | PGD<br>cm | Frekans<br>Hz |
|------|------------------|----------|----------|-----------|---------------|
| GM-1 | Erz 25 (0.25)    | Erzincan | 0.13     | 3.50      | -             |
| GM-2 | Erz 50 (0.50)    | Erzincan | 0.25     | 7.00      | -             |
| GM-3 | Erz 75 (0.75)    | Erzincan | 0.37     | 10.50     | -             |
| GM-4 | Erz 100 (1.00)   | Erzincan | 0.50     | 14.00     | -             |
| GM-5 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.50     | 5.00      | 1.60          |
| GM-6 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.70     | 2.50      | 2.70          |



(a) ERZ 25



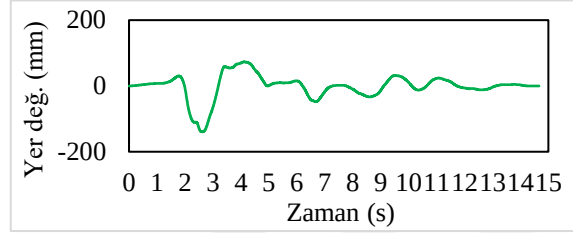
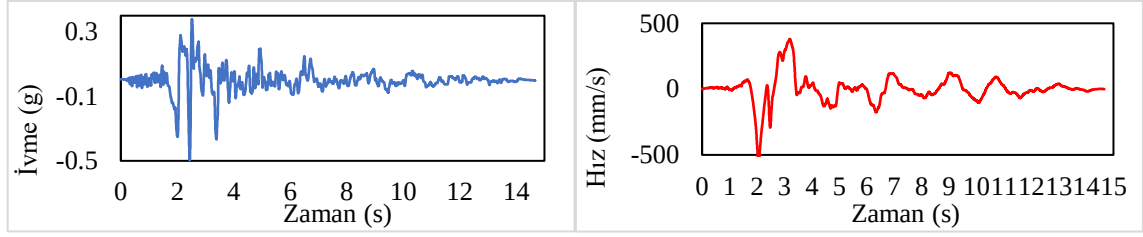
(b) ERZ 50



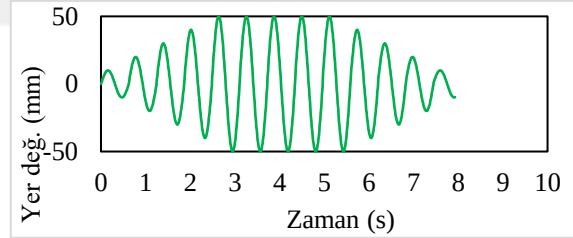
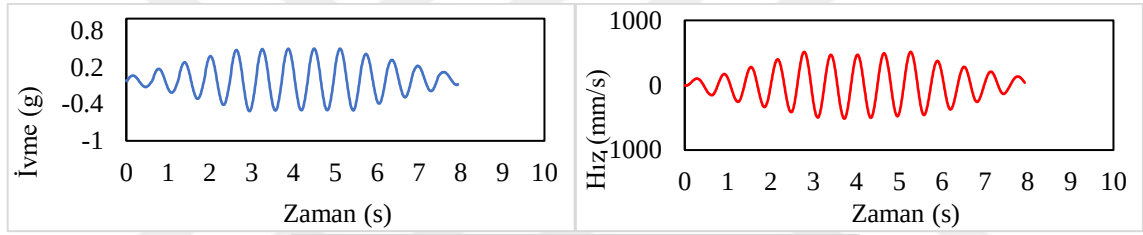
(c) ERZ 75

Şekil 2.47. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri

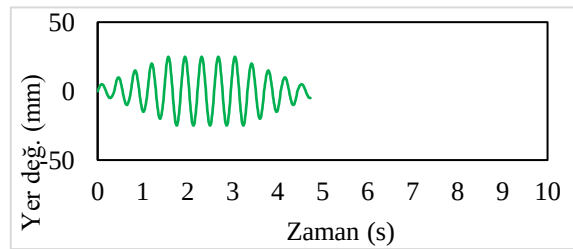
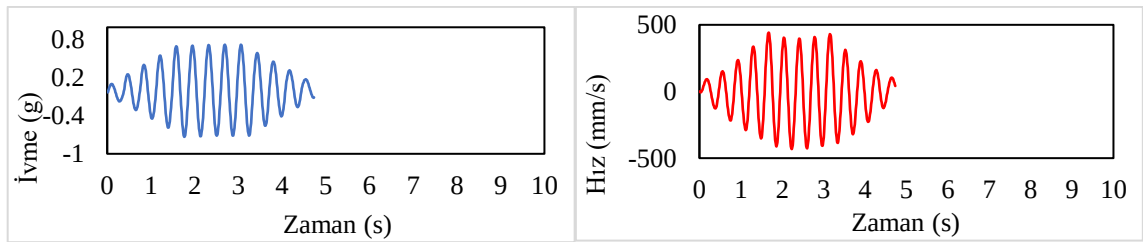
Şekil 2.47'nin devamı



(d) ERZ 100

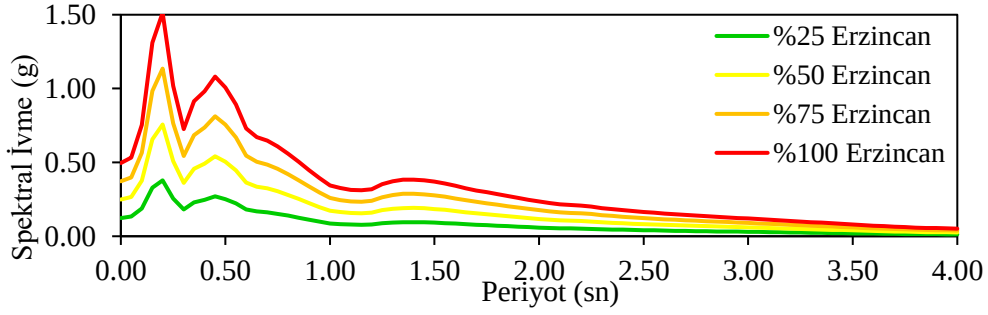


(e) Sinüs (0.5 g)



(f) Sinüs (0.7 g)

Şekil 2.47'nin devamı



(g) Spektral ivme (%5 sönüm oranı için)

### 2.2.2.3.2. Deney Sonuçları

#### 2.2.2.3.2.1. Deney Sonrası Hasar Tespitleri

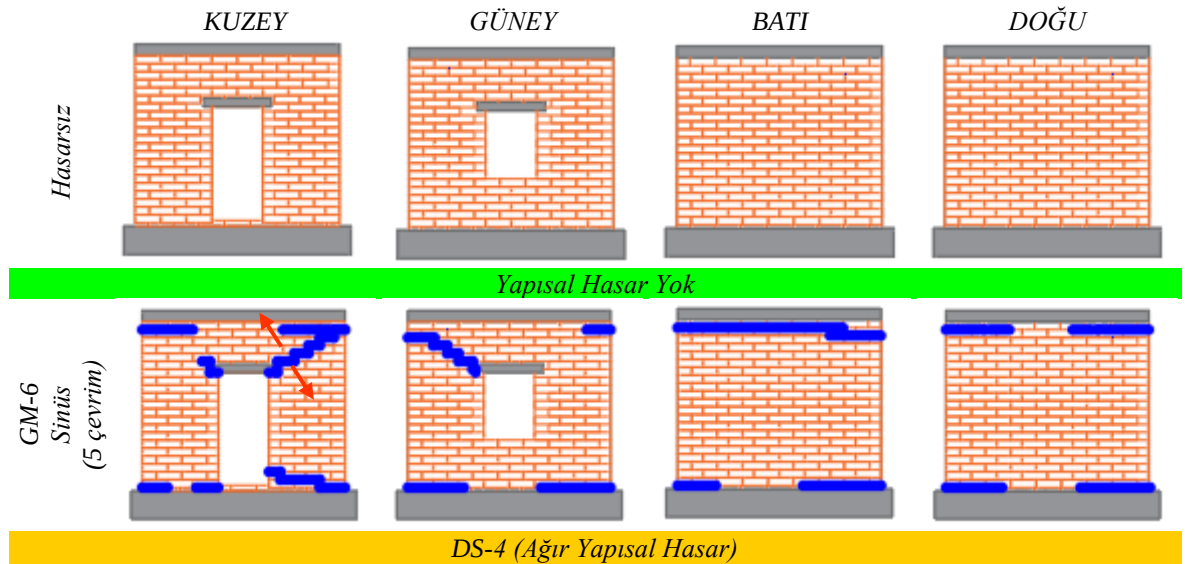
Her yer hareketinin sarsma masasına uygulanmasından sonra test numunesi görsel ve deneysel olarak incelenmiştir. Görsel gözlemlerde, test sonrası hasarı değerlendirmek için çatlak yayılımları duvarlarda işaretlendi. Hasarın deneysel olarak gözlemlenebilmesi için test numunelerinin hasarsız (başlangıç) ve hasarlı durumları için modal parametreler, test öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim ölçümleri ile belirlenmiştir.

Ön deney numunesindeki hasarın niteliksel bir tanımı için, Avrupa Makrosismik Ölçeği'nde (EMS-98) tanımlanan hasar sınıflandırması dikkate alınmıştır. Burada modelin gevrek bir davranış sergilemesi ve üzerinde ilave kütleler olması nedeniyle gevrek bir davranış sergiledi ve DS-4 hasar durumu gözlemlendi. Yani model aniden hasar olarak ağır hasar durumuna geldi.

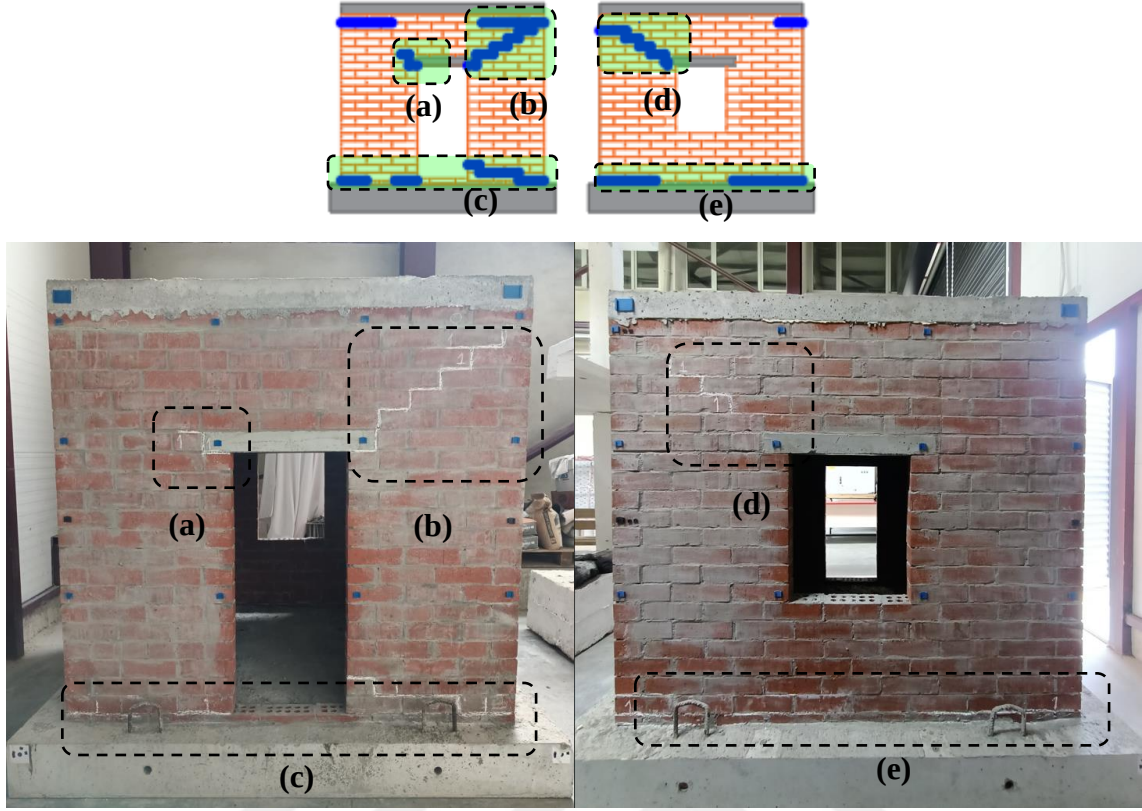
#### 2.2.2.3.2.2. Görsel Tespitler

Şekil 2.48, hasarsız ve DS-4 hasar durumu için dış yüzlerden görüntülenen deney numunesinin çatlak ilerlemesini özetlemektedir. Mavi işaretler deney sırasında gözlemlenen çatlaklarla ilişkilendirilir. Sarsma masası deneyi sırasında Erzincan depremlerine (ERZ 25, ERZ 50, ERZ 75 ve ERZ 100) karşılık gelen ilk dört yer hareketinde görünür çatlaklar gözlenmedi. Daha sonra GM- 5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA= 0.5 g) uygulandı ve hasar gözlenmedi. Beş adet sismik uyarım karşısında yorulan model, GM-6 beş çevrimli sinüs

dalgası (PGA= 0.7 g) uyarımı sırasında DS-1, DS-2 ve DS-3 hasar durumlarını göstermeden aniden hasar alarak DS-4 tipi ağır yapısal hasar durumuna geçti. Bu aşamada, çatlakların önemli bir kısmı yataya yakındı ve döşeme seviyesinin hemen altındaki ilk iki tuğla ve tabandaki ilk iki tuğla sırasındaki kayma hareketinden kaynaklandı. Yığma yapılar için önceki deneysel çalışmalarda benzer çatlak yayılmaları rapor edilmiştir [221]. Ayrıca düzlem içi deformasyon, kapının üst köşesinden döşemeye kadar uzanan kuzeye bakan duvarda ve pencerenin üst köşesinden döşemeye kadar uzanan çapraz bir çatlığa neden olmuştur. Bu diyagonal çatlaklar harç yatağı derzleri boyunca oluşmuştur. Temel seviyesinin hemen üzerinde ilk iki tuğla sırasında ve lento kirişleri çevresinde de kesme/kayma çatlakları gözlenmiştir. Ancak sarsma masası deneyi sırasında kaydedilen videolardan, kapının üst köşesindeki diyagonal çatlakın genişliğinde önemli artışlar olduğu gözlemlendi. Test sırasında bu çatlak genişliklerinin santimetre mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle yapısal hasar DS-4 tipi olarak sınıflandırıldı. Hasarın DS-4'e ulaşması üzerine deney düzeneği üzerindeki ölçüm sistemleri (ivmeölçerler ve LPDT'ler) güvenlik amacıyla kaldırıldı. Şekil 2.49, dış yüzden bakıldığında DS-4 için test numunesinin hasar modelini göstermektedir.



Şekil 2.48. Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli.



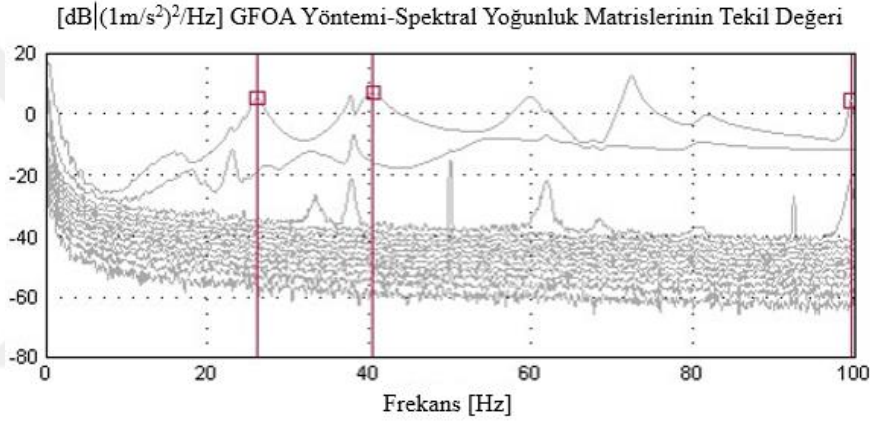
Şekil 2.49. DS-4 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli

#### 2.2.2.3.2.3. Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

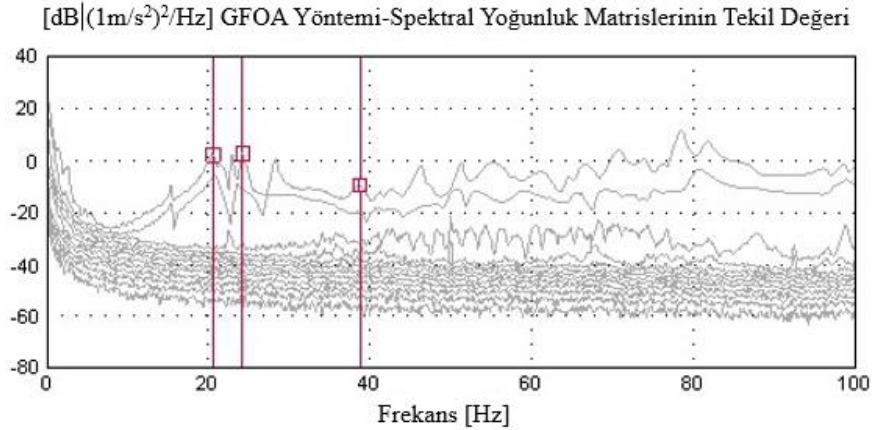
Bu çalışmada, görsel gözlemlere ek olarak, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında oluşan hasar ile yığma yapının modal parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her sarsma masası deneyinden sonra çevresel titreşim yöntemi ile DMA yapılmış ve dinamik karakteristi elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, hasar öncesi ölçümde dikkate alınan aynı ivmeölçer konumları ve ölçüm özellikleri kullanılarak tekrarlandı. Böylece elde edilen hasarsız ve hasarlı modal parametreler karşılaştırılarak hasarın modal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha önce verilen hasarsız modelin dinamik karakteristikleri yerde alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Fakat bu bölümde, model sarsma masasına yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır.

GFOA sonucunda ilk üç doğal frekans ve mod şekli için veri setinin Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 2.50 (a), hasarsız durumun (ilave kütesiz) grafiğini göstermektedir. Ayrıca DS-4 tipi için hasar durumlarının ilave kütesiz ve ilave kütleli halleri için grafikleri şekil 2.50 (c)(d)'de verilmiştir. Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafikleri mod şekillerine göre seçildikleri için grafikler otomatik olarak seçilmektedir. Bu

nedenle Şekil 2.50(e)'deki gibi düz bir çizginin oluşmama ihtimali vardır. Hasarsız durum (ilave kütsüz) için ilk üç doğal frekans sırasıyla 26.18Hz, 40.5Hz ve 99.56Hz olarak elde edilmiştir. Hasarsız durum (ilave kütleli) için ilk üç doğal frekans sırasıyla 22.97Hz, 24.24Hz ve 38.83Hz olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.50'den görülebileceği gibi, DS-4 için hasarlı koşulların (ilave kütsüz) üç doğal frekansı enine mod için 22.83Hz, boyuna mod için 24.93Hz ve burulma modları için 62.39Hz elde edilmiştir. DS-4 için hasarlı modelin (ilave kütleli) üç doğal frekansı sırasıyla 17.41 Hz, 22.4 Hz ve 37.58 Hz olarak belirlenmiştir. Hasarlı tuğla model DMA ölçümünden sonra sarsma masasından yere indirildi. Daha sonra yerde bir kez daha DMA ile dinamik karakteristikleri elde edildi.



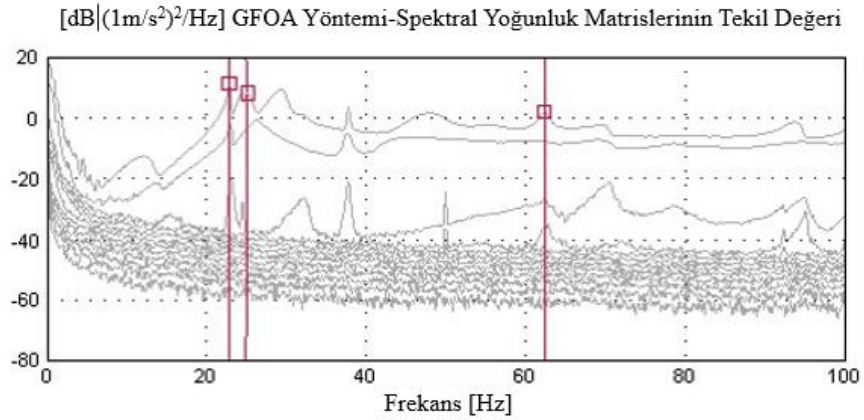
(a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz)



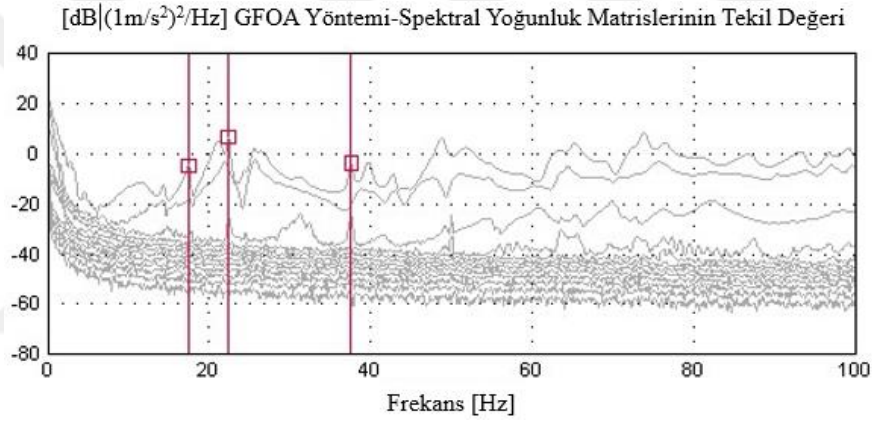
(b) Hasarsız durum için (İlave kütleli)

Şekil 2.50. Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum

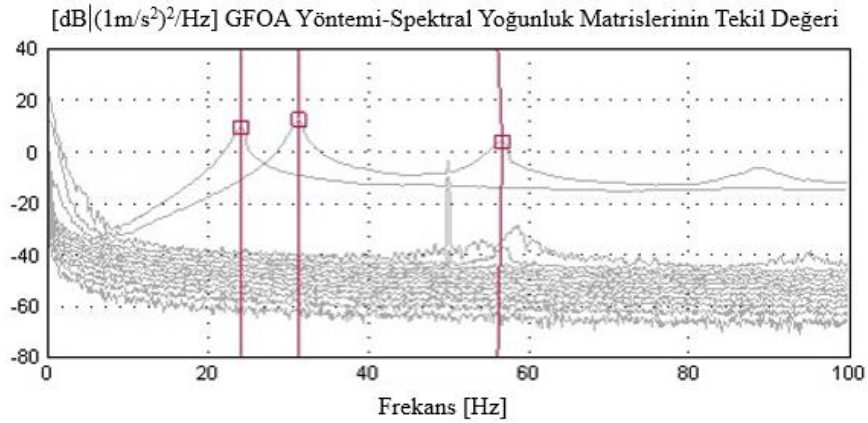
Şekil 2.50'nin devamı



(c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütlesiz)



(d) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli)

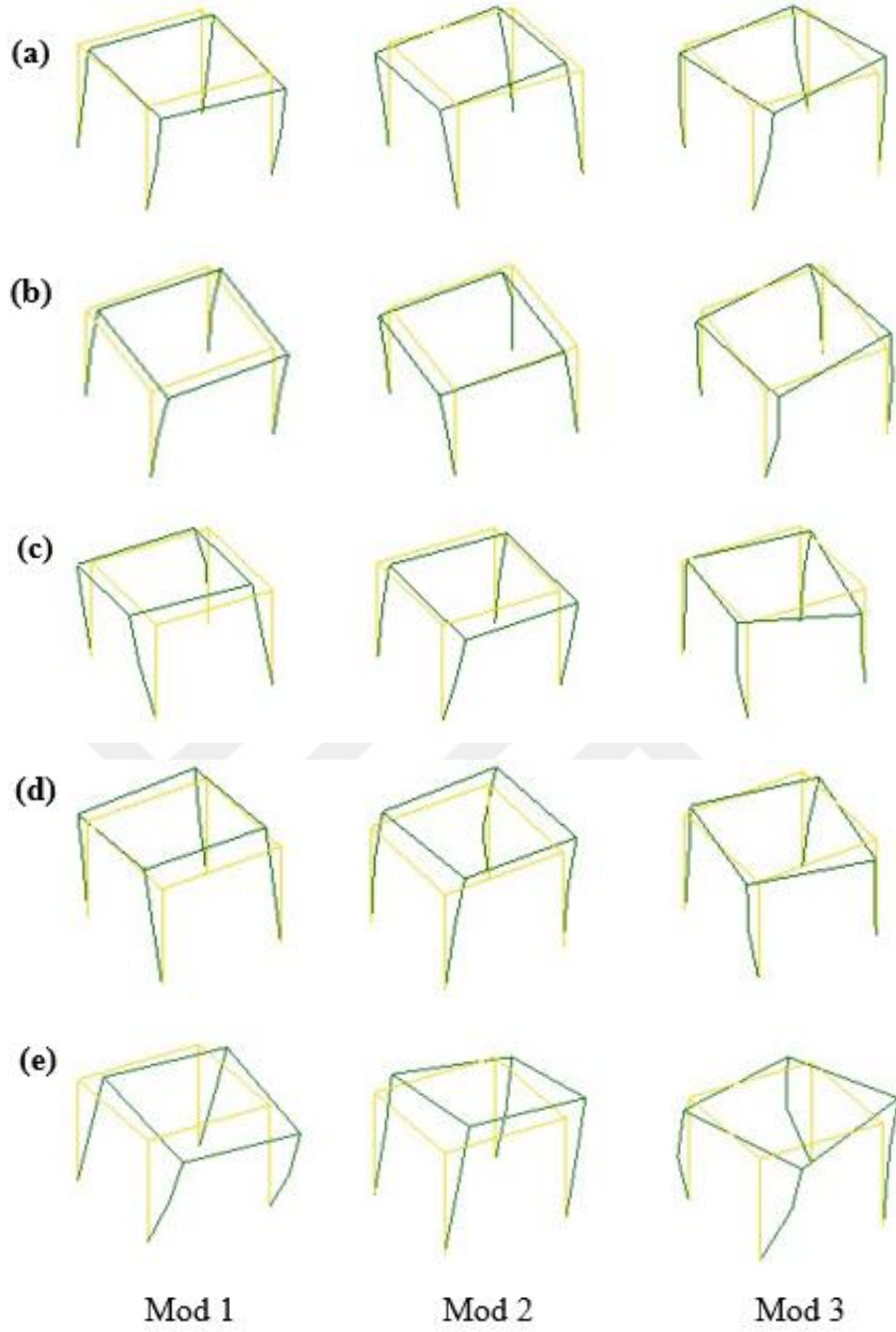


(e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum

Şekil 2.51, sarsma masası üzerinde alınan deney ölçümlerinden hasarsız ve hasarlı durumda (DS-4 tipi) elde edilen ilk üç mod şeklini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Zeminde alınan ölçümler ile sarsma masasına yerleştirilen modelin enine ve boyuna mod

şekilleri yer değiştirmiştir. Yapının mod şekillerinin yapısal hasar ile değiştiği sonucuna varılmıştır. Her modun genliğinin farklı salınım genliklerine sahip olduğu da belirtilmelidir. Ağır yapısal hasar durumu olan DS-4 tipi hasar oluşması durumunda mod şekillerinin yerlerinin değişmediği fakat ilave kütlelerin kalkması ile hasarlı durumun enine ve boyuna modun yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Artımlı dinamik testler sonucunda, duvarların üst ve alt kısımlarında çok sayıda çapraz ve yataya yakın çatlaklar görsel olarak gözlemlendi. Yapısal rijitliği azaltan bu hasarların özellikle enine ve burulma modlarında doğal frekanslarda düşüşlere neden olduğu görülmektedir. Tüm modlardaki frekanslarda hasarla birlikte yüksek değişimler gözlemlenmiştir. GM-1 (PGA=0.13g), GM-2 (PGA=0.25g), GM-3 (PGA= 0.37 g), GM-4 (PGA= 0.50 g) ve GM-5 (PGA= 0.5 g) sismik uyarılarda deney numunesinde görünür bir hasara neden olmadı ve bu nedenle doğal frekanslarda önemli bir değişiklik gözlenmedi. GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.70g) ile yapılan testte diyagonal çatlak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve yapısal hasar DS-4 tipi olarak sınıflandırılmıştır. Numuneler, DS-4 hasar durumuna ulaşıldığında en yüksek frekans düşüm oranına maruz kaldı. Düşüşler, ilave kütsüz durum için hasarsız duruma göre enine mod için %43.6, boyuna mod için %4.8 ve burulma modu için %37.3 olarak hesaplandı. Düşüşler hasarsız duruma (ilave kütleli durumlar) göre boyuna mod için %24.2, enine mod için %7.6 ve burulma modu için %3.2 olarak hesaplandı. Tablo 2.23'te tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki ve hasarsız durum için dinamik karakteristikler verilmiştir. İlave kütleli modeller ve ilave kütsüz durumları içinde karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra hasarlı modelin sarsma masasından indirildikten sonra tekrar dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra güçlendirme aşamasına geçilmiştir.

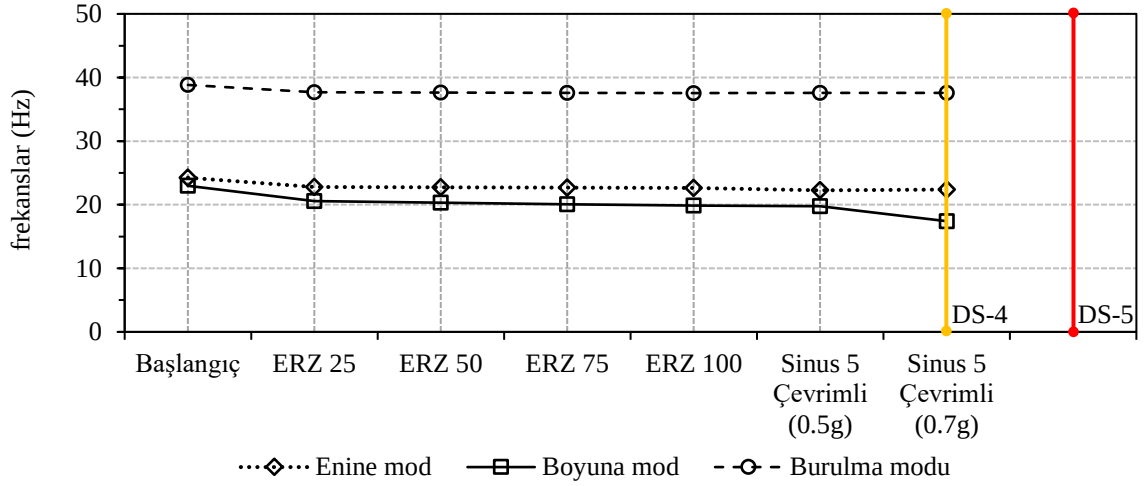


Şekil 2.51 Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-4 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum

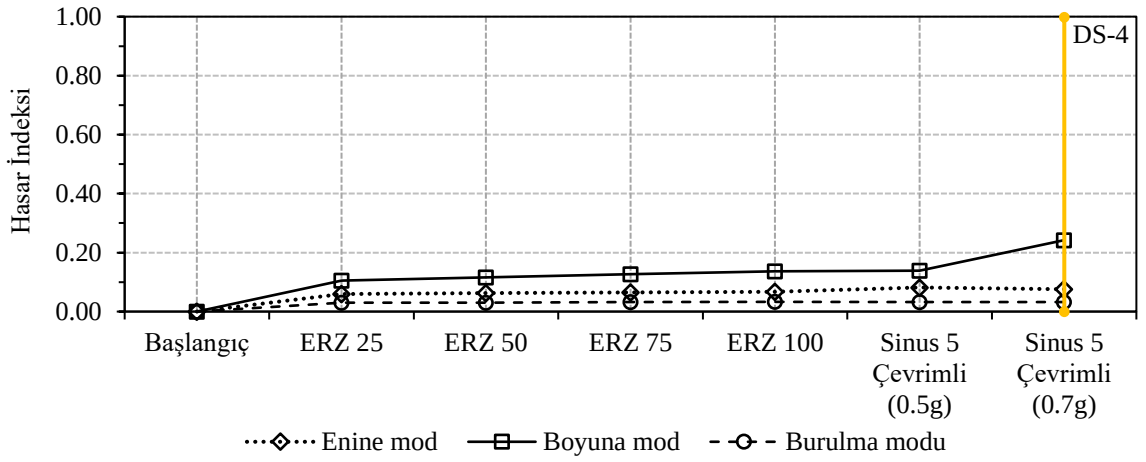
Tablo 2.23. Tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler

| Hasar Durumu                              | Enine Mod | Boyuna Mod | Burulma Modu |
|-------------------------------------------|-----------|------------|--------------|
| Frekans Değerleri (Hz)                    |           |            |              |
| Hasarsız (İlave kütsesiz)                 | 40.50     | 26.18      | 99.56        |
| Hasarsız (İlave kütleli)                  | 24.24     | 22.97      | 38.83        |
| DS-4 (İlave kütsesiz)                     | 22.83     | 24.93      | 62.39        |
| DS-4 (İlave kütleli)                      | 22.40     | 17.41      | 37.58        |
| Sarsma masasından indirilen hasarlı model | 31.27     | 24.11      | 56.15        |
| Sönüm Oranları (%)                        |           |            |              |
| Hasarsız (İlave kütsesiz)                 | 2.689     | 3.633      | 0.2428       |
| Hasarsız (İlave kütleli)                  | 1.08      | 0.73       | 1.039        |
| DS-4 (İlave kütsesiz)                     | 0.73      | 2.589      | 1.037        |
| DS-4 (İlave kütleli)                      | 0.715     | 1.345      | 0.46         |
| Sarsma masasından indirilen hasarlı model | 2.081     | 2.691      | 2.215        |

Şekil 2.52’de tuğla model numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekanstaki değişiklikler verilmiştir. Tuğla model için sarsma masası deneylerinden sonra ağır hasar durumuna kadar doğal frekanslarda kademeli düşüşler gözlenmemiştir. Fakat boyuna mod için hasarsız duruma göre %24.2 seviyesinde frekans azalması belirlenmiştir. Bu nedenle ilk sismik uyarımdan sonra oluşan başlangıç yapısal olmayan hasarlarından yapısal hasarın gözleendiği GM-6 sismik uyarımdan önceki duruma kadar DI değerlerinde önemsiz artışlar gözleendi ve bu görsel gözlemlerle de uyumluydu. GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.70g) ile yapılan deney sonrasında ulaşılan DS-4’te DI değerleri boyuna mod için 0.24, enine mod için 0.08 ve burulma modu için 0.03 olarak belirlendi. Hasar durumları için test numunesinin ilk üç doğal frekansına ilişkin DI, Şekil 2.53’te verilmiştir.



Şekil 2.52. Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler



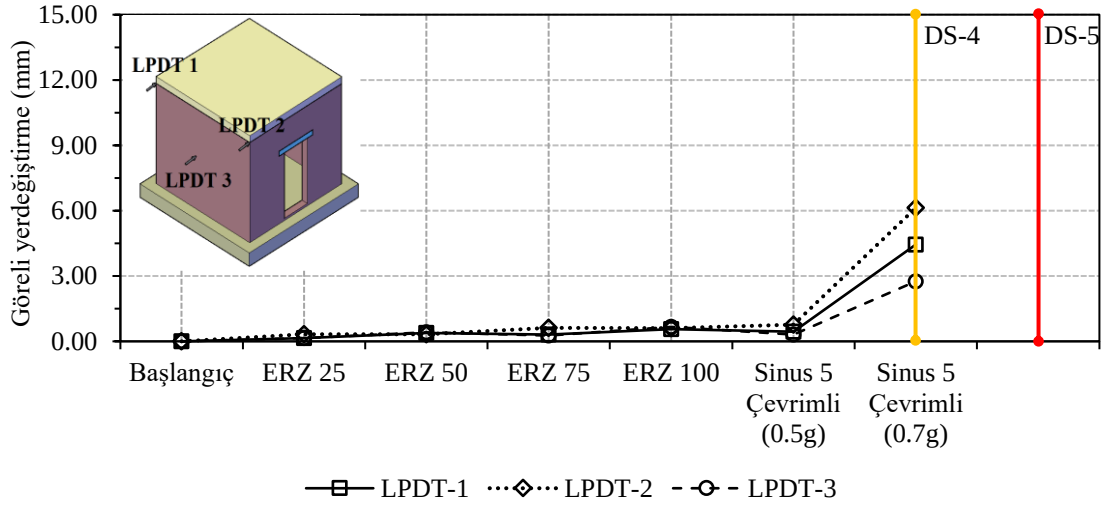
Şekil 2.53. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI

#### 2.2.2.3.2.4. Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi

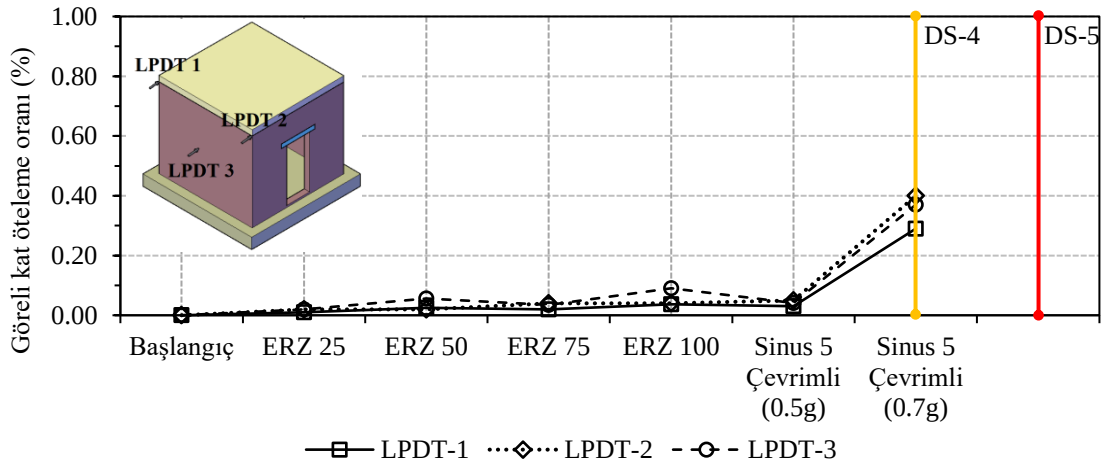
Bu bölümde, ölçüm sistemlerinden elde edilen çıktılar işlenerek tuğla model için deneysel yapısal tepkiler sunulmaktadır. Sarsma masası deneyleri sırasında 7 adet üç eksenli ve 3 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Ek olarak, deney numunesinin yüksekliği ile birlikte değişen yer değiştirme tepkisini yakalamak için 4 LPDT kullanılmıştır. Elde edilen deneysel çıktılar ışığında, her bir sismik uyarım için göreceli yer değiştirmeler, göreceli kat öteleme oranları (IDR) ve mutlak ivmeler karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Yapısal tepkiler ve hasar arasındaki ilişki de tartışılmıştır.

Şekil 2.54, her bir sismik uyarım için maksimum görelî yer değıştirmelerdeki değışiklikleri göstermektedir. Bu amaçla deney numunesinin döşeme ve orta yüksekliğinde elde edilen görelî yer değıştirmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 2.54’te görüldüğü üzere ERZ 100 depreminden sonra yukarı yönlü görelî yer değıştirmelerin artmaktadır. Şekil 2.55, sarsma masası deneylerinden sonra maksimum görelî yer değıştirmeler kullanılarak hesaplanan görelî kat öteleme oranlarının varyasyonunu göstermektedir. Ön deney çalışmasında bahsedilen Calvi [228]’un çalışması, yığma binalar için hasar durumlarına bağılı olarak öteleme limitleri önermiştir. Yığma yapıların eşik öteleme oranları DS-1 için %0,1’den az, DS-2 için %0,1, DS-3 için %0,1-%0,3, DS-4 için %0,3-%0,5 ve DS-5 için %0,5’ten büyük olarak tanımlandı. DS-4 tipinde hasara neden olan sismik uyarımlar için maksimum IDR %0.4 olarak elde edilmiştir. Bu değerler önerilen eşik değerlerle uyumludur.

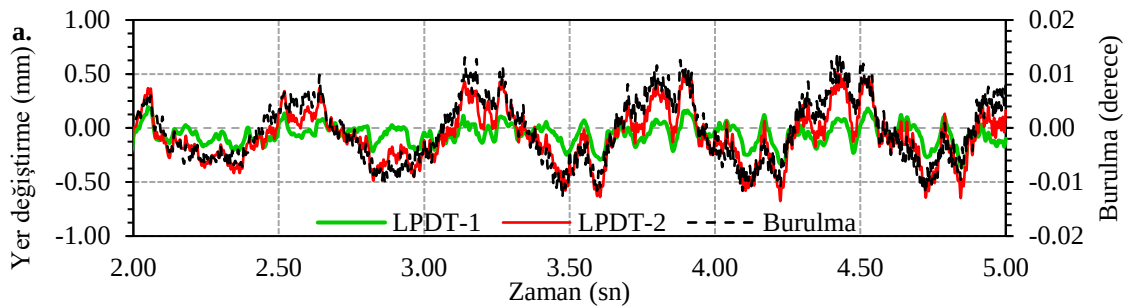
Deney numunesinde kuzeye ve güneye bakan duvarların açıklık alanları birbirinden farklı tasarlanmıştır. Kuzeye bakan duvar için  $0.45\text{m}^2$  ve güneye bakan duvar için  $0.25\text{m}^2$ ’lik açıklık alanları vardır. Bu durum, duvarların düzlem içi rijitliğini etkiledi. Bu nedenle, kuzeye ve güneye bakan duvarlar olarak döşemenin köşelerinde yakalanan görelî yer değıştirmeler arasında farklılıklar vardı ve deney numunesi belirgin burulma tepkilerine sahipti. Bu farklar GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası ve GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası için sırasıyla %40.8 ve %27.4 çıkmıştır. Burulma tepkilerinin farkı, ön deney numunesine göre daha düşük çıkmıştır çünkü kuzey ve güney duvarında da kesme adımlı diyagonal çatlak oluşmuştur. Ayrıntılı bir açıklama için, DS-4 tipinin hasar durumlarının gözlemlendiği sismik uyarım sırasında döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değıştirmelerin zaman tanım alanında Şekil 2.56’da verilmiştir.



Şekil 2.54. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum göreceli yer değiştirmelerin değişimi

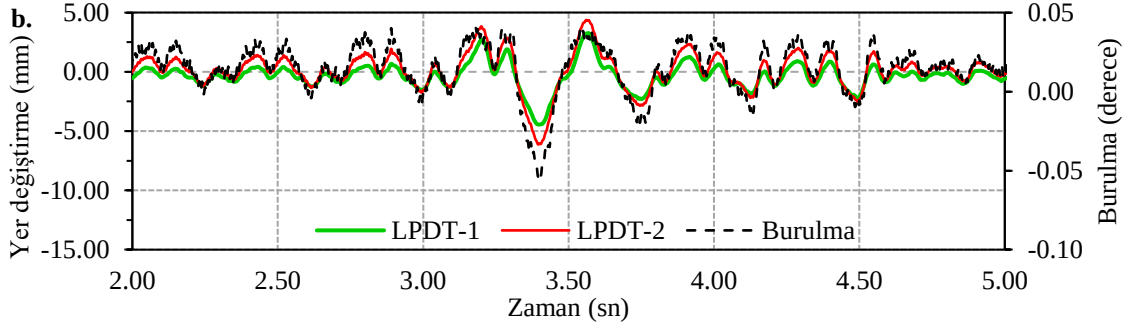


Şekil 2.55. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi



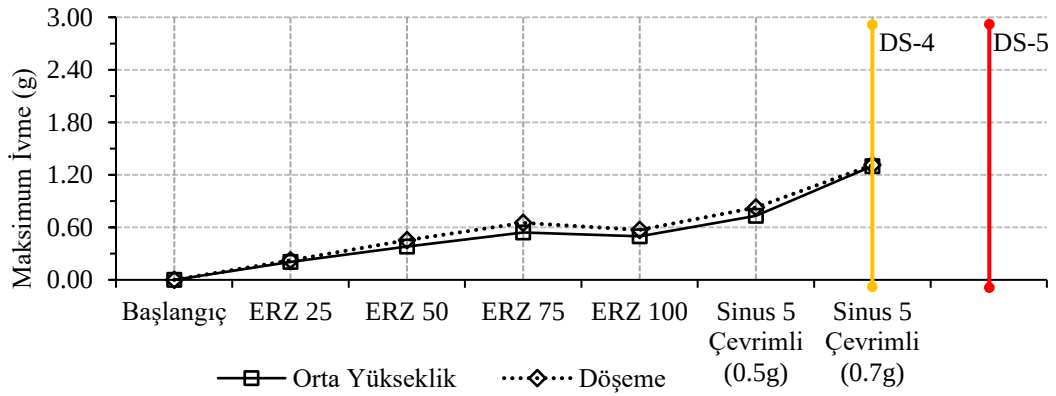
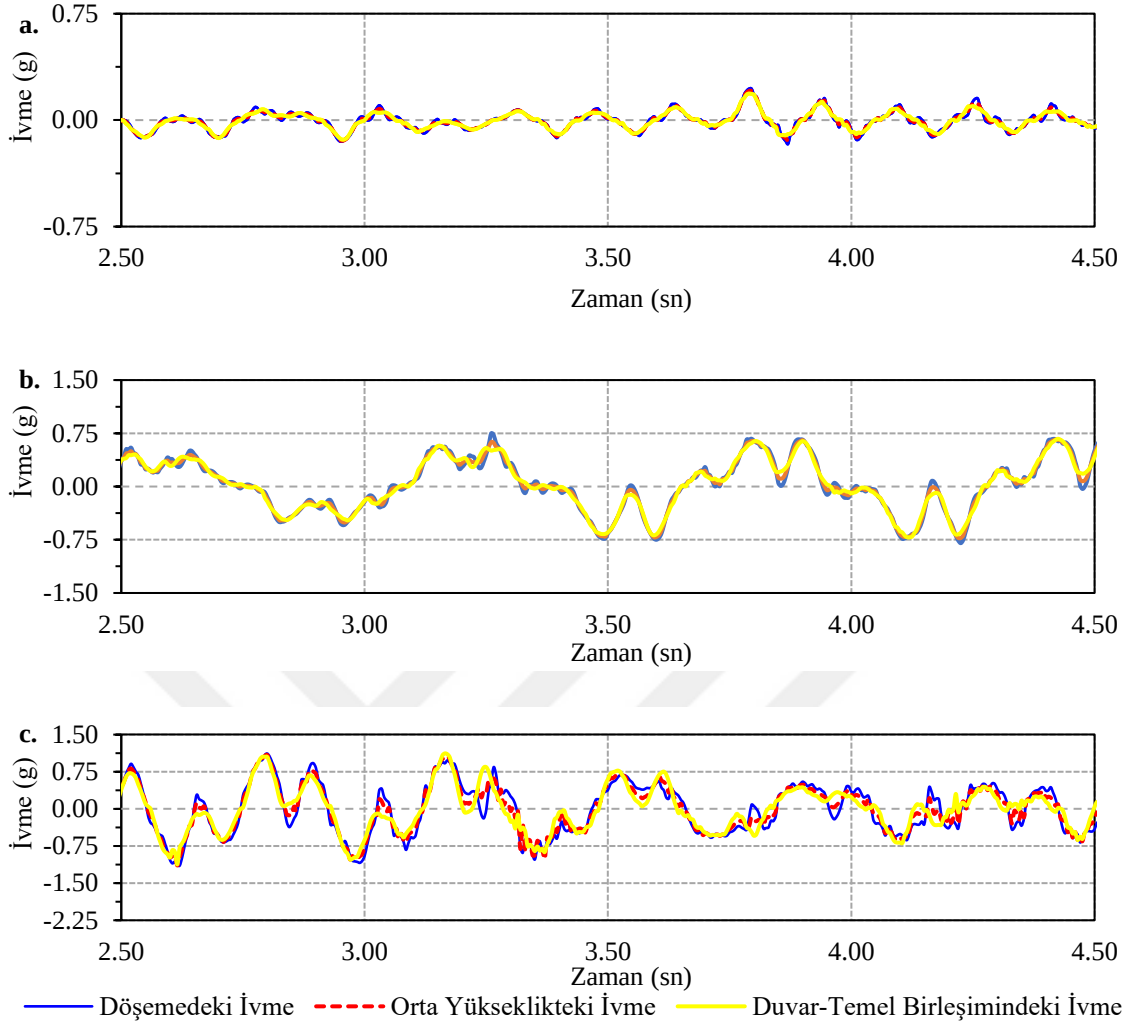
Şekil 2.56. Döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g))

Şekil 2.56'nın devamı

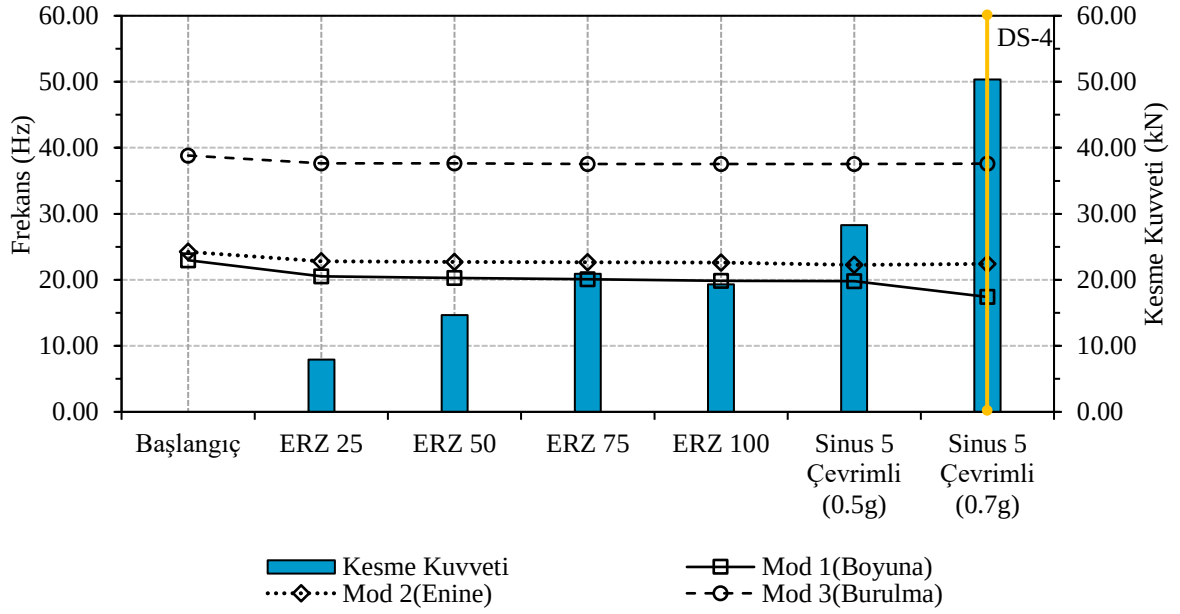


Sarsma masası deneyleri sırasında, ivmeölçerlerden elde edilen sinyal verileri arasındaki atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başladığının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu amaçla, GM-1 ve DS-4 tipinin gerçekleştiği GM-6 sismik uyarımı için gerçekleşen hasar durumlarının gözlemlendiği sarsma masası deneyleri için duvar-temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotlarındaki ivme tepkileri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir (Şekil 2.57). Hasar gerçekleşmediği GM-1 ERZ 25 ( $PGA=0.13g$ ) ivmesinin zaman kayıtlarının uyum içinde olduğu ve sinyal verileri arasında faz kayması ve sıçrama olmadığı görüldü. Şekil 2.57c, hasarın oluşmasıyla birlikte orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ivme tepkileri arasında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koydu. Bununla birlikte, çatlak genişlikleri santimetre mertebesine ulaşılmıştır.

Test numunesinin orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ölçülen maksimum ivme değerleri Şekil 2.58'de karşılaştırılmıştır. Ön deneyde belirtildiği gibi, hasarsız durumda elde edilen bu değerler arasında ihmal edilebilir farklılıklar olduğu, ancak maksimum ivmelerin artan hasarla uyumsuz hale geldiği görüldü. Fakat burada ilave kütlelerden dolayı rijitliği artan modelin maksimum ivmelerinde artan hasara uyumsuz hale geldiği görülmemektedir.



Şekil 2.59, uygulanan sarsma masası sekansı sırasında taban kesme kuvvetlerindeki değişiklikleri özetler. Taban kesme kuvvetleri döşeme seviyesine yerleştirilen her bir ivmeölçerin etki alanına ait kütle ile o ivmeölçerden elde edilen ivmelerin çarpımından elde edilen değerler toplanarak elde edilmiştir. Toplam kütle 3.950 ton olup, duvarların yarısı, betonarme döşeme ağırlıklarının ve ilave kütle toplamı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları, doğal ivme kayıtları ile yapılan testlerde taban kesme kuvvetlerinin benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekanslar azalmıştır. 50.37 kN taban kesme kuvvetine neden olan GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.7 g) ile yapılan deneyde, kesme adımlı diyagonal çatlaklar oluşarak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve numuneler en yüksek frekanslı büzülmeye maruz kalmıştır.



Şekil 2.59. Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri

#### 2.2.2.4. Onarım-Güçlendirme Çalışmaları

Tuğla model için test programının son aşaması kapsamında bir önceki aşamada hasar gören model, çatlak enjeksiyonu ve lif takviyeli polimerler (LP) yardımıyla güçlendirildi. Güçlendirme, literatürde çalışmaları yapılan ve test edilen ölçekli modellerin güçlendirilmesinde kullanılanla aynı yaklaşım ve aynı türde malzemeler kullanılarak

yapılmıştır [42, 188, 263]. 1:2 ölçekli deney modelinin LP'ler ile güçlendirilmesi birkaç adımdan oluşmaktadır. Öncelikle hasarlı modelde bulunan çatlaklar çimento harcı ile doldurularak kapatıldı. Kurulum prosedürü, geleneksel güçlendirme teknikleriyle karşılaştırıldığında operatör için hızlı, kolay ve daha az tehlikeliydi. Hasarlı modelde bulunan çatlaklar çimento harcı ile doldurularak kapatıldıktan sonra modelin ana duvarı üzerinde LP'lerin uygulanacağı yüzeyler temizlendi. 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine göre dairesel olmayan elemanlara LP uygulanması durumunda keskin olan köşelerin en az 30 mm yuvarlatılması gerekmektedir. Bu yüzden LP'nin geçeceği kesişim yerleri taşlama makinası ile yuvarlatıldı. Temizlik sonrası yüzeylere çok ince bir kat Basf-Mbrace Primer marka iki bileşenli düşük viskoziteli LP malzemeler için geliştirilmiş epoksi esaslı astar fırça ile sürüldü ve 2 gün bekletildi. Astar kullanılmasının temel amacı LP uygulanacak yüzeyi kondisyon ve aderans açısından iyileştirmektir. Tablo 2.24 iki bileşenli düşük viskoziteli astar malzemesinin üretici tarafından verilen malzeme özellikleri verilmektedir. Daha sonra yüzeylere yaklaşık 1 mm kalınlığında iki bileşenli, yüksek viskoziteli ve yüksek dayanımlı epoksiden oluşan bir yapışkan kaplama tabakası uygulandı. Güçlendirilecek yüzeye tam yapışmayı ve herhangi bir hava kabarcığının giderilmesini sağlamak için bekletilen epoksi 200 mm genişliğinde kesilen karbon takviyeli polimer kumaşa sürülerek yapıya uygulandı. Çalışma kapsamında kullanılan epoksi esaslı yapıştırıcıya ait teknik bilgiler Tablo 2.25'te sunulmuştur. Ortam sıcaklığında kuruyan karbon takviyeli LP'ler ile yapı güçlendirilmiş, birkaç saat içinde kürünü almaya başlayan LP, bir hafta içinde kürünü tamamlamıştır. Karbon takviyeli LP malzemeye ait teknik bilgiler Tablo 2.26'te verilmiştir.

Güçlendirilme aşamaları ve güçlendirilmiş modelin görüntüleri Şekil 2.60'da verilmiştir. Güçlendirilmiş model, güçlendirilmemiş modelde olduğu gibi ölçeklendirilmiş Erzincan depremleri (0.25, 0.50, 0.75, 1.00) ve sinüs dalgalarına ( $PGA=0.5$  g ve  $PGA=0.7$  g) yer hareketi olarak tabi tutuldu. Fakat beklenildiği gibi güçlenmiş model hasar belirtisi göstermediği için hazırlanan diğer sinüs dalgaları ( $PGA=0.8$  g,  $PGA=0.9$  g, ve  $PGA=1.0$  g) da uygulanmıştır ve model göçme durumuna gelmiştir. Bu bölümün amacı, güçlendirilmemiş tuğla model sonuçlarıyla karşılaştırmalar yoluyla FRP güçlendirme performansını araştırmaktır. Modele farklı büyüklüklere sahip 9 adet yer hareketi uygulanmış ve ivme verileri kaydedilmiştir. İvmeölçerlerin ve LPDT'lerin yönleri bölüm 2.2.2 tuğla bina modeli deney düzeneği ile aynıdır.



(a) Yüzeyin temizlenmesi ve köşelerin ovalleştirilmesi



(b) Astar malzemesinin elemanlara sürülmesi

Şekil 2.60. Tuğla modelin güçlendirilmesine ait bazı görseller

Şekil 2.60'ın devamı



(c) Epoksi ve LP malzemenin uygulanması

Tablo 2.24. Mbrace Primer astara ait teknik özellikler

|                                     |                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Bileşenler                          |                                  |
| Bileşen A                           | Epoksi Reçine                    |
| Bileşen B                           | Epoksi Sertleştirici             |
| Renk                                | Şeffaf                           |
| Karışım Yoğunluğu                   | 1.08±0.024 kg/litre              |
| Katı Madde Oranı                    | % 100                            |
| Eğilme Dayanımı (TS EN 196) (7 Gün) | >20 N/mm <sup>2</sup>            |
| Yapışma Dayanımı (beton) (7 Gün)    | > $\sigma_{tc}$ (betondan kopma) |
| Uygulama Kalınlığı                  | 0.1-0.2 mm                       |
| Kullanma Süresi                     |                                  |
| -1 °C                               | 8 saat                           |
| +7 °C                               | 2 saat                           |
| +21 °C                              | 45 dak.                          |
| +32 °C                              | 25 dak.                          |

Tablo 2.25. Epoksi malzemeye ait teknik özellikler

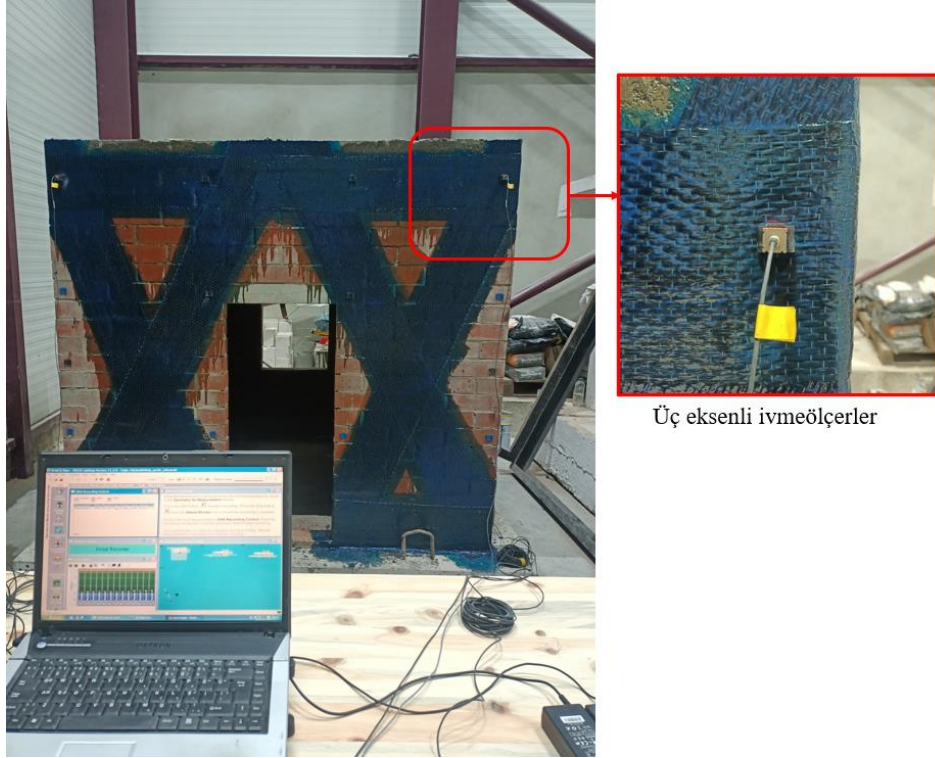
|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Bileşenler                          |                       |
| Bileşen A                           | Epoksi Reçine         |
| Bileşen B                           | Epoksi Sertleştirici  |
| Renk                                | Mavi                  |
| Karışım Yoğunluğu                   | 1.02 kg/litre         |
| Viskozite                           | 1500-2500 mPa.s       |
| Basınç Dayanımı (TS EN 196) (7 Gün) | >60 N/mm <sup>2</sup> |
| Eğilme Dayanımı (TS EN 196) (7 Gün) | >50 N/mm <sup>2</sup> |
| Yapışma Dayanımı (Betona) (7 Gün)   | >3 N/mm <sup>2</sup>  |
| Kullanma Süresi (+20 °C)            | 30 dak.               |
| Tam Kurlenme süresi (+20 °C)        | 7 gün                 |

Tablo 2.26. Karbon takviyeli LP malzemenin teknik özellikleri

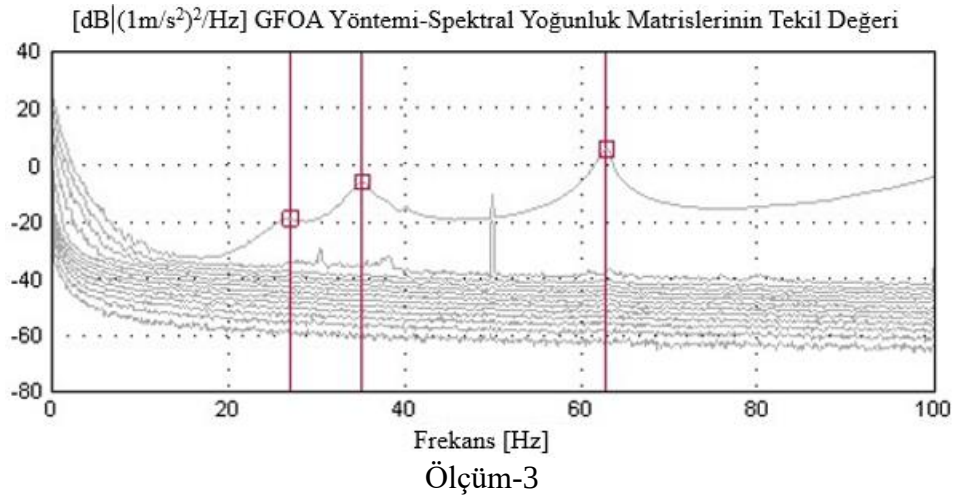
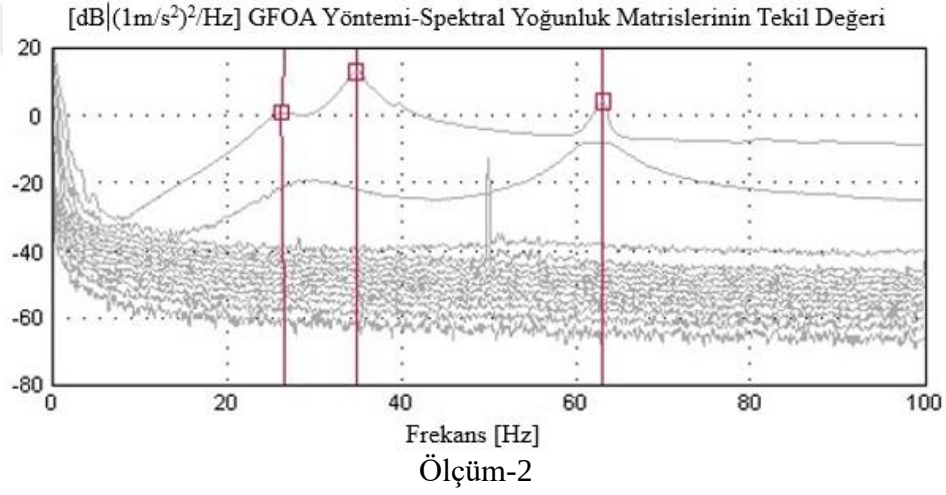
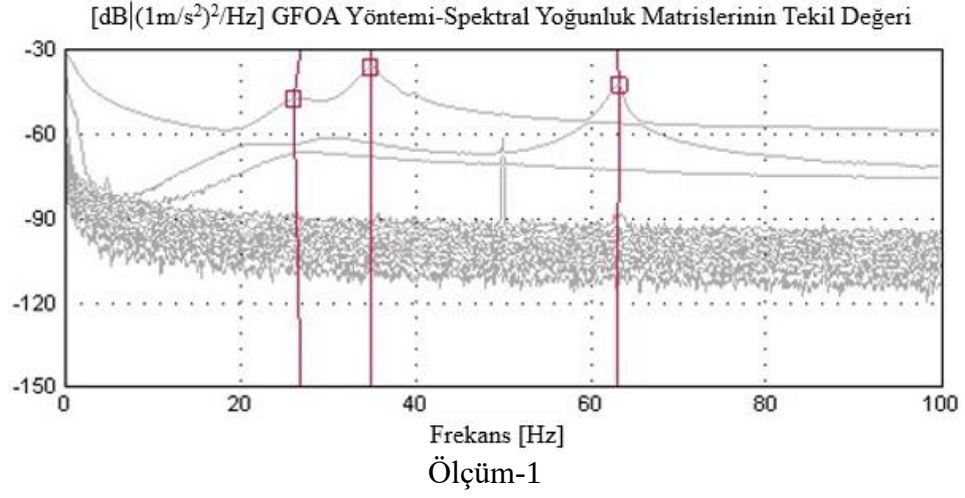
|                                         |                                          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Malzeme Özellikleri                     | Master Brace FIB<br>300/50 CFS<br>Karbon |
| Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )  | 230000                                   |
| Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )     | 4900                                     |
| Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)            | 0.166                                    |
| Toplam Lif Ağırlığı (g/m <sup>2</sup> ) | 300                                      |
| Kopmada Uzama (%)                       | 2.10                                     |

#### 2.2.2.4.1. Güçlendirilmiş Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

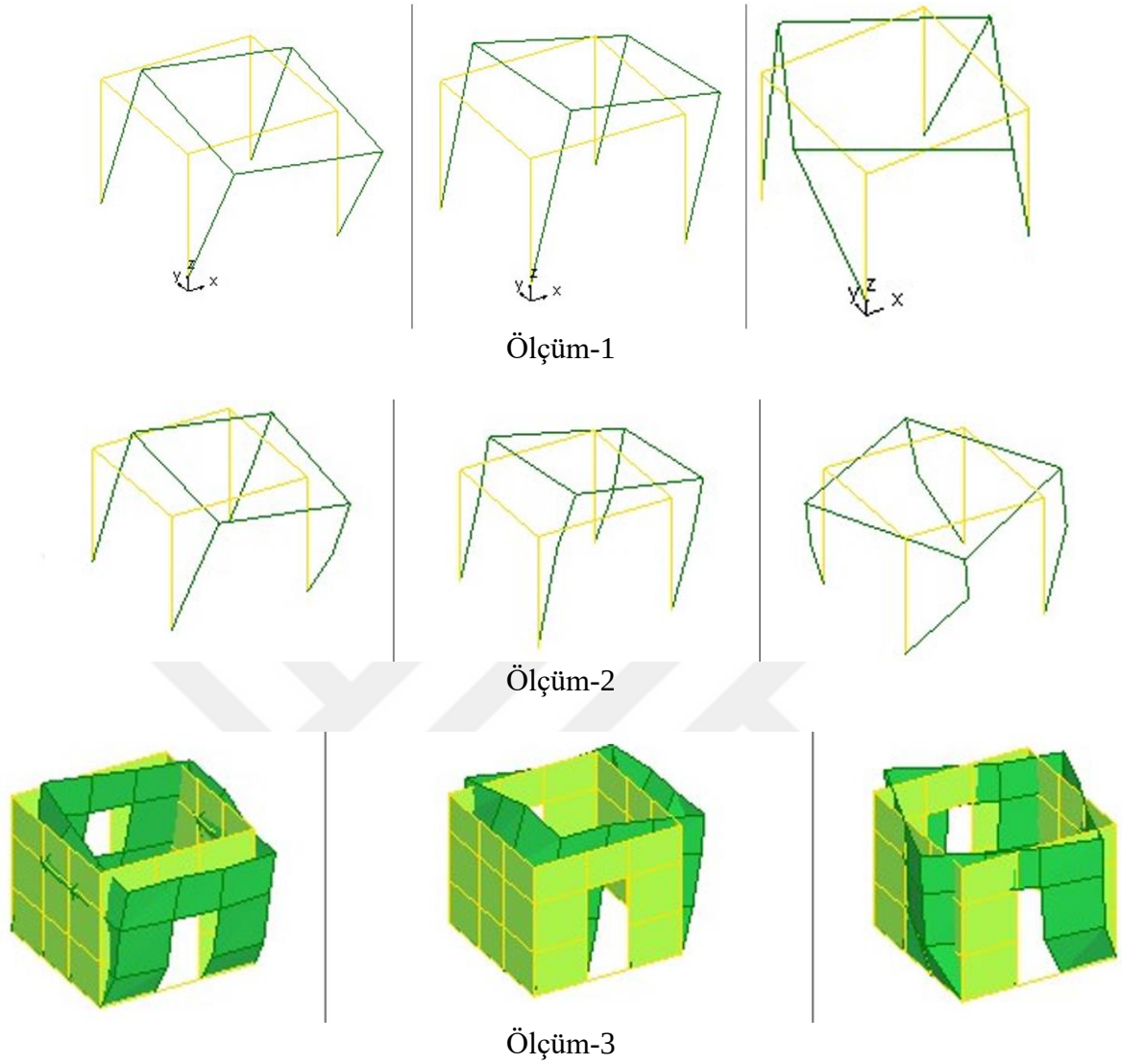
Hasarlı tuğla modelin LP ile güçlendirilmesinden sonra hasarsız dinamik karakteristiklerini elde etmek için DMA yöntemi uygulanmış ve dinamik parametreler (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar modellerinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için kullanılan DMA yönteminde 2.2.1.2. bölümünde anlatılan ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yine aynı bölümde anlatılan yöntemler ve ölçüm prosedürü uygulanmıştır. Tüm bu ölçümlere ait PULSE yazılımında oluşturulan model ve ivmeölçer yerleşim düzeni daha önceki bölümdeki Şekil 2.13'te şematik olarak verilmiştir. Ölçümlerin alınmasına ait görsel ise Şekil 2.61'de verilmiştir. Hasarsız durum için alınan dinamik karakteristikler sarsma masasına yerleştirilmeden yerde alınan ölçümlere aittir. Güçlendirilmiş tuğla model binanın DMA ölçümlerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması ile elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin grafiği 3 ölçüm içinde Şekil 2.62'de verilmiştir. Tuğla model için elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.63'te verilmiştir.



Şekil 2.61. Güçlendirilmiş model için DMA ölçümlerine ait görseller



Şekil 2.62. Güçlendirilmiş tuğla model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 2.63. Güçlendirilmiş tuğla modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Güçlendirme işleminden önce hasarlı tuğla modelin frekans değerleri enine, boyuna ve burulma modları için sırasıyla 31.27, 24.11 ve 56.15 Hz olarak elde edilmiştir. Güçlendirilmiş tuğla model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.27’de verilmektedir. Tablo 2.27 incelendiğinde güçlendirilmiş tuğla model için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla ölçüm-1 için 26.94-62.98 Hz ve %1.138-4.374 arasındadır. Ölçüm-2 için ise doğal frekans ve sönüm oranı 26.74-62.94 Hz ve %0.79-4.88 arasında elde edilmiştir. Ölçüm-3 için ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 27.19-62.9 Hz ve %0.857-3.929 arasında olduğu görülmektedir. Onarım-güçlendirme işlemlerinden sonra modelin doğal frekans değerleri %12.1 seviyelerine kadar artış göstermektedir. LP malzeme deprem esnasında çalışmaya

başlayacağından dolayı bu aşamada frekans değerlerinde yüksek değişimler gözlenmemektedir. Enine ve boyuna modlar hasardan sonra yer değiştirmiştir. Şekil 2.63'te ilk mod boyuna 2. mod enine mod olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.27. Güçlendirilmiş tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler

| Mod No.    | Ölçüm-1         |                    | Ölçüm-2         |                    | Ölçüm-3         |                    |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|            | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) |
| 1(Boyuna)  | 26.94           | 4.256              | 26.74           | 4.88               | 27.19           | 3.577              |
| 2(Enine)   | 34.99           | 4.374              | 34.9            | 4.355              | 35.16           | 3.929              |
| 3(Burulma) | 62.98           | 1.138              | 62.94           | 0.79               | 62.9            | 0.857              |

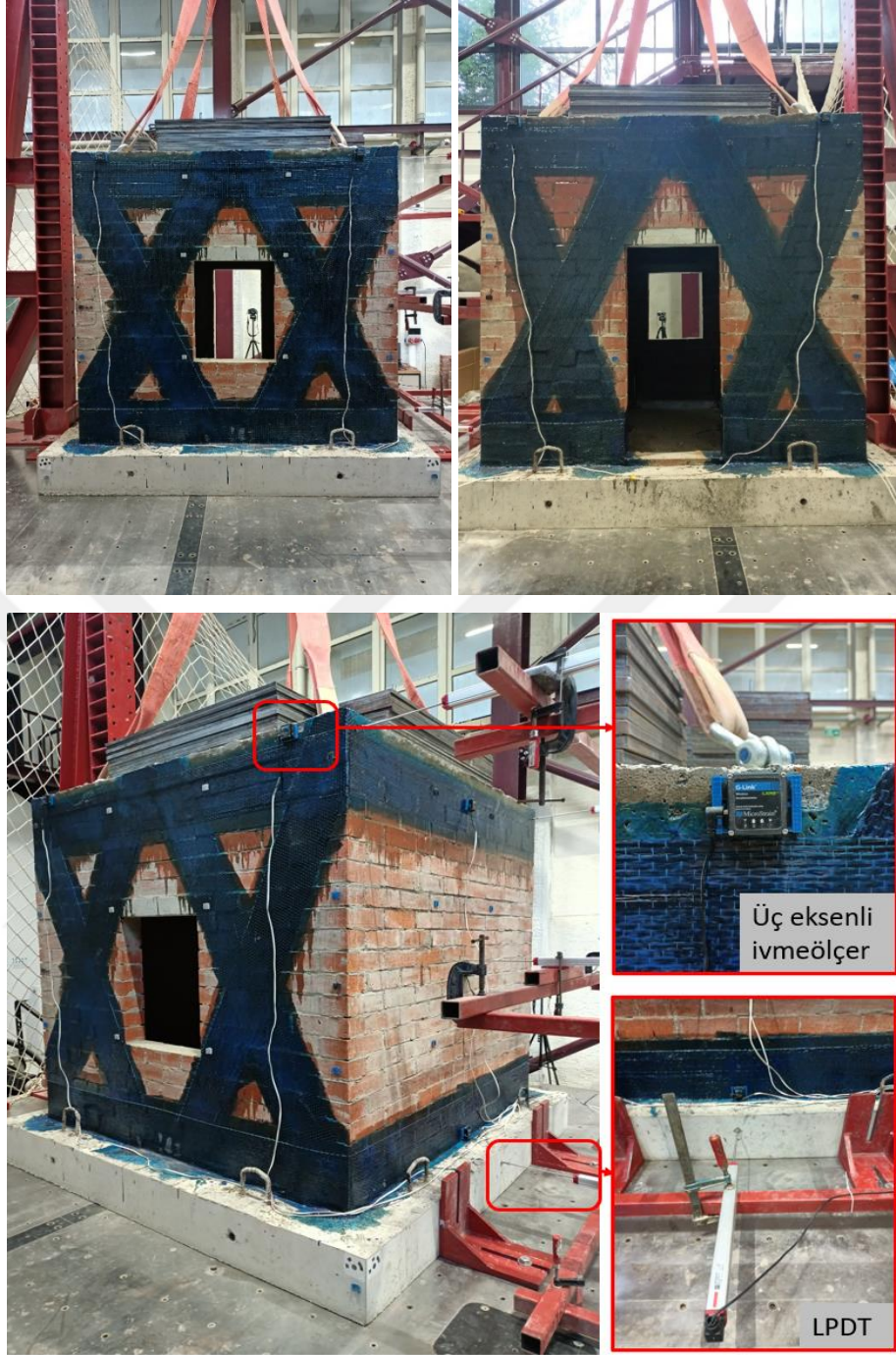
#### 2.2.2.4.2. Sarsma Masası Deneyleri

Ölçekli güçlendirilmiş tuğla modelin deprem davranışının incelenebilmesi amacıyla sarsma masası deneyleri uygulanmıştır ve çıktılar işlenerek yapısal tepkiler verilmektedir. Bu çalışmada, güçlendirilmemiş tuğla modelin deney süreçlerinde olduğu gibi ölçeklendirilmesinde yapay kütle benzeştirmesi modeli kullanılması nedeniyle deneyler sırasında her bir kata ilave kütleler eklenmiştir. Güçlendirilmemiş tuğla modelin deneyleri ile aynı yer hareketleri kullanılmıştır. Fakat güçlendirilmiş numune hasar almadığı için dayanımını belirlemek için daha büyük yer hareketlerine tabi tutuldu.

##### 2.2.2.4.2.1. Sarsma Masası Deney Kurulumu

Laboratuvar zemininde inşa edilen deney modeli daha sonra düz bir polyester kaldırma askısı ve tek kirişli bir gezer vinç kullanılarak sarsma masasına taşınmıştır. Daha önceki numuneler ile aynı model olduğu için numunenin taşınımı ve montajı benzerdir.

Sarsma masası deneyleri sırasında modelin genel ve lokal davranışını ölçmek için güçlendirilmemiş tuğla için hazırlanan aynı deney düzeneği ve cihazlar kullanıldı. Şekil 2.45, ivmeölçerlerin ve LPDT'lerin düzenini göstermektedir. Güçlendirilmiş tuğla numunesine ait deney düzeneğine ait resimler Şekil 2.64'te verilmiştir.



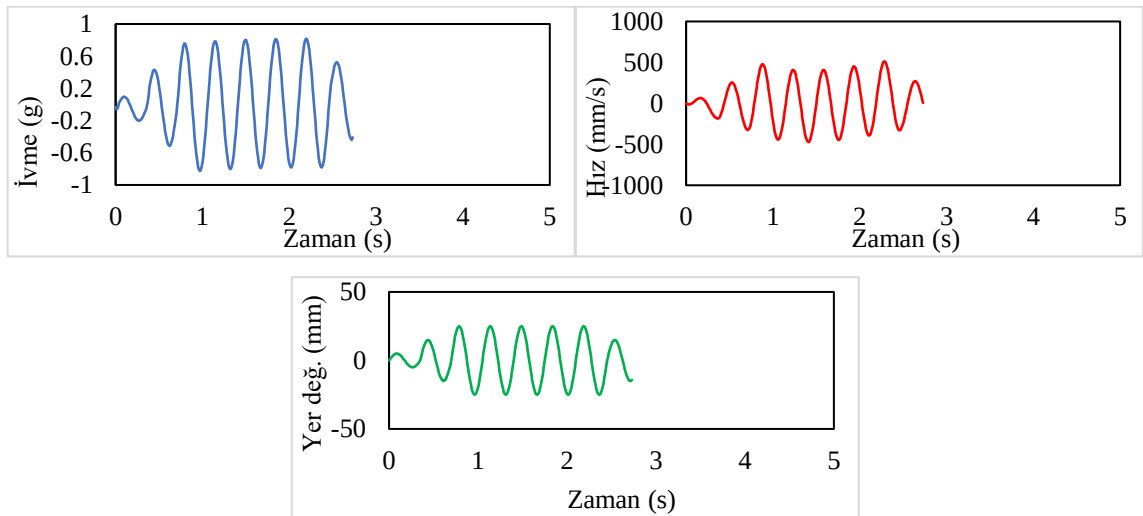
Şekil 2.64. Güçlendirilmiş tuğla modelde kullanılan deney düzeneğine ait görseller

Farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun arttırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Bu süreçte yoğunluk ölçüsü olarak PGA değerleri dikkate alınmıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi test için Erzincan depremi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Sarsma masası testi için doğal yer hareketleri Erzincan depreminin %25 ( $PGA=0.13$  g), %50 ( $PGA=0.25$

g), %75 (PGA=0.37) ve %100 (PGA=0.50 g)'ü seçilmiştir. Ayrıca genliği 50 mm, frekansı 1.6 Hz 0.5 g sinüs dalgası 5 döngülü dikkate alınarak uygulanmıştır. Daha sonra genlikleri 25 mm olan frekansı 2.7 Hz 0.7 g, frekansı 2.85 Hz 0.8 g, frekansı 3.01 Hz 0.9 g ve frekansı 3.2 Hz 1.0 g sinüs dalgası 5 döngülü toplam 9 farklı yükleme koşulu dikkate alınarak uygulanmıştır. Tablo 2.28, geçmiş depremlerden seçilen yer hareketlerinin test sırasını ve özelliklerini özetlemektedir. Şekil 2.65, güçlendirilmemiş tuğla modelde kullanılan yer hareketlerinden farklı olan GM-7, GM-8 ve GM-9 yer hareketlerinin ivme, hız, yer değiştirme grafiklerini vermektedir. Diğer yer hareketlerinin ivme, zaman ve yer değiştirme grafikleri tuğla model bölümünde verildiği için burada verilmemiştir.

Tablo 2.28. Uygulanan yer hareketleri

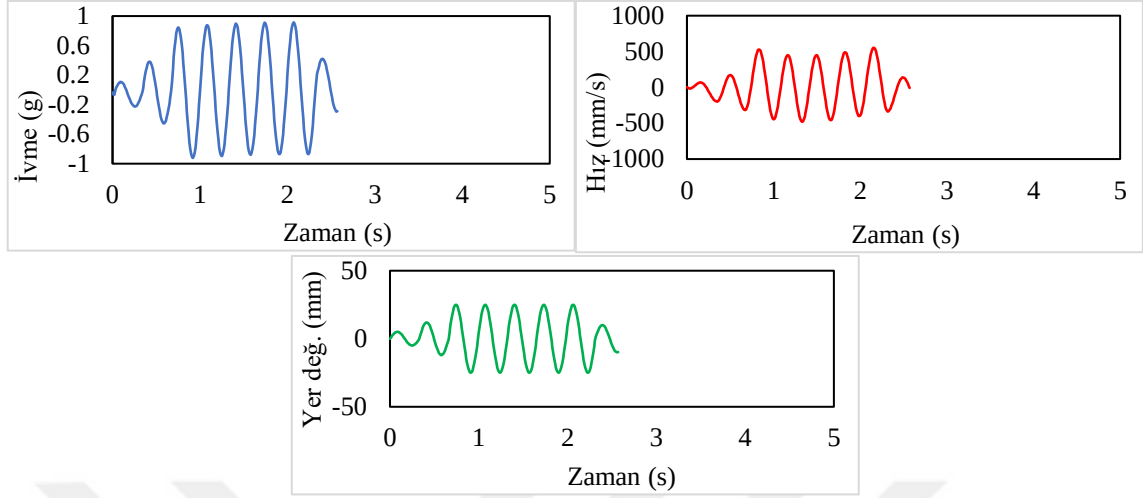
| No   | Deprem           | İstasyon | PGA<br>g | PGD<br>cm | Frekans<br>Hz |
|------|------------------|----------|----------|-----------|---------------|
| GM-1 | Erz 25 (0.25)    | Erzincan | 0.13     | 3.50      | -             |
| GM-2 | Erz 50 (0.50)    | Erzincan | 0.25     | 7.00      | -             |
| GM-3 | Erz 75 (0.75)    | Erzincan | 0.37     | 10.50     | -             |
| GM-4 | Erz 100 (1.00)   | Erzincan | 0.50     | 14.00     | -             |
| GM-5 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.50     | 5.00      | 1.60          |
| GM-6 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.70     | 2.50      | 2.70          |
| GM-7 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.80     | 2.50      | 2.85          |
| GM-8 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 0.90     | 2.50      | 3.01          |
| GM-9 | Sinüs (5 çevrim) | -        | 1.0      | 2.50      | 3.20          |



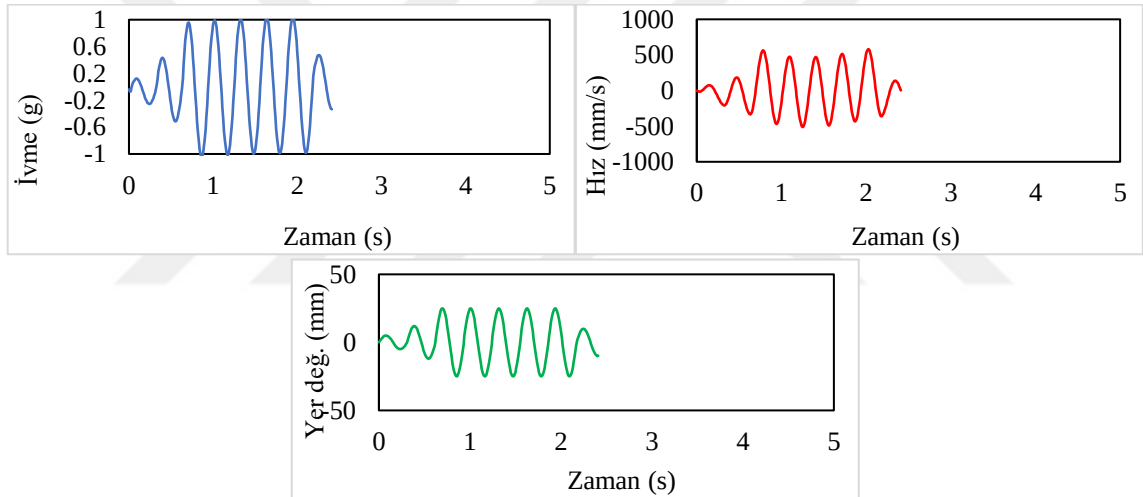
(a) Sinüs (0.8 g)

Şekil 2.65. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri

Şekil 2.65'in devamı



(b) Sinüs (0.9 g)



(c) Sinüs (1.0 g)

#### 2.2.2.4.2.2. Deney Sonuçları

##### 2.2.2.4.2.2.1. Deney Sonrası Hasar Tespitleri

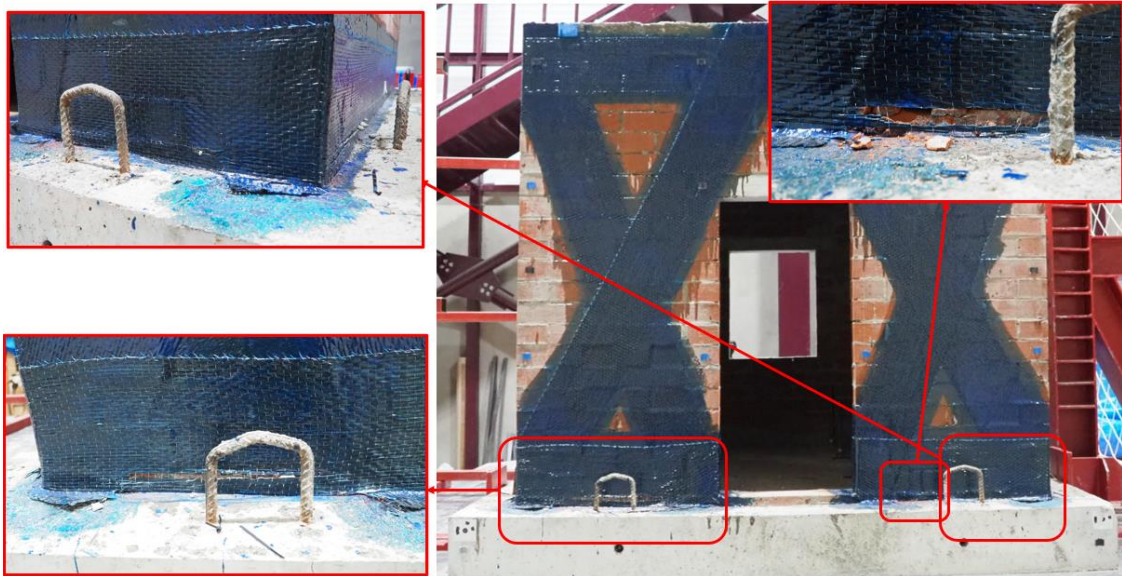
Her yer hareketinin sarsma masasına uygulanmasından sonra test numunesi görsel ve deneysel olarak incelenmiştir. Hasarın deneysel olarak gözlemlenebilmesi için test numunelerinin hasarsız (başlangıç) ve hasarlı durumları için modal parametreler, test öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim ölçümleri ile belirlenmiştir.

Ön deney numunesindeki hasarın niteliksel bir tanımı için, Avrupa Makrosismik Ölçeği'nde (EMS-98) tanımlanan hasar sınıflandırması dikkate alınmıştır. Burada modelin

üzerinde ilave kütleler olması nedeniyle gevrek bir davranış sergiledi ve DS-5 hasar durumu gözlemlendi. Yani model aniden hasar alarak ağır hasar durumuna geldi. Hasar şekli ise temele gömülen ilk tuğla sırasının hemen üzerinden kesme oluşmasıdır. LP malzemesi modeli yer hareketlerine karşı güçlendirmiş ve daha büyük sismik hareketlere dayanabilme kapasitesi kazandırmıştır. LP uygulanırken duvar ile temel bağlantısı için herhangi bir ankraj uygulaması yapılmamıştır. Bu yüzden temel-duvar birleşim yerinde gerilmenin artmasıyla LP malzemesi kesilerek ve epoksi açılmasından dolayı hasar almıştır.

#### 2.2.2.4.2.2. Görsel Tespitler

Sarsma masası deneyi sırasında Erzincan depremlerine (ERZ 25, ERZ 50, ERZ 75 ve ERZ 100) karşılık gelen ilk dört yer hareketinde görünür çatlaklar gözlenmedi. Daha sonra GM-5, GM-6, GM-7 ve GM-8 yer hareketleri uygulandı ve hasar gözlenmedi. Sekiz adet sismik uyarım karşısında yorulan model, GM-9 beş çevrimli sinüs dalgası ( $PGA = 1.0 \text{ g}$ ) uyarımı sırasında DS-1, DS-2 ve DS-3 hasar durumlarını göstermeden aniden hasar alarak DS-5 tipi ağır yapısal hasar durumuna geçti. Bu aşamada, hasarın temel duvar birleşim bölgesindeki tabandaki ilk iki tuğla sırasındaki kayma hareketinden kaynaklandı. Şekil 2.66, dış yüzden bakıldığında DS-5 için test numunesinin hasar modelini göstermektedir.



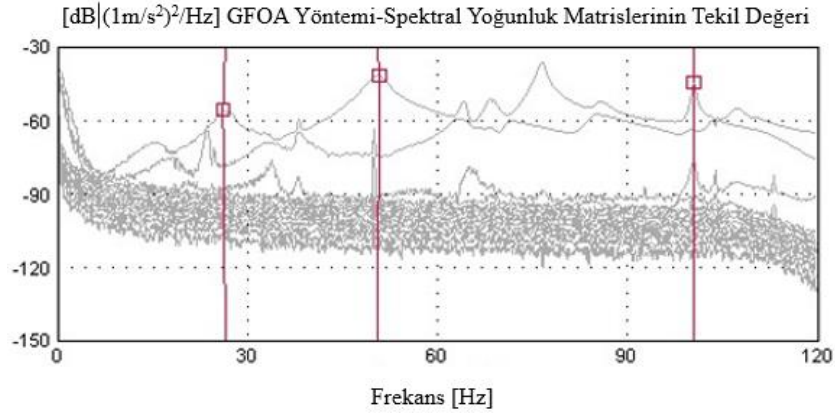
Şekil 2.66. Güçlendirilmiş tuğla modelin hasar modeli

#### 2.2.2.4.2.2.3. Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

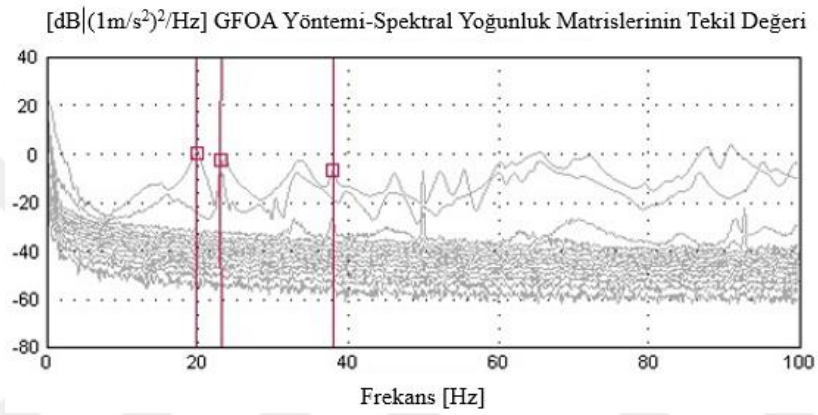
Bu çalışmada, görsel gözlemlere ek olarak, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında oluşan hasar ile yığma yapının modal parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her sarsma masası deneyinden sonra ortam titreşim testleri yapılmış ve modal parametreler elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, hasar öncesi ölçümde dikkate alınan aynı ivmeölçer konumları ve ölçüm özellikleri kullanılarak tekrarlandı. Böylece elde edilen hasarsız ve hasarlı modal parametreler karşılaştırılarak hasarın modal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha önce verilen hasarsız modelin dinamik karakteristikleri yerde alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Fakat bu bölümde, model sarsma masasına yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır.

GFOA sonucunda ilk üç doğal frekans ve mod şekli için veri setinin Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 2.67(a), hasarsız durumun (ilave kütesiz) grafiğini göstermektedir. Ayrıca DS-5 tipi için hasar durumlarının grafikleri şekil 2.67(c)'de verilmiştir. Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafikleri mod şekillerine göre seçildikleri için grafikler otomatik olarak seçilmektedir. Hasarsız durum (ilave kütesiz) için ilk üç doğal frekans (boyuna, enine ve burulma) sırasıyla 26.53Hz, 50.5Hz ve 100.5Hz olarak elde edilmiştir. Hasarsız durumun ilave kütleli durumu için ilk üç doğal frekans sırasıyla 19.95 Hz, 23.16 Hz ve 38 Hz olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 2.67'den görülebileceği gibi, DS-5 için hasarlı koşulların (ilave kütesiz) üç doğal frekansı boyuna mod için 17.48Hz, enine mod için 27.41Hz ve burulma modları için 37.73Hz elde edilmiştir. DS-5 tipi hasarlı durumun ilave kütleli koşulu için doğal frekansları sırasıyla 13.95 Hz, 21.83 Hz ve 37.55 Hz olarak elde edilmiştir. Hasarlı güçlendirilmiş tuğla model DMA ölçümünden sonra sarsma masasından yere indirildi. Daha sonra yerde bir kez daha DMA ile dinamik karakteristikleri elde edildi.

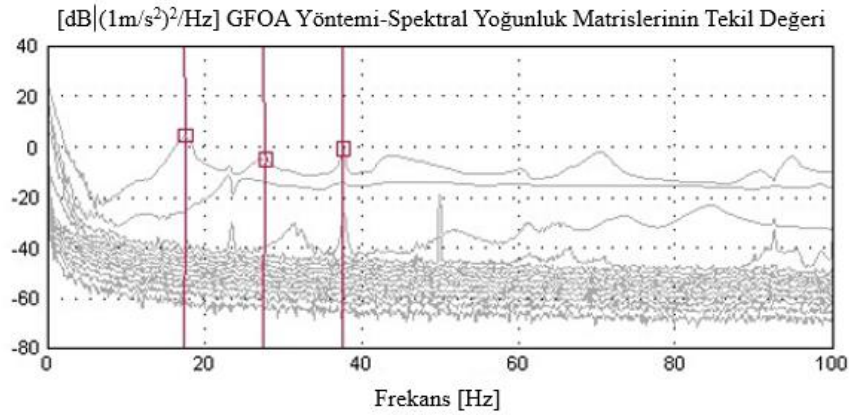
Şekil 2.68, deney ölçümlerinden elde edilen ilk üç mod şeklini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Her modun genliğinin farklı salınım genliklerine sahip olduğu da belirtilmelidir.



(a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz)



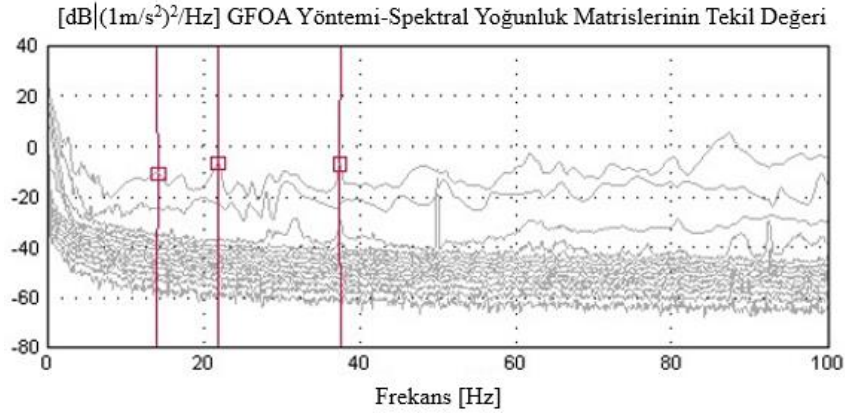
(b) Hasarsız durum için (İlave kütleli)



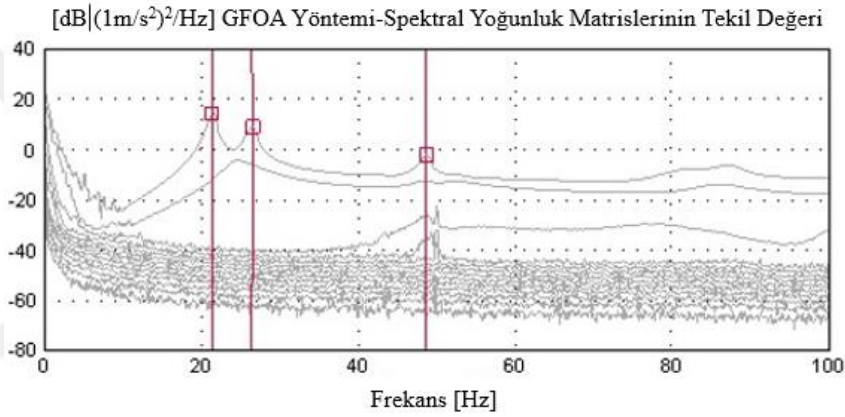
(c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme- İlave kütsüz)

Şekil 2.67. Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum

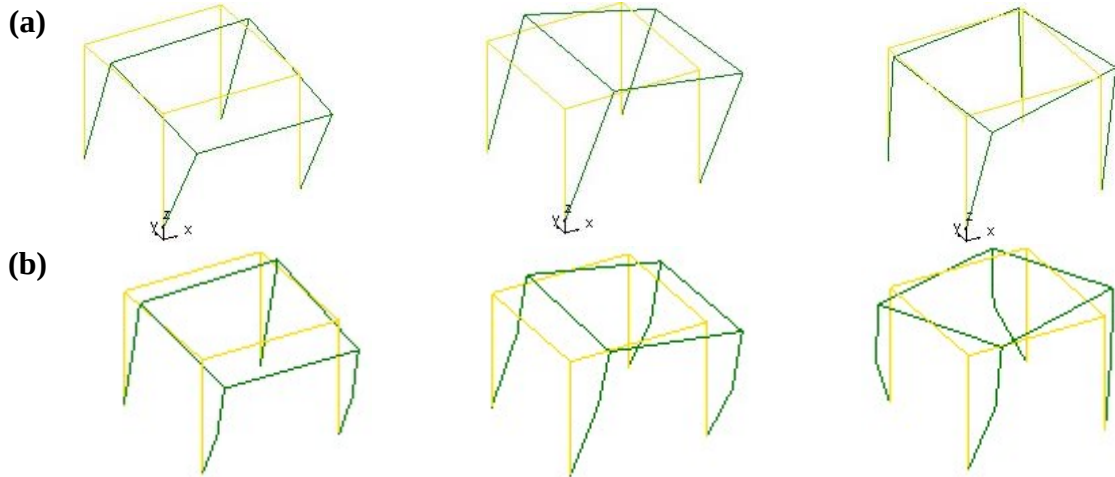
Şekil 2.67'nin devamı



(d) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme- İlave kütleli)

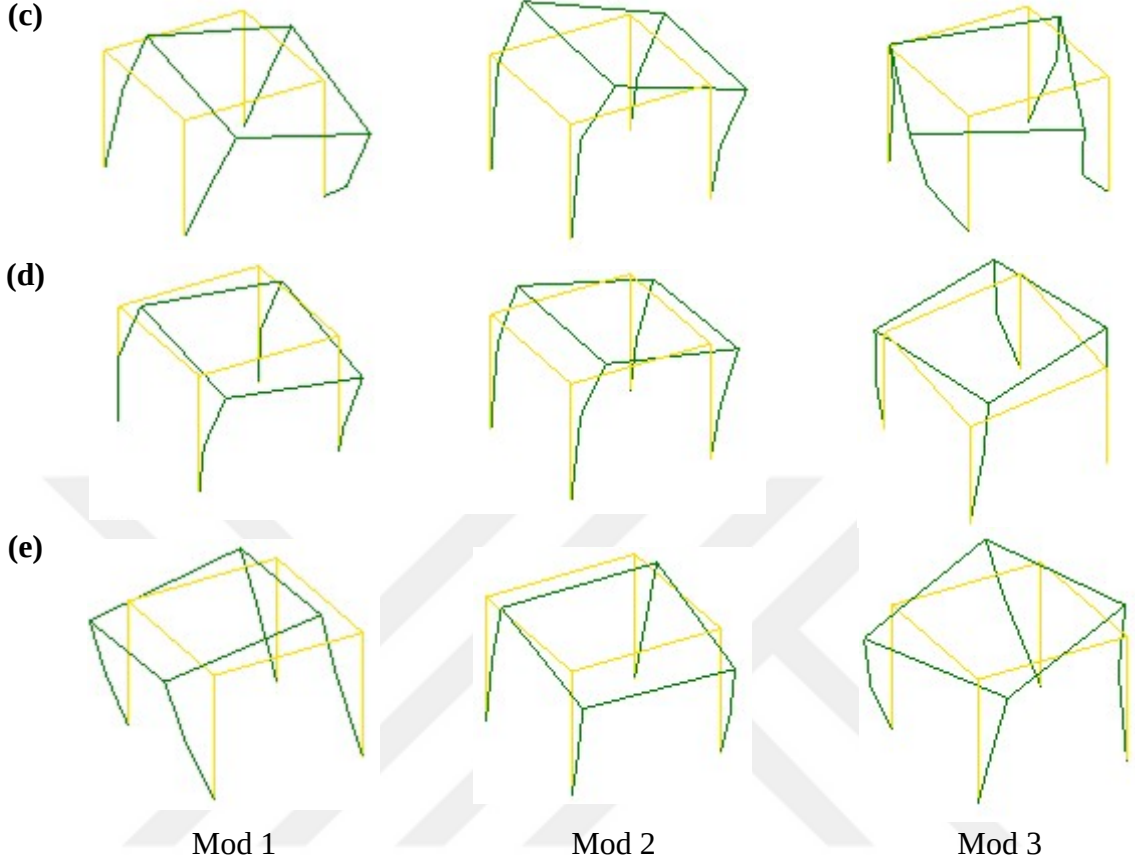


(e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum



Şekil 2.68. Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: a) Hasarsız durum için (İlave kütsüz), (b) Hasarsız durum için (İlave kütleli), (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütsüz), (d) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli), (e) Sarsma masasından indirildikten sonraki durum

Şekil 2.68'in devamı



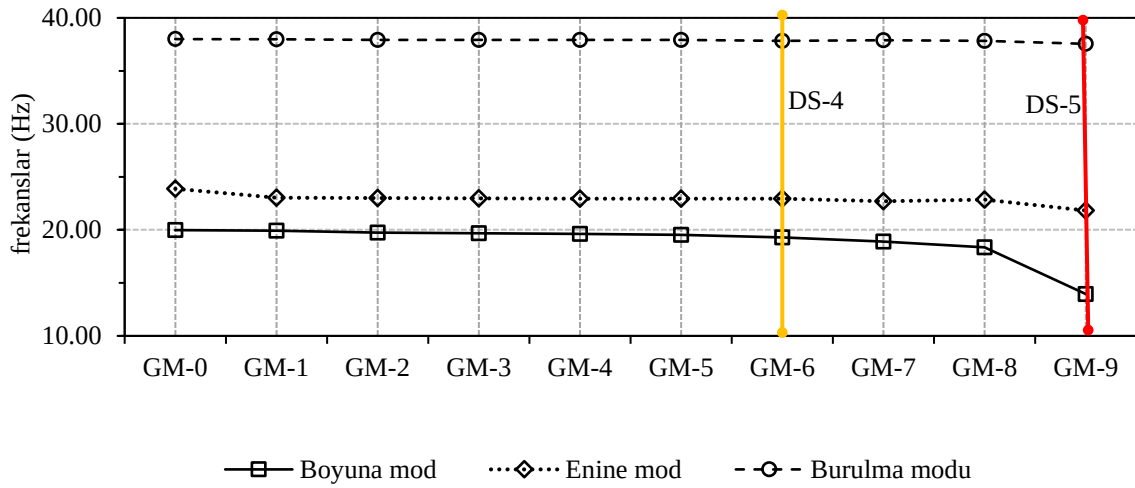
Artımlı dinamik testler sonucunda, duvarların alt kısımlarında çok sayıda yataya yakın çatlaklar ve LP hasarları görsel olarak gözlemlendi. Yapısal rijitliği azaltan bu hasarların tüm modlardaki doğal frekanslarda düşüşlere neden olduğu görülmektedir. Şekil 2.68 incelendiğinde hasarsız durum ve hasarlı durum arasındaki mod şekillerinde de gözle görülür değişimler olmuştur. GM-1 (PGA=0.13g), GM-2 (PGA=0.25g), GM-3 (PGA= 0.37 g), GM-4 (PGA= 0.50 g), GM-5 (PGA= 0.5 g), GM-6(PGA= 0.7 g), GM-7 (PGA= 0.8 g) ve GM-8 (PGA= 0.9 g) sismik uyarılarda deney numunesinde görünür bir hasara neden olmadı ve bu nedenle doğal frekanslarda önemli bir değişiklik gözlenmedi. GM-9 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=1.0 g) ile yapılan testte LP yırtılması ve epoksi açılması gerçekleşti. Numuneler, DS-5 hasar durumuna ulaşıldığında en yüksek frekans düşüm oranına maruz kaldı. Düşüşler hasarsız duruma (ilave kütesiz durumlar) göre boyuna mod için %34.11, enine mod için %45.7 ve burulma modu için %62.46 olarak hesaplandı. Düşüşler hasarsız duruma (ilave kütleli durumlar) göre boyuna mod için %30.1, enine mod için %5.7 ve burulma modu için %1.2 olarak hesaplandı. Tablo 2.29'da LP malzeme ile güçlendirilmiş

tuğla modelin GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki ve hasarsız durum için dinamik karakteristikleri verilmiştir.

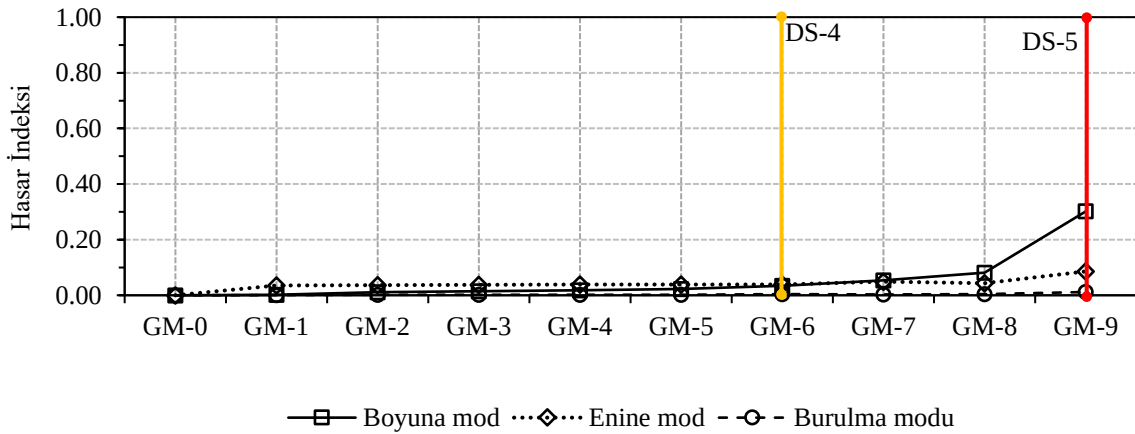
Tablo 2.29. Güçlendirilmiş tuğla model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler

| Hasar Durumu                              | Enine Mod | Boyuna Mod | Burulma Modu |
|-------------------------------------------|-----------|------------|--------------|
| Frekans Değerleri (Hz)                    |           |            |              |
| Hasarsız (İlave kütsesiz)                 | 50.5      | 26.53      | 100.5        |
| Hasarsız (İlave kütleli)                  | 23.16     | 19.95      | 38           |
| DS-5 (İlave kütsesiz)                     | 27.41     | 17.48      | 37.73        |
| DS-5 (İlave kütleli)                      | 21.83     | 13.95      | 37.55        |
| Sarsma masasından indirilen hasarlı model | 21.51     | 26.47      | 48.76        |
| Sönüm Oranları (%)                        |           |            |              |
| Hasarsız (İlave kütsesiz)                 | 2.885     | 4.588      | 0.285        |
| Hasarsız (İlave kütleli)                  | 0.5198    | 3.074      | 0.4495       |
| DS-5 (İlave kütsesiz)                     | 4.953     | 4.569      | 0.6399       |
| DS-5 (İlave kütleli)                      | 1.783     | 6.628      | 0.5107       |
| Sarsma masasından indirilen hasarlı model | 1.896     | 2.592      | 1.026        |

Şekil 2.69’da güçlendirilmiş model numune için hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler verilmiştir. İlave kat kütlelerinden dolayı sarsma masası deneylerinden sonra ağır hasar durumuna kadar doğal frekanslarda ön deney modelde gerçekleştiği gibi kademeli düşüşler gözlenmemiştir. Fakat boyuna mod için hasarsız duruma göre %30.1 seviyesinde frekans azalması belirlenmiştir. Güçlendirme öncesindeki modelin DS-4 hasar seviyesi olan GM-6 sismik uyarım seviyesine kadar güçlendirilmiş modelde DI değerleri önemsiz artışlar göstermektedir. GM-9 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=1.0 g) ile yapılan deney sonrasında ulaşılan DS-5’te DI değerleri boyuna mod için 0.30, enine mod için 0.09 ve burulma modu için 0.01 olarak belirlendi. Şekil 2.70, hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili hasar indeksi (DI) değerlerini vermektedir.



Şekil 2.69. Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler



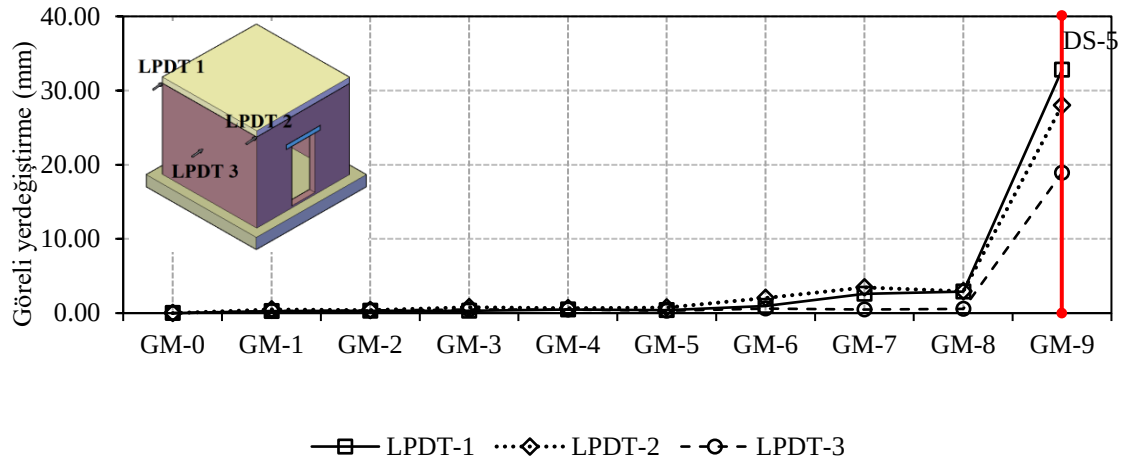
Şekil 2.70. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI

#### 2.2.2.4.2.2.4. Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi

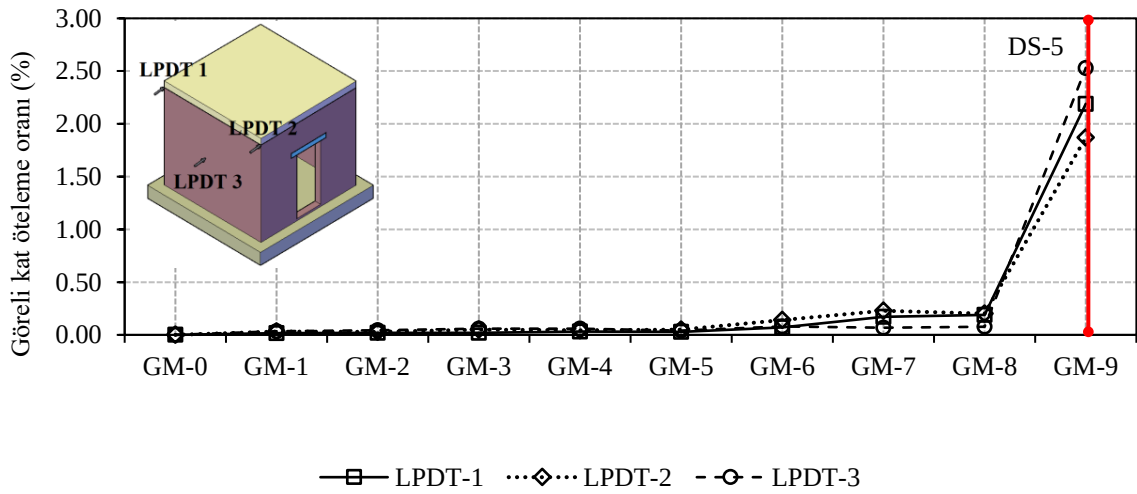
Bu bölümde, ölçüm sistemlerinden elde edilen çıktılar işlenerek güçlendirilmiş tuğla model için deneysel yapısal tepkiler sunulmaktadır. Tuğla numune deneylerinde kullanılan cihazlar bu çalışmada da kullanılmıştır. Elde edilen deneysel çıktılar ışığında, her bir sismik uyarım için göreceli yer değiştirmeler, göreceli kat öteleme oranları (IDR) ve mutlak ivmeler karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Yapısal tepkiler ve hasar arasındaki ilişki de tartışılmıştır.

Şekil 2.71, her bir sismik uyarım için maksimum göreceli yer değiştirmelerdeki değişiklikleri göstermektedir. Bu amaçla deney numunesinin döşeme ve orta yüksekliğinde

elde edilen görelî yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. şekil 2.71’de görüldüğü üzere GM-5 depreminden sonra yukarı yönlü görelî yer değiştirmeler artmaktadır. şekil 2.72, sarsma masası deneylerinden sonra maksimum görelî yer değiştirmeler kullanarak hesaplanan görelî kat öteleme oranlarının varyasyonunu göstermektedir. Ön deney çalışmasında bahsedilen Calvi [228]’un çalışması, yığma binalar için hasar durumlarına bağlı olarak öteleme limitleri önermiştir. DS-5 tipinde hasara neden olan sismik uyarımlar için maksimum IDR %2.53 olarak elde edilmiştir. Bu değerler önerilen eşik değerlerle uyumludur.

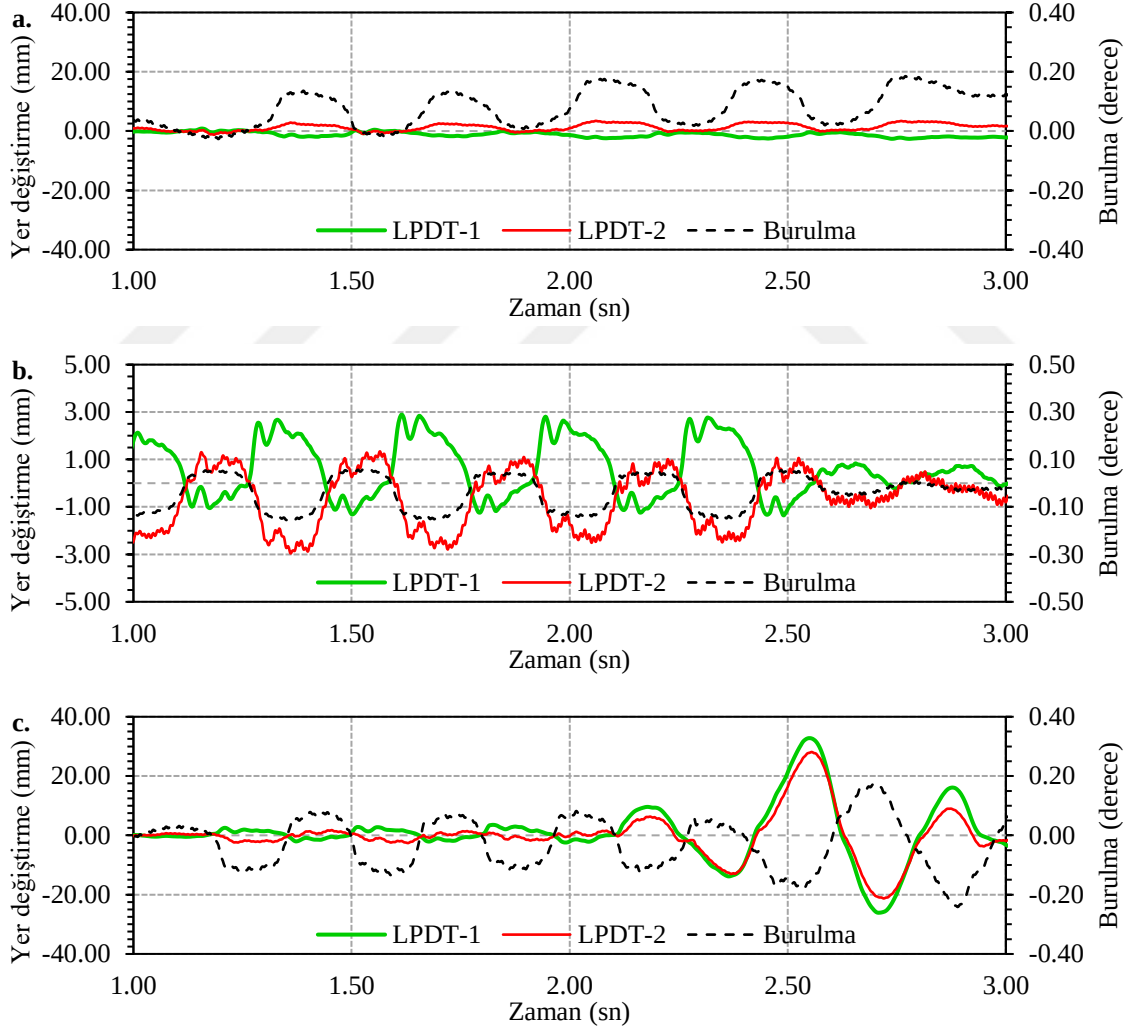


şekil 2.71. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değiştirmelerin değişimi



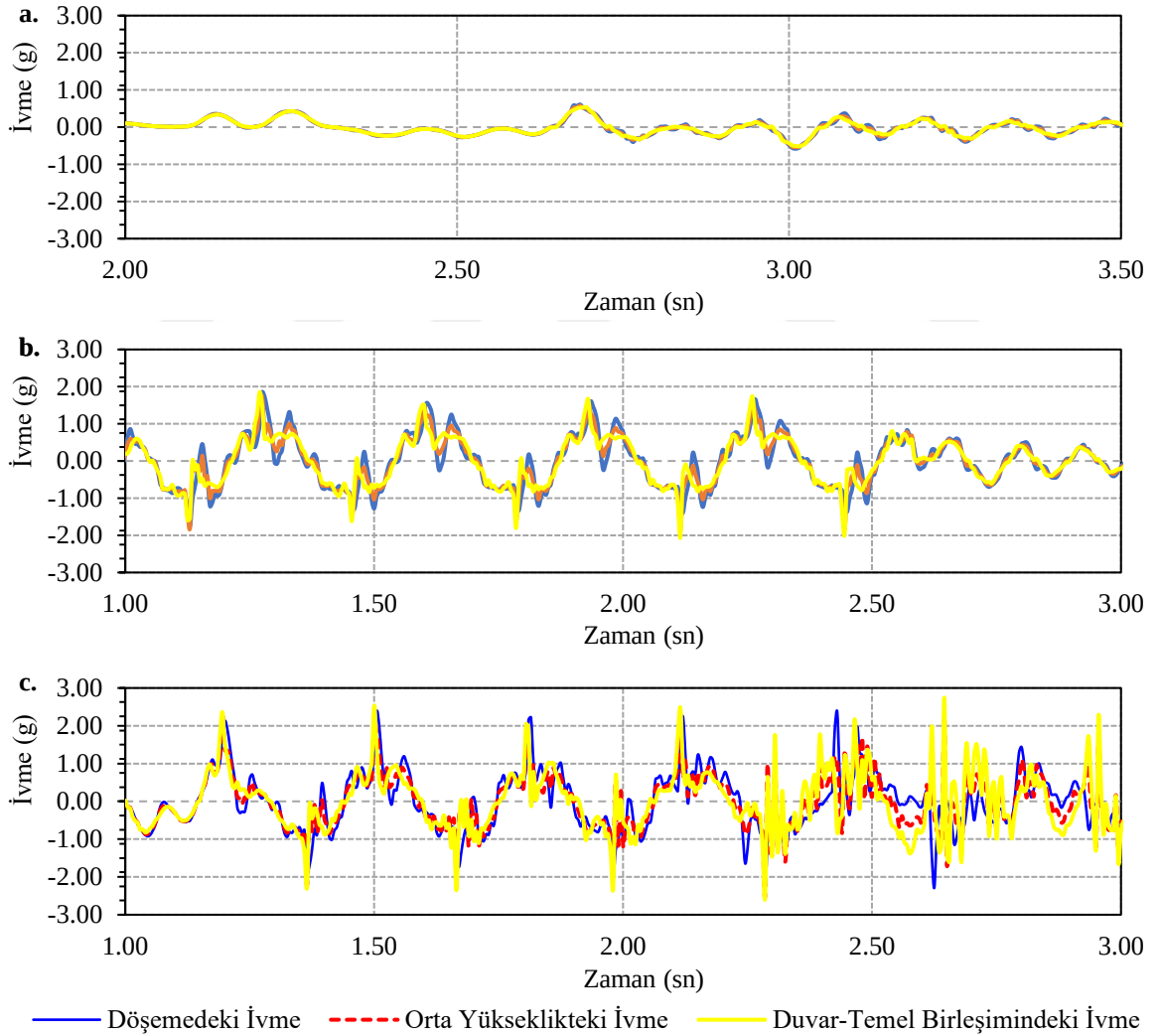
şekil 2.72. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR’lerin değişimi

Deney numunesinde kuzeye ve güneye bakan duvarların açıklık alanları birbirinden farklı tasarlanmıştır. Kuzeye bakan duvar için  $0.45\text{m}^2$  ve güneye bakan duvar için  $0.25\text{m}^2$ 'lik açıklık alanları vardır. Bu durum, duvarların düzlem içi rijitliğini etkiledi. Bu nedenle, kuzeye ve güneye bakan duvarlar olarak döşemenin köşelerinde yakalanan göreceli yer değiştirmeler arasında farklılıklar vardı ve deney numunesi belirgin burulma tepkilerine sahipti. Bu farklar GM-7 ve GM-9 beş çevrimli sinüs dalgası için sırasıyla %24.3 ve %14.6 çıkmıştır. Burulma tepkilerinin farkı, ön deney numunesine göre daha düşük çıkmıştır çünkü daha önceden hasarlı bir model ve kuzey ve güney duvarında da kesme adımlı diyagonal çatlak vardı. Ayrıntılı bir açıklama için, sismik uyarım sırasında döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmelerin zaman tanım alanında Şekil 2.73'te verilmiştir.



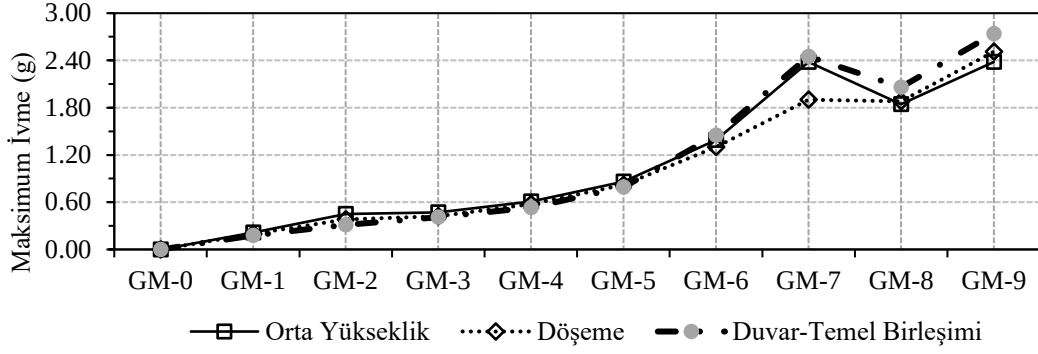
Şekil 2.73. Döşeme köşelerinden elde edilen göreceli yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-7 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.80g); b. GM-8 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.90g)); c. GM-9 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=1.00g))

Sarsma masası deneyleri sırasında, ivmeölçerlerden elde edilen sinyal verileri arasındaki atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başladığının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu amaçla, GM-4, GM-8 ve hasarın gerçekleştiği GM-9 sismik uyarımı için gerçekleşen sarsma masası deneyleri için temel-duvar birleşim yeri, orta yükseklik ve döşeme kotlarındaki ivme tepkileri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir (Şekil 2.74). Hasar gerçekleşmediği GM-4 ERZ 100 (PGA=0.5g) ivmesinin zaman kayıtlarının uyum içinde olduğu ve sinyal verileri arasında faz kayması ve sıçrama olmadığı görüldü. Şekil 2.74c, hasarın oluşmasıyla birlikte orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ivme tepkileri arasında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koydu.



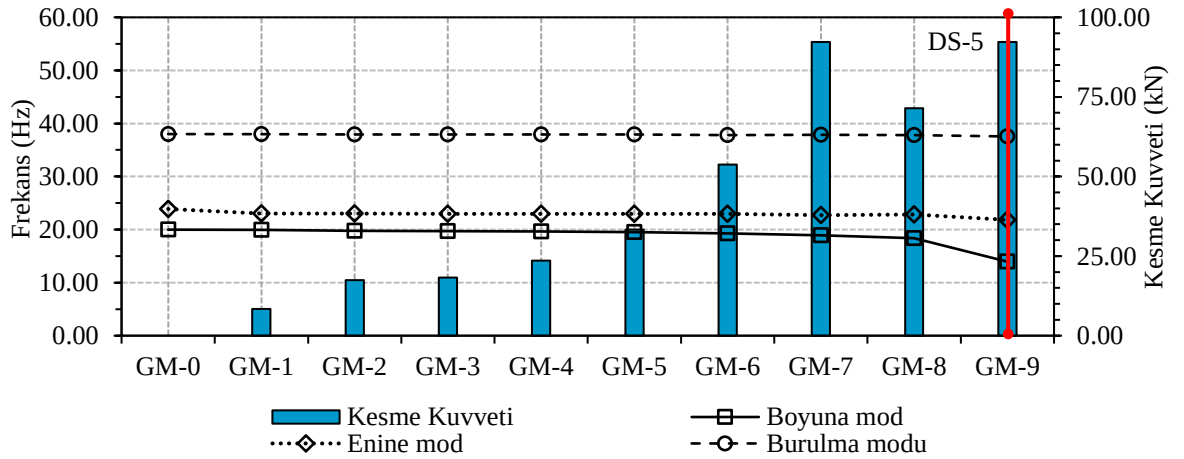
Şekil 2.74. Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşemedeki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,: (a) GM-4 ERZ-100 Depremi için (PGA=0.5g), (b) GM-8 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.90g) ve ( c ) GM-9beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=1.00g)

Test numunesinin orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ölçülen maksimum ivme değerleri Şekil 2.75'te karşılaştırılmıştır. Ön deneyde belirtildiği gibi, hasarsız durumda elde edilen bu değerler arasında ihmal edilebilir farklılıklar olduğu, ancak maksimum ivmelerin artan hasarla uyumsuz hale geldiği görüldü.



Şekil 2.75. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi

Şekil 2.76, uygulanan sarsma masası sekansı sırasında taban kesme kuvvetlerindeki değişiklikleri özetler. Taban kesme kuvvetleri döşeme seviyesine yerleştirilen her bir ivmeölçerin etki alanına ait kütle ile o ivmeölçerden elde edilen ivmelerin çarpımından elde edilen değerler toplanarak elde edilmiştir. Toplam kütle 3.950 ton olup, duvarların yarısı, betonarme döşeme ağırlıklarının ve ilave kütle toplamı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları, doğal ivme kayıtları ile yapılan testlerde taban kesme kuvvetlerinin benzer olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.76. Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri

#### 2.2.2.4.3. Sayısal Simülasyon (LP ile Güçlendirilmiş Model)

Bu bölümde, LP malzeme ile güçlendirilmiş delikli tuğla ile inşa edilmiş modelin deneysel olarak elde edilen hasar durumlarının sayısal modellerle kanıtlanması amaçlanmaktadır. Bir depremin yığma yapı üzerindeki etkisinin sayısal olarak görselleştirilmiş simülasyonu, uyum içinde çalışan üç program bileşeninden oluşan simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım paketi, uyum içinde çalışan üç program modülünden oluşur. Yazılım hakkındaki genel bilgiler ön deney kısmının sayısal simülasyon bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ön deney model ile asıl deneylerde ele alınan tuğla modelin aynı ölçülerde olması ve aynı hasar durumları gözlemlenmesi sebebiyle sadece ön deneyde sayısal simülasyonlar verilmiştir. Bu nedenlerden dolayı asıl deneylerdeki tuğla modeldeki sayısal simülasyon durumu tekraren anlatılmak istenmemiştir.

##### 2.2.2.4.3.1. LP ile Güçlendirilmiş Yığma Yapının Modellenmesi

Model için uygun ölçeğe ayarlanan birimlerle yeni bir proje oluşturuldu. Yapı, istenen şekil ve dokuyu elde etmek için ekstrüzyon, heykel veya değiştiriciler gibi çeşitli tekniklerle örgü küpleri kullanılarak modellenmiştir ve modelin ön işlemesi sırasında rijitlik sağlandı. Ayrıca, yığma modele, pencere, kapı gibi detaylar ve diğer mimari özellikler de eklenmiştir. Betonarme temel aynı teknikler kullanılarak modellenmiştir, ancak BCB eklentisi, tabanda sunulan çentik gibi içbükey şekillere izin vermeyen tüm elemanlar için standart bir çarpışma şekli olarak "dışbükey gövde" kullanır. Bu problemin üstesinden gelmek için taban, her bir alt elemanın dışbükey olması ve kolaylıkla ayrıklaştırılabilmesi için bloklara bölünmüştür. Bu topoloji değişikliği, şekil çarpışmasıyla ilgili sorunlardan kaçınmak için gereklidir. Ardından, bir ağ düzlemi şekli kullanılarak LP takviyesinin oluşturulması ve ardından malzemenin görünümünü simüle eden bir dokuya sahip bir malzemenin uygulanması gelir. Ayrıca ön işleme aşamasındaki Boolean işlemler ölçekleme ile bütün olduğunda daha iyi çalıştığı için nesnelerin ölçeklenmesi (Ctrl+A) uygulanmıştır. Ön işleme aşamasında yer hareketi “.csv” dosyası olarak eklendi ve hesaplama süresini azaltmak için simülasyon için blenderin FM versiyonu kullanıldı.

Duvarın basınç, çekme, kesme, eğilme dayanımı, yoğunluğu ve sürtünme katsayısı gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi, ön deney modelin sayısal simülasyon bölümünde verilmiştir. Ön deney modelde duvarın mekanik özelliklerinin hasarsız durumdan daha

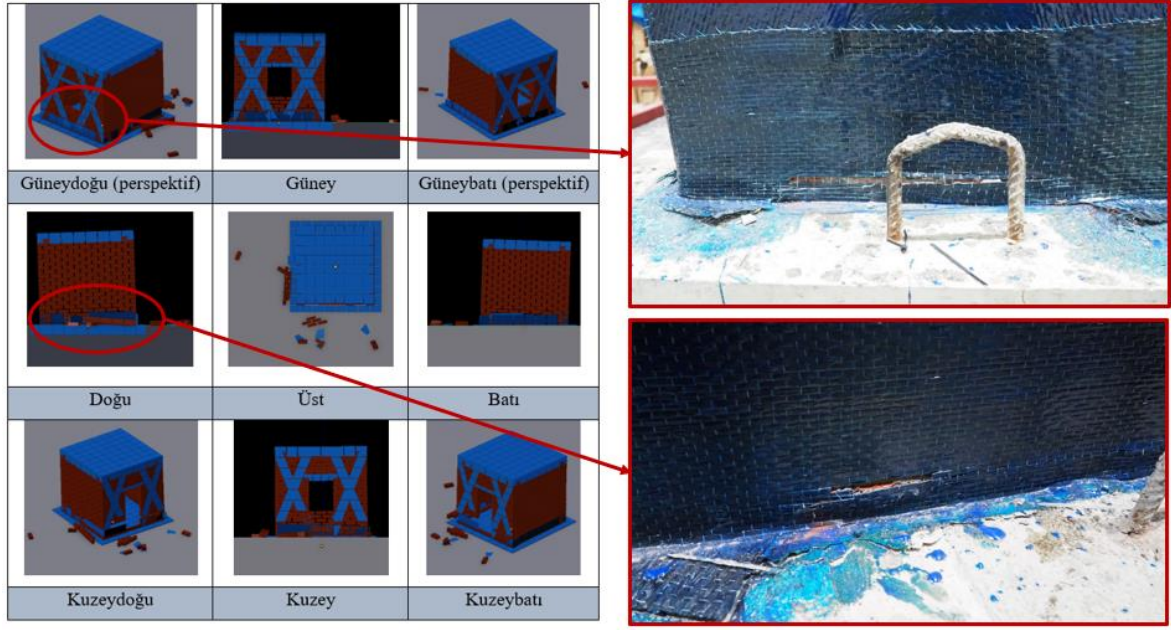
küçük değerler alındığı belirtilmiştir. Bunun nedeni ise daha önceden yapıya uyguladığımız sismik uyarımlar yapıda hasara ve yapının yorulmasına sebep olmasıdır. Ön deney modele son sismik uyarımdan önce uygulanan GM-6 sismik uyarımından sonraki durumu dikkate alınarak mekanik özellikler düşürülmüştür. Güçlendirilmiş modelde de aynı durum dikkate alınmıştır ve DS-4 tipi hasarın olduğu varsayılmıştır. LP malzemenin genişliği, sürtünme katsayısı, çekme dayanımı, kesme dayanımı ve yoğunluğu sırasıyla 200 mm, 1, 3500 N/mm<sup>2</sup>, 155 N/mm<sup>2</sup> ve 1807 kg/m<sup>3</sup> olarak simülasyon çalışmasında kullanılmıştır. LP için bağ tipi 11 olarak seçilmiştir. Zaman adımı ve çözüm iterasyonu ise ön deney ile aynı kullanılmıştır.

#### 2.2.2.4.3.2. Analiz ve Sonuçlar

LP malzeme ile güçlendirilmiş yığma modelin göçme simülasyonu birçok yönden deneysel sonuç ile örtüşmektedir. Bununla birlikte, göçme oluşumu tam olarak aynı süreçleri yansıtmamaktadır. Bu durum, başlangıç hasarların simülasyona dahil edilememesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte modellerin simülasyon sonuçları, güçlendirme için bir temel olarak kullanılabilecek hasar durumu, çatlakların ilerlemesi ve göçme ilerlemesi hakkında faydalı görsel bilgiler sağlar. Modelin tüm çevresindeki temel ile duvarın birleşim yerindeki ilk iki tuğlanın derzlerinden ayrılması ile LP malzemenin kopması ile model hasar almaya başlamıştır ve bu durum deneysel sonuçla mükemmel bir uyum içindedir (Şekil 2.77). GM-9 sismik uyarımdan sonra oluşan ve gözlemlenen hasar şekillerinin benzeri Blender simülasyonunda da gerçekleşmiştir (Şekil 2.77). Bu hasarlar, tüm duvar yüzlerinin alt kısımlarında oluşan yatay çatlaklardır.

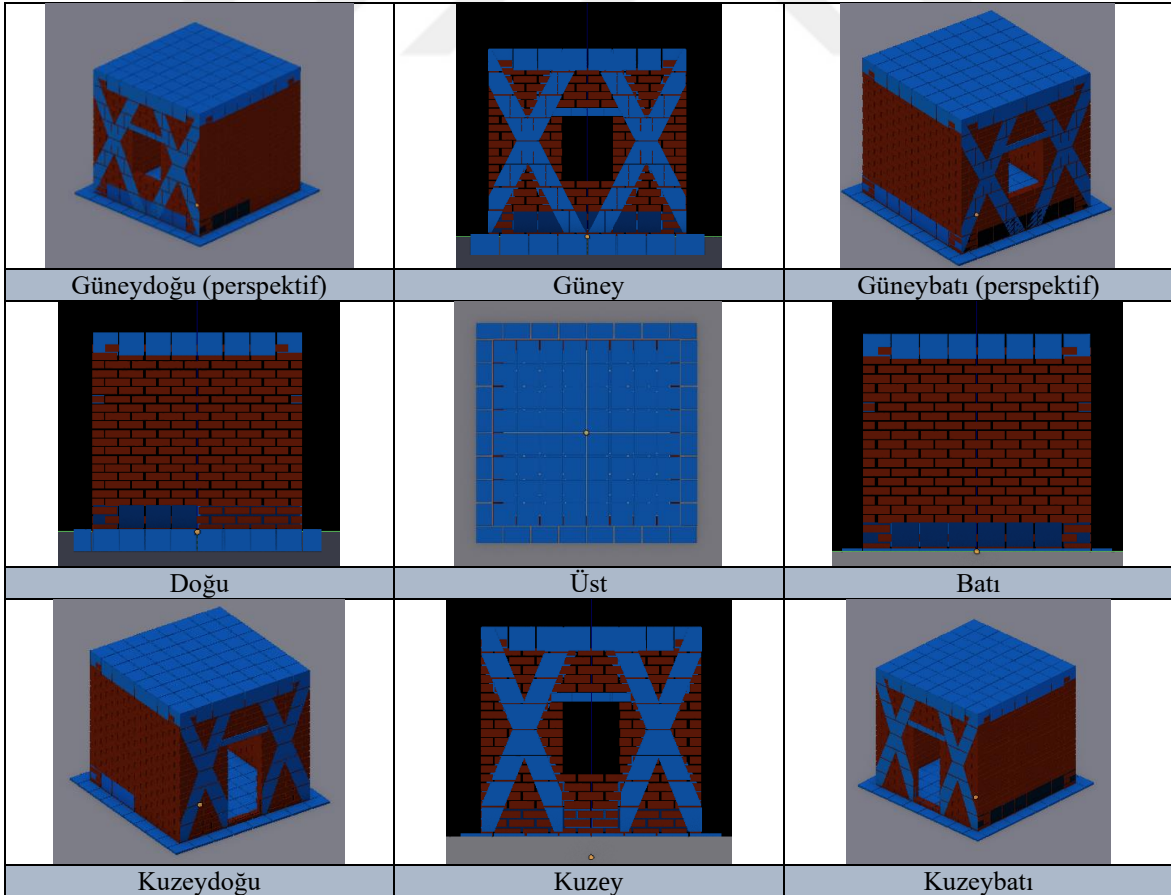
Deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi, modelde burulma hareketi gözlemlendi ve simülasyon da bu hareketi mükemmel bir şekilde tasvir etti.

Hasar durumunun ilerleyişinin perspektif ve ortogonal görünümüleri Tablo 2.30-2.32'de sunulmaktadır. Görüntüler hasarsız durum, 1. saniye ve 2. saniye olarak alınmıştır. Modelin simülasyondan elde edilen görselini gösteren görüntüler Tablo 2.33 ve Tablo 2.34'te verilmektedir.

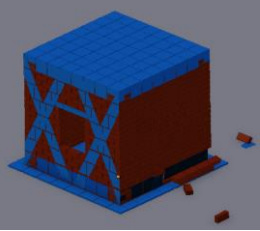
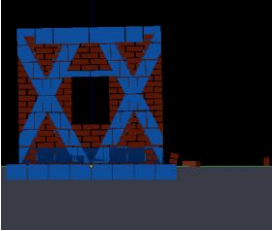
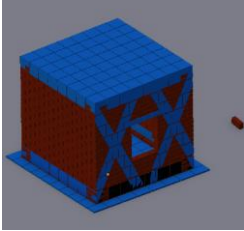
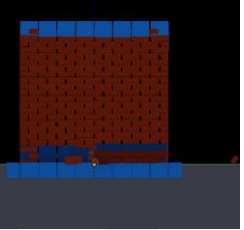
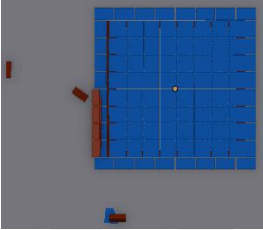
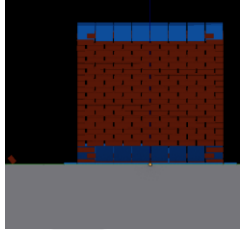
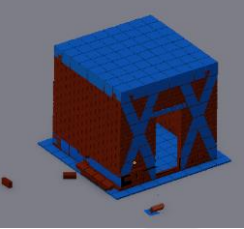
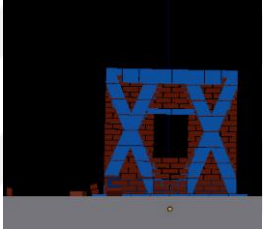
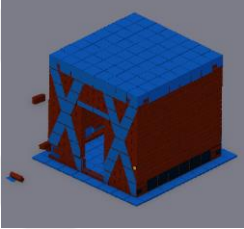


Şekil 2.77. GM-9'dan sonra simülasyon ve deney için yığma modelinin hasar koşulları ve çatlama modelleri

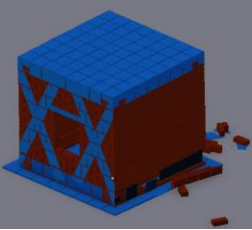
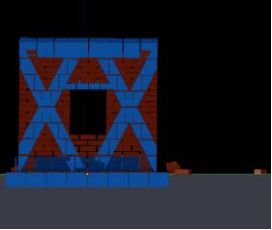
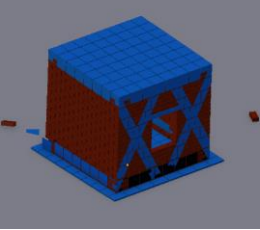
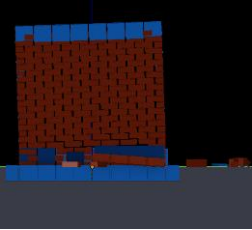
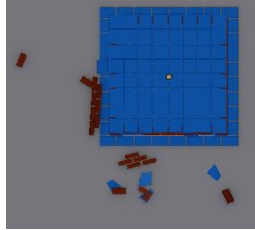
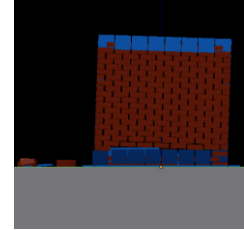
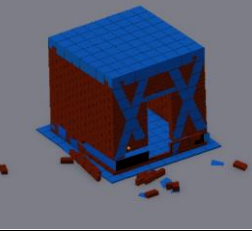
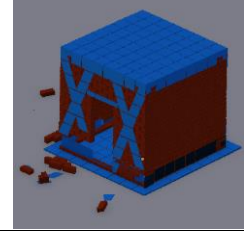
Tablo 2.30. Modelin hasarsız durumundaki perspektif ve ortogonal görünüşleri



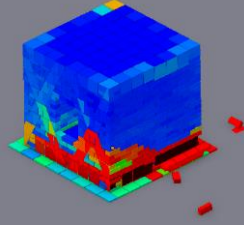
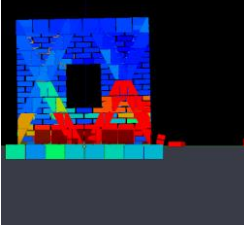
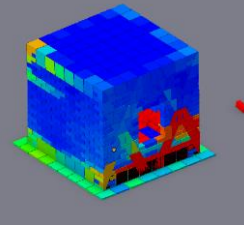
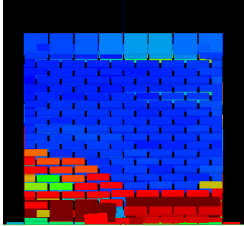
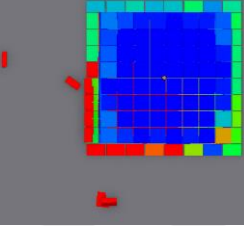
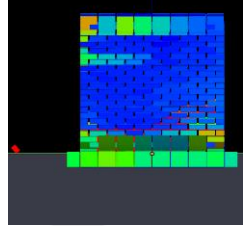
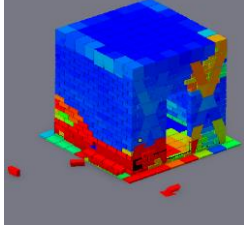
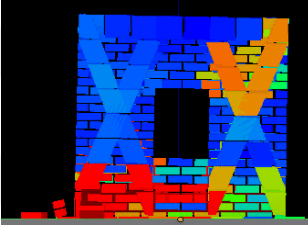
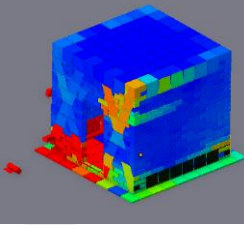
Tablo 2.31. Modelin 1. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

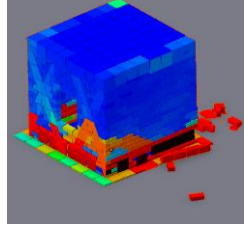
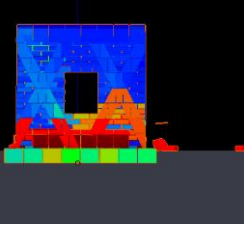
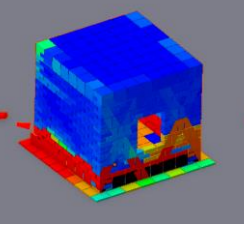
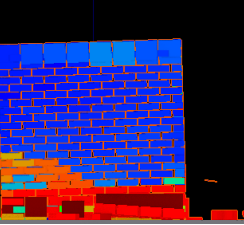
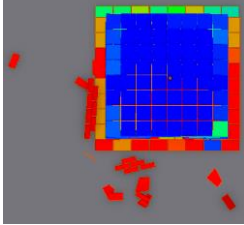
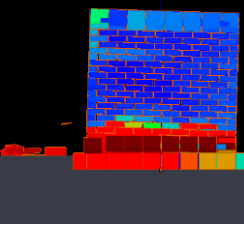
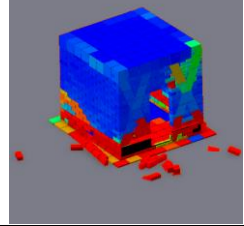
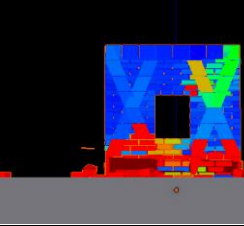
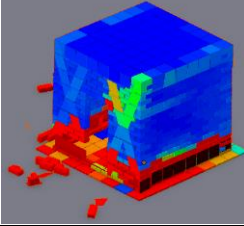
Tablo 2.32. Modelin 2. saniyedeki perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                               | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                 | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                               | Kuzeybatı                                                                             |

Tablo 2.33. Modelin 1. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| Güneydoğu (perspektif)                                                             | Güney                                                                              | Güneybatı (perspektif)                                                               |
|   |   |   |
| Doğu                                                                               | Üst                                                                                | Batı                                                                                 |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                          | Kuzey                                                                              | Kuzeybatı                                                                            |

Tablo 2.34. Modelin 2. saniyedeki görelî yer değıştirme perspektif ve ortogonal görünümüleri

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| Güneydoğu (perspektif)                                                              | Güney                                                                               | Güneybatı (perspektif)                                                                |
|  |  |  |
| Doğu                                                                                | Üst                                                                                 | Batı                                                                                  |
|  |  |  |
| Kuzeydoğu                                                                           | Kuzey                                                                               | Kuzeybatı                                                                             |

### 2.3. Bims Bina Modeli

Bu deney kapsamında,  $\frac{1}{2}$  ölçekli tuğla modelin planında ve boyutlarında laboratuvar ortamında bims malzeme ile aynı model inşa edilmiştir. Her model çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki modelin hasarsız durumları için DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin bulunması. İkinci aşama ise sarsma masası deneyleri. Son aşama ise her sismik uyarım öncesi ve sonrası DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi.

#### 2.3.1. Modelin Geometrik-Malzeme Özellikleri ve İnşa Aşamaları

Deney modeli, profesyonel duvar ustaları tarafından  $\frac{1}{2}$  ölçekli olarak laboratuvarda üretilmiştir. İmalat aşaması tuğla modeldeki sıralama ve şekilde yapılmıştır. Öncelikle temelde bir kare olan modelin temeli üretildi. Daha sonra duvarlar ve döşeme tamamlandı. Duvarların kalınlığı 10 cm'dir. Temele konulan 16 mm'lik demir kancalar yardımıyla model inşasından sonra sarsma masasına taşındı. Duvarlar, sabit sınır koşulunu temsil etmek için temele 2-3 cm olacak şekilde gömülmüştür (Şekil 2.7). Hazır beton santrallerinden temin edilen beton ile temel betonu dökülmüştür. Döküm esnasında küp ve silindir numuneler malzeme deneyi için alınmıştır. Daha önceki bölümlerde temel kalıp hazırlanması ve temel beton dökümüne ait görseller verilmiştir. Harç özellikleri ve derz kalınlıkları ön deney ve asıl tuğla modelde kullanılanların aynıdır. Şekil 2.78'de duvar üretimine ait ayrıntılı görseller sunulmuştur. Bims birim üretici firmadan temin edilen dolu bims TBDY'nin belirttiği gibi minimum basınç dayanımı 5 MPa olan ürünlerdir. Üretici firmadan temin edilen 10 cm kalınlıktaki birim elemanlar yarım ölçekli olacak şekilde laboratuvar ortamında 10cm×19,5cm×9cm ölçülerinde kesilmiştir. Bu kesim işleri ile alakalı görseller Şekil 2.79'da verilmiştir. Kesilen ve duvar imalatına hazırlanan duvar birim elemanlar ile 1800x1800x1500mm ölçülerinde tek açıklıklı ve tek katlı yığma model duvarı üretilmiştir. Bir kat yüksekliği boyunca 16 sıra bims birim eleman kullanılmıştır.



Şekil 2.78. Bims duvar üretimine ait görseller



Şekil 2.79. Bims beton kesimine ait görsel

Taşıyıcı duvar imalatından 7 gün sonra döşeme kalıp çalışmalarına başlanmıştır. Model içine düzgün bir şekilde yerleştirilen 5x10 cm'lik dikmeler ile döşeme kalıbı sabit tutulmuştur. Döşeme kalıbı hazırlığı bittikten sonra döşeme yüzeyi düzgün ve pürüzsüz olması için yağlanmıştır. Döşeme kalıbı imalatına ait görseller daha önceki bölümde bulunan Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu tez kapsamında hatıl imalatı yapılmadığı için döşemenin duvardan kesme/kayma durumunu minimize etmek için 8 adet 8 mm'lik donatılar 50 cm ara ile en üst duvar birim sırasına matkap yardımıyla yerleştirilmiştir. Kenarlardan 5cm paspayı bırakılarak çift yönlü olmak üzere toplamda 24 adet 8 mm'lik boyuna donatılar kalıp içine yerleştirilmiştir. Döşeme donatı çalışması tamamlanmış modele ait resimler Şekil 2.80'de verilmektedir. Şekil 2.81'de ise inşası tamamlanmış bims modele ait resim verilmiştir.



Şekil 2.80. Döşeme donatı çalışması



Şekil 2.81. Bims model

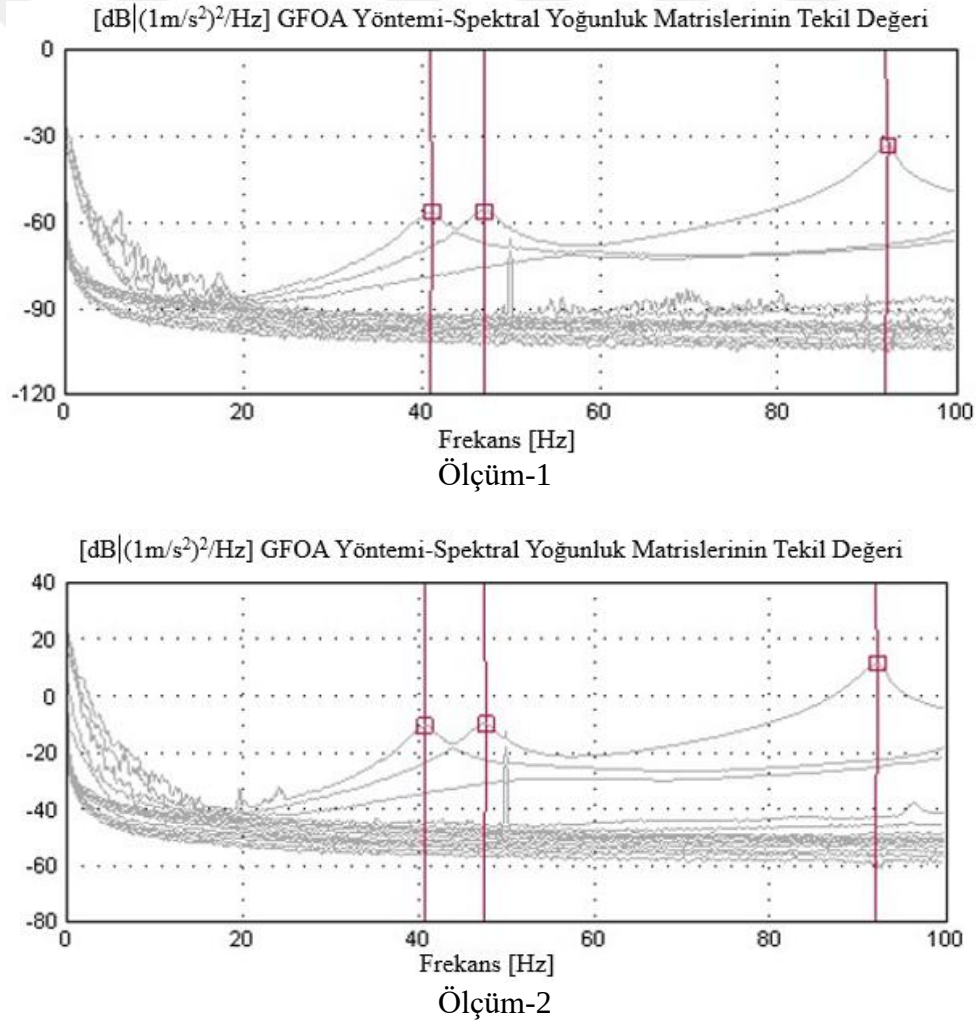
### 2.3.2. Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Bims model dayanımını kazandıktan sonra hasarsız dinamik karakteristiklerini elde etmek için DMA yöntemi uygulanmış ve dinamik parametreler (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar modellerinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için kullanılan DMA yönteminde 2.2.1.2. bölümünde anlatılan ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yine aynı bölümde anlatılan yöntemler ve ölçüm prosedürü uygulanmıştır. Tüm bu ölçümlere ait PULSE yazılımında oluşturulan model ve ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 2.13'te şematik olarak verilmiştir. Ölçümlerin alınmasına ait görsel ise Şekil 2.82'de verilmiştir. Hasarsız durum için alınan dinamik karakteristikler sarsma masasına yerleştirilmeden yerde alınan ölçümlere aittir. Bims model binanın OMA deneylerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması ile elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin grafiği 3 ölçüm içinde şekil 2.83'te verilmiştir. Bims model için elde edilen ilk üç mod şekli şekil 2.84'te verilmiştir.

Bims model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.35'te verilmektedir. Tablo 2.35 incelendiğinde bims model için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla ölçüm-1 için 40.96-92.02 Hz ve %1.242-3.287 arasındadır. Ölçüm-2 için ise doğal frekans ve sönüm oranı 40.86-91.98 Hz ve %1.31-3.344 arasında elde edilmiştir. Ölçüm-3 için ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 40.9-91.93 Hz ve %1.303-3.227 arasında olduğu görülmektedir.

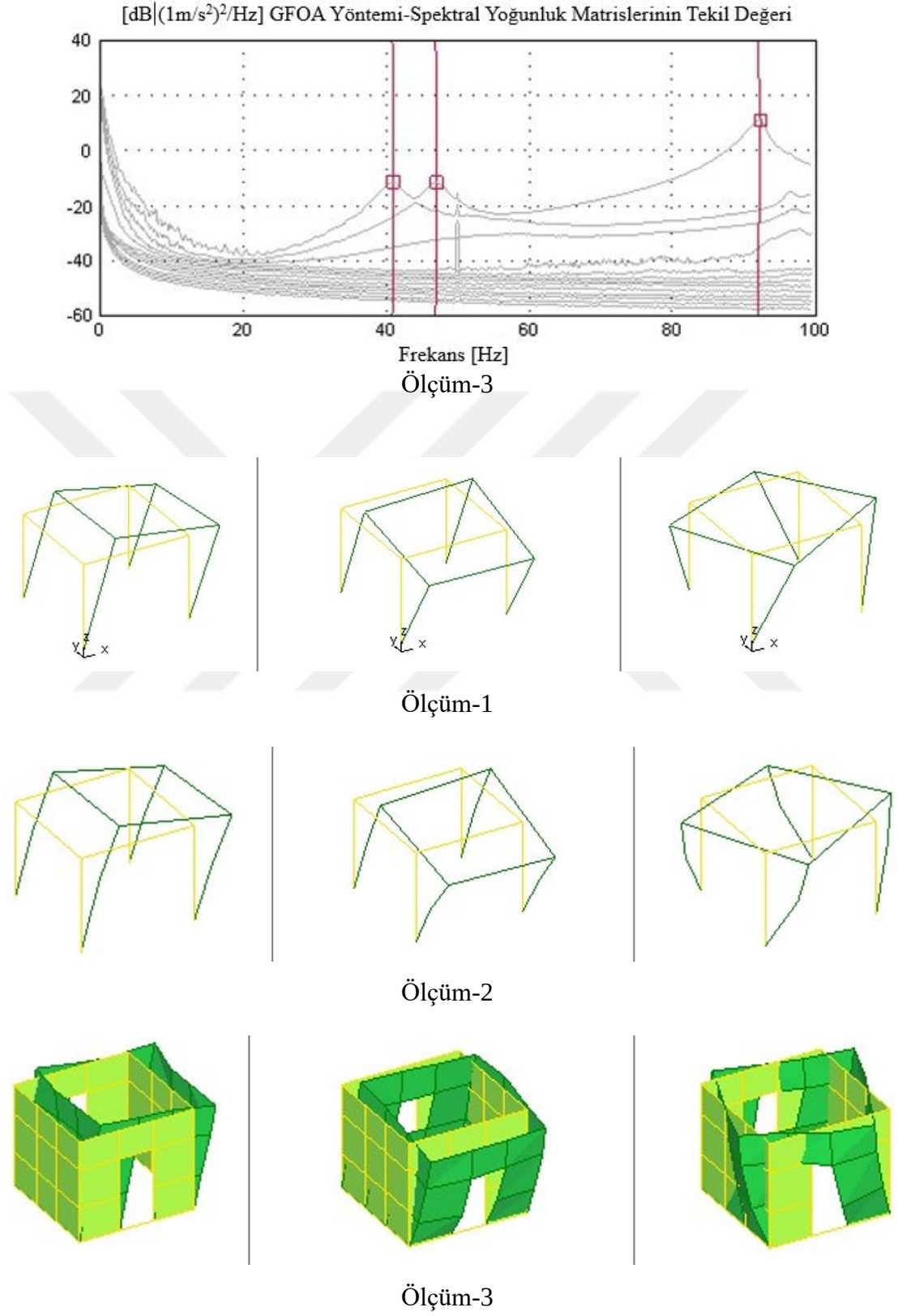


Şekil 2.82. DMA ölçümlerine ait görsel



Şekil 2.83. Bims model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.83'ün devamı



Şekil 2.84. Bims modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.35. Bims model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler

| Mod No.    | Ölçüm-1         |                    | Ölçüm-2         |                    | Ölçüm-3         |                    |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|            | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) | Frekans<br>(Hz) | Sönüm<br>oranı (%) |
| 1(Enine)   | 40.96           | 3.204              | 40.86           | 3.344              | 40.9            | 3.227              |
| 2(Boyuna)  | 46.98           | 3.287              | 47.5            | 2.865              | 46.95           | 2.865              |
| 3(Burulma) | 92.02           | 1.242              | 91.98           | 1.31               | 91.93           | 1.303              |

### 2.3.3. Sarsma Masası Deneyleri

Bu bölümde, ölçekli bims binanın deprem davranışının incelenebilmesi amacıyla sarsma masası deneyleri uygulanmıştır ve çıktılar işlenerek yapısal tepkiler verilmektedir. Sarsma masası deneylerinde uygulanan sismik uyarılar, gerçek deprem kayıtları veya yapay uyarılar olabilir. Sismik uyarılmaların yapılarda ve yapı elemanlarında neden olduğu iç kuvvetler ve deformasyonlar sarsma masası deneylerinde doğru bir şekilde belirlenebilir.

Bu çalışmada tuğla modelde olduğu gibi deney numunelerinin ölçeklendirilmesinde yapay kütle benzeştirmesi modeli kullanılması nedeniyle deneyler sırasında her bir kata ilave kütleler eklenmiştir. Tuğla modelin sarsma masası deneylerinde olduğu gibi Erzincan depreminin ölçeklendirilmiş 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artımlı olarak uygulandı. Daha sonra hasar durumuna göre iki adet 0.5g ve 0.7 g büyüklüklerinde sinüs dalgasının uygulanması ile altı farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir.

#### 2.3.3.1. Sarsma Masası Deney Kurulumu

Laboratuvar zemininde inşa edilen deney modeli daha sonra düz bir polyester kaldırma askısı ve tek kirişli bir gezer vinç kullanılarak sarsma masasına taşınmıştır. Tüm model boyutları birbirinin benzeri olduğu için numunenin taşınımı ve montajı benzerdir. Modelin sarsma masasına taşınması ve montajı ile ilgili görseller Şekil 2.85’te verilmiştir.

Sarsma masası deneyleri sırasında modelin genel ve lokal davranışını ölçmek için ivmeölçerler ve LPDT’ler kullanıldı. Ayrıca ölçüm sistemlerinden elde edilen yapısal tepkiler işlenerek hasarlarla ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla, uygulanan ve ölçülen sismik uyarımları karşılaştırmak için sarsma masasının rijit platformuna çift eksenli bir ivmeölçer sabitlenmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller arası atlamalar ve faz kaymaları,

yumuşama ve çatlak gelişiminin başlangıcının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu nedenle, test numunesinin farklı bölgelerine birçok ivmeölçer yerleştirilmiştir. Batıya bakan duvarda düzlem dışı tepkiyi ölçmek için üç adet tek eksenli ivmeölçer kullanıldı. Test modelinin farklı yüksekliklerinde ve bölgelerinde düzlem içi ve düzlem dışı yapısal tepkileri izlemek için yedi adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirildi. Titreşim yönünde test numunesinin yüksekliği boyunca görelî yer değiştirmeler ve kat ötelenme oranlarındaki değişiklikler dört adet LPDT ile izlendi. Bunlardan biri temel seviyesinde ve diğeri orta yükseklikte yerleştirilmiştir. Diğeri ikisi çatı seviyesinde bulunuyordu. Sarsma masası deneyleri sırasında oluşabilecek olası burulma tepkileri de çatı hizasına yerleştirilmiş iki adet LPDT ile izlenmiştir. Şekil 2.45, ivmeölçerlerin ve LPDT'lerin düzenini göstermektedir. Bims numunesine ait deney düzeneğine ait resimler şekil 2.86'da verilmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda her bir model için eklenecek ilave kütle yaklaşık 2.30 ton olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu ağırlıklar 25cm×100×1.6cm boyutlarında çelik levhalar ile deney numunesi döşemesine 14 adet M14 tij ile 7 bölüm olarak bağlantısı sağlanmıştır.

Farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun artırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Test için Erzincan depremi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Sarsma masası testi için doğal yer hareketleri Erzincan depreminin %25 (PGA=0.13 g), %50 (PGA=0.25 g), %75 (PGA=0.37) ve %100 (PGA=0.50 g)'ü seçilmiştir. Ayrıca genliği 50 mm, frekansı 1.6 Hz ve 0.5 g olan ve genliği 25 mm, frekansı 2.7 Hz ve 0.7 g olan sinüs dalgası 5 döngülü dikkate alınarak uygulanmıştır.

Üretilen deney numuneleri ½ ölçekli olarak imal edildiği için seçilen ivme kayıtlarının da ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde anlatılan ölçeklendirme esasları dikkate alınmıştır. Tuğla modelde kullanılan 6 adet yer hareketi kayıtları bims modelde de kullanılmıştır. Önceki bölümlerde seçilen kayıtların ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.85. Bims modelin sarsma masasına taşınması



Şekil 2.86. Bims modeline ait deney düzeneği

### 2.3.3.2. Deney Sonuçları

#### 2.3.3.2.1. Deney Sonrası Hasar Tespitleri

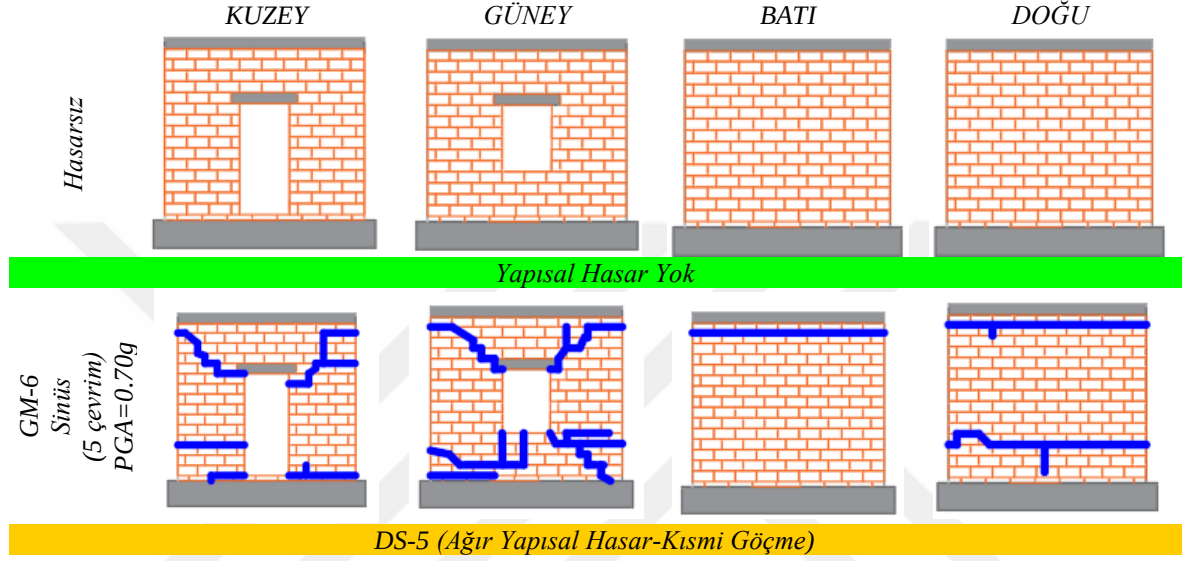
Her yer hareketinin sarsma masasına uygulanmasından sonra test numunesi görsel ve deneysel olarak incelenmiştir. Görsel gözlemlerde, test sonrası hasarı değerlendirmek için çatlak yayılımları duvarlarda işaretlendi. Hasarın deneysel olarak gözlemlenebilmesi için test numunelerinin hasarsız (başlangıç) ve hasarlı durumları için modal parametreler, test öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim ölçümleri ile belirlenmiştir.

Ön deney numunesindeki hasarın niteliksel bir tanımı için, EMS-98 tanımlanan hasar sınıflandırması dikkate alınmıştır. Burada modelin gevrek bir davranış sergilemesi ve üzerinde ilave kütleler olması nedeniyle hafif hasar durumu göstermedi ve DS-5 tipi ağır yapısal hasar durumu gözlemlendi. Yani model aniden hasar alarak göçme durumuna geldi.

#### 2.3.3.2.2. Görsel Tespitler

Şekil 2.87, hasarsız ve DS-5 hasar durumu için dış yüzlerden görüntülenen deney numunesinin çatlak ilerlemesini özetlemektedir. Mavi işaretler deney sırasında gözlemlenen çatlaklarla ilişkilendirilir. Sarsma masası deneyi sırasında Erzincan depremlerine (ERZ 25, ERZ 50, ERZ 75 ve ERZ 100) karşılık gelen ilk dört yer hareketinde görünür çatlaklar gözlenmedi. Daha sonra GM- 5 beş çevrimli sinüs dalgası ( $PGA = 0.5 \text{ g}$ ) uygulandı ve hasar gözlenmedi. Beş adet sismik uyarım karşısında yorulan model, GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası ( $PGA = 0.7 \text{ g}$ ) uyarımı sırasında DS-1, DS-2 ve DS-3 hasar durumlarını göstermeden aniden hasar alarak DS-5 tipi ağır yapısal hasar ve göçme durumuna geçti. Bu aşamada, doğu ve batı yönündeki duvarlardaki çatlakların önemli bir kısmı yataya yakındı ve döşeme seviyesinin hemen altındaki ilk iki tuğla sırasındaki kayma hareketinden kaynaklandı. Ayrıca düzlem içi deformasyon, kuzeye bakan duvarda kapının üst köşelerinden döşemeye kadar uzanan ve pencerenin dört köşesinden döşemeye ve temele kadar uzanan çapraz bir çatlağa neden olmuştur. Yığma yapılar için önceki deneysel çalışmalarda benzer çatlak yayılımları rapor edilmiştir [221]. Bu diyagonal çatlaklar tuğla modelin çatlak yayılımları gibi sadece harç yatağı derzleri boyunca oluşmamıştır. Dayanım olarak delikli tuğladan daha düşük bir dayanıma sahip olan bims harçtan önce dayanım kapasitesine ulaşarak hasar almıştır. Temel seviyesinin hemen üzerinde ilk iki tuğla sırasında ve lento kirişleri

çevresinde de kesme/kayma çatlakları gözlenmiştir. Test sonunda bu çatlak genişliklerinin santimetre mertebesinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapısal hasar DS-5 tipi olarak sınıflandırıldı. Hasarın DS-5'e ulaşması üzerine deney düzeneği üzerindeki ölçüm sistemleri (ivmeölçerler ve LPDT'ler) güvenlik amacıyla kaldırıldı. Şekil 2.88, dış yüzden bakıldığında DS-5 için test numunesinin hasar modelini göstermektedir.



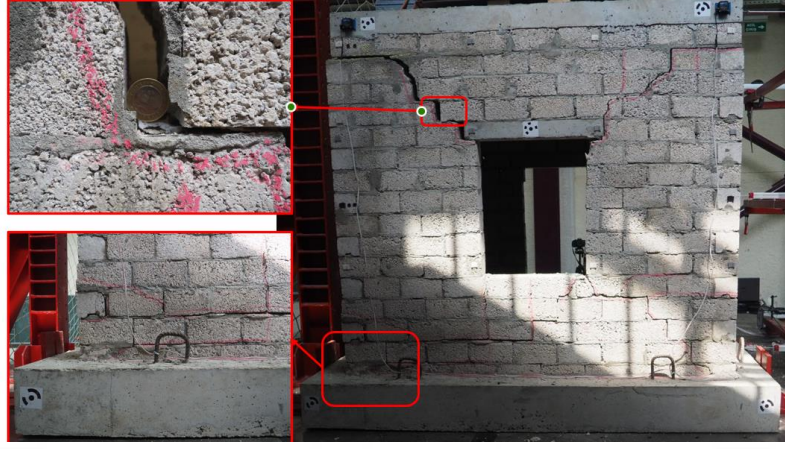
Şekil 2.87. Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli.



(a) Kuzey

Şekil 2.88. DS-5 tipi için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli

Şekil 2.88'in devamı



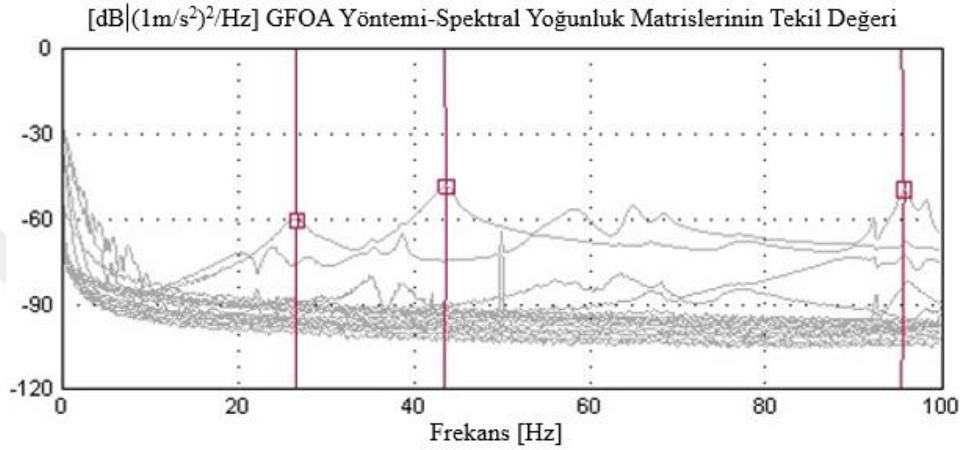
(b) Güney

#### 2.3.3.2.3. Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

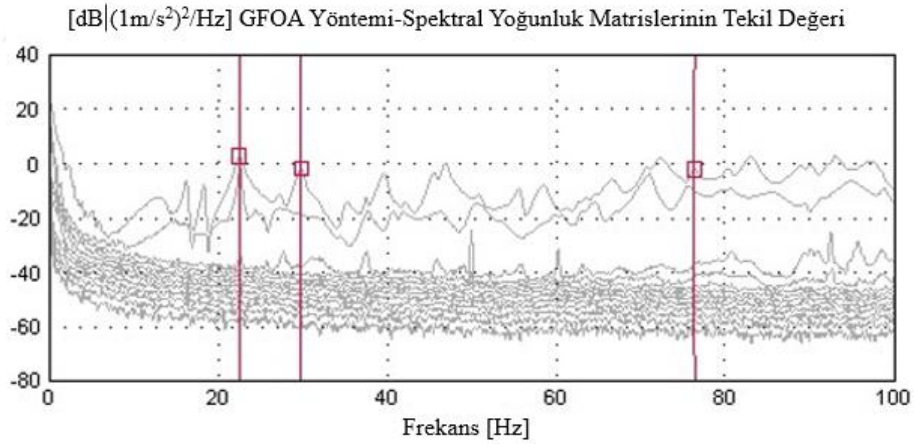
Bu çalışmada, görsel gözlemlere ek olarak, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında oluşan hasar ile yığma yapının modal parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her sarsma masası deneyinden sonra ortam titreşim testleri yapılmış ve modal parametreler elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, hasar öncesi ölçümde dikkate alınan aynı ivmeölçer konumları ve ölçüm özellikleri kullanılarak tekrarlandı. Böylece elde edilen hasarsız ve hasarlı modal parametreler karşılaştırılarak hasarın modal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha önce verilen hasarsız modelin dinamik karakteristikleri yerde alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Fakat bu bölümde, model sarsma masasına yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır.

GFOA sonucunda ilk üç doğal frekans ve mod şekli için veri setinin Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 2.89 (a) ve (b), hasarsız modelin yüksüz ve ilave kütleli durumun grafiğini göstermektedir. Ayrıca DS-4 tipi için hasar durumlarının grafikleri şekil 2.89 (c)'de verilmiştir. Sarsma masasına yerleştirildikten sonraki hasarsız-ilave kütleli durum için ilk üç doğal frekans sırasıyla 26.52Hz, 43.48Hz ve 95.47Hz olarak elde edilmiştir. Binanın ilgili mod şekilleri boyuna, enine ve burulma modları olarak belirlenmiştir. 2.3 ton ilave kütle konulduktan sonra dinamik karakteristikleri değişen modelin hasarsız-ilave yüklü durum için ilk üç doğal frekans sırasıyla 22.53 Hz, 29.8 Hz ve 76.41 Hz olarak elde edilmiştir. İlave kütle konmasından sonra frekanslarda aşağı yönlü hareket görülmektedir. İlave kütle boyuna, enine ve burulma frekanslarını %15, %31 ve %20

kadar etkilemektedir. Ayrıca, Şekil 2.89'dan görülebileceği gibi, DS-5 için hasarlı koşulların üç doğal frekansı boyuna mod için 20.55 Hz, enine mod için 22.79 Hz ve burulma modları için 73.29 Hz elde edilmiştir. Ağır hasarlı bims modelin yüksüz durumu için DMA ölçümünden anlamlı bir sonuç alınamamıştır. Ağır hasar alan model sarsma masasının üzerinde yıkılmıştır ve hasarlı durum için yerde ölçüm alınamamıştır.



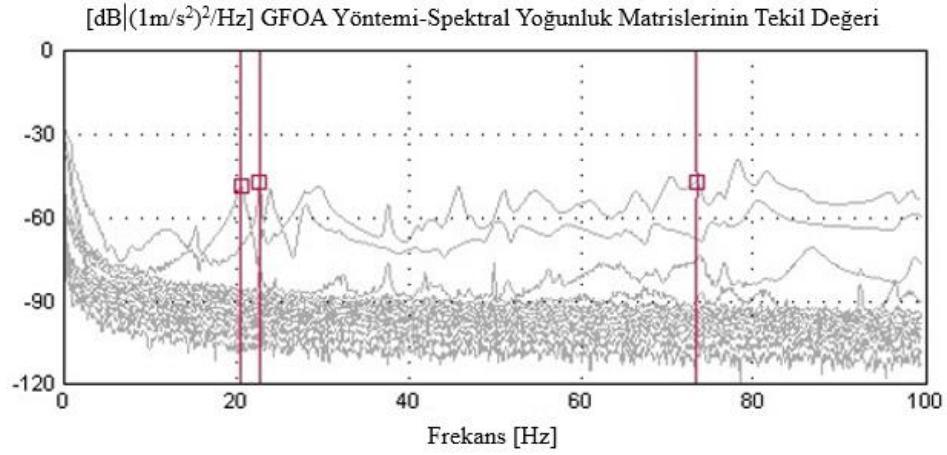
(a) Hasarsız-İlave kütlesiz durum için



(b) Hasarsız-İlave kütleli durum için

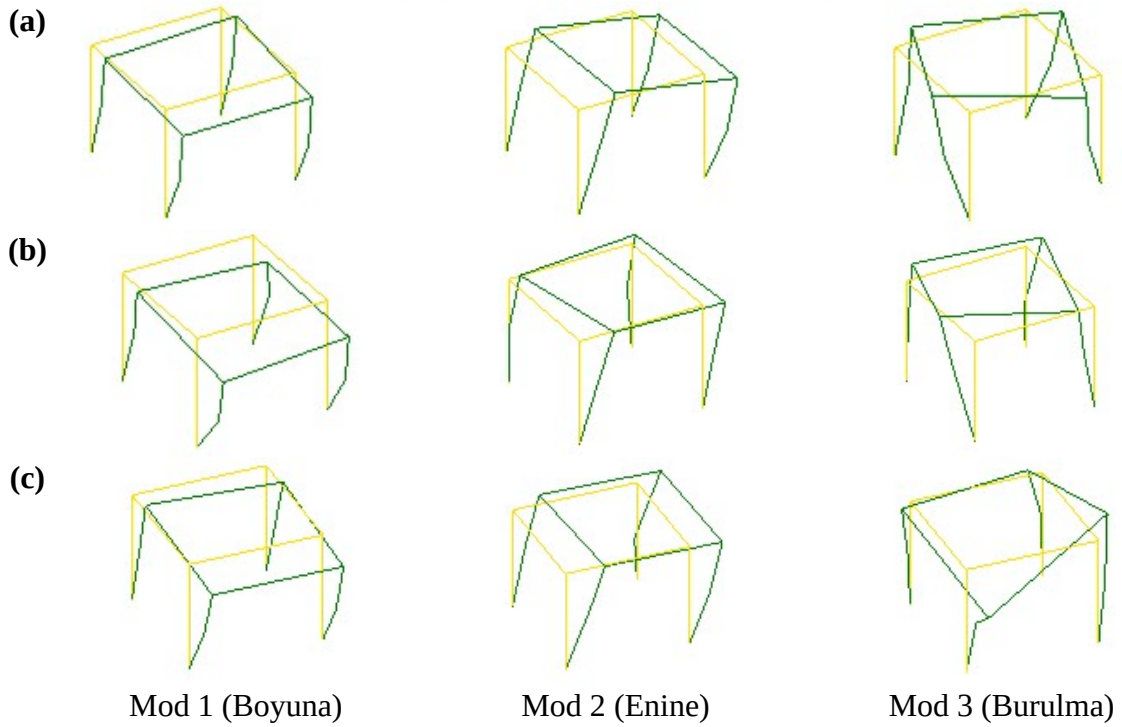
Şekil 2.89. Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız-İlave kütlesiz durum için, (b) Hasarsız-İlave kütleli durum için, (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme-İlave kütleli durum için)

Şekil 2.89'un devamı



(c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme)

Şekil 2.90, deney ölçümlerinden ve hasarlı durumda (DS-5 tipi) elde edilen ilk üç mod şeklini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Yapının mod şekillerinin yapısal hasar ile değiştiği sonucuna varılmıştır. Her modun genliğinin farklı salınım genliklerine sahip olduğu da belirtilmelidir.



Şekil 2.90. Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) hasarsız-İlave kütleli durum için (b) Hasarsız-İlave kütleli durum için ve (c) DS-5 için (ağır yapısal hasar ve kısmi göçme)

Artımlı dinamik testler sonucunda, duvarların üst ve alt kısımlarında çok sayıda çapraz ve yataya yakın çatlaklar görsel olarak gözlemlendi. Yapısal rijitliği azaltan bu hasarların özellikle enine modlarında doğal frekanslarda düşüşlere neden olduğu görülmektedir. GM-1 (PGA=0.13g), GM-2 (PGA=0.25g), GM-3 (PGA= 0.37 g), GM-4 (PGA= 0.50 g) ve GM-5 (PGA= 0.5 g) sismik uyarılarda deney numunesinde görünür bir hasara neden olmadı ve bu nedenle doğal frekanslarda önemli bir değişiklik gözlenmedi. GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.70g) ile yapılan testte diyagonal çatlak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve yapısal hasar DS-5 tipi olarak sınıflandırılmıştır. Numuneler, DS-5 hasar durumuna ulaşıldığında en yüksek frekans düşüm oranına maruz kaldı. Düşüşler hasarsız duruma (ilave kütleli durumlar) göre boyuna mod için %8.8, enine mod için %23.5 ve burulma modu için %4.1 olarak hesaplandı. Tablo 2.36, bims model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki ve hasarsız durumlar için dinamik karakteristikler verilmiştir.

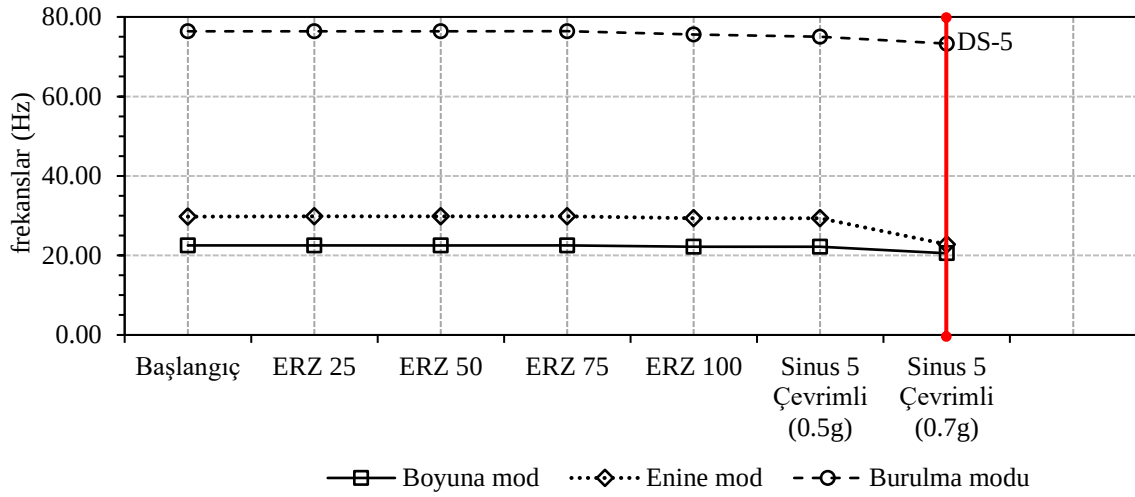
Tablo 2.36. Bims model için GFAO yöntemine göre elde edilen sarsma masası deneylerinden sonraki dinamik karakteristikler

| Mod Şekli | Hasarsız Durum<br>(İlave kütsüz) |                    | Hasarsız Durum<br>(İlave kütleli) |                    | DS-5 (İlave kütleli) |                    | Frekans<br>Farkı* |
|-----------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
|           | Frekans<br>(Hz)                  | Sönüm<br>Oranı (%) | Frekans<br>(Hz)                   | Sönüm<br>Oranı (%) | Frekans<br>(Hz)      | Sönüm<br>Oranı (%) |                   |
| Enine     | 43.48                            | 2.51               | 29.8                              | 1.62               | 22.79                | 0.52               | 23.5              |
| Boyuna    | 26.52                            | 6.78               | 22.53                             | 1.92               | 20.55                | 1.119              | 8.8               |
| Burulma   | 95.47                            | 0.527              | 76.41                             | 0.55               | 73.29                | 0.79               | 4.1               |

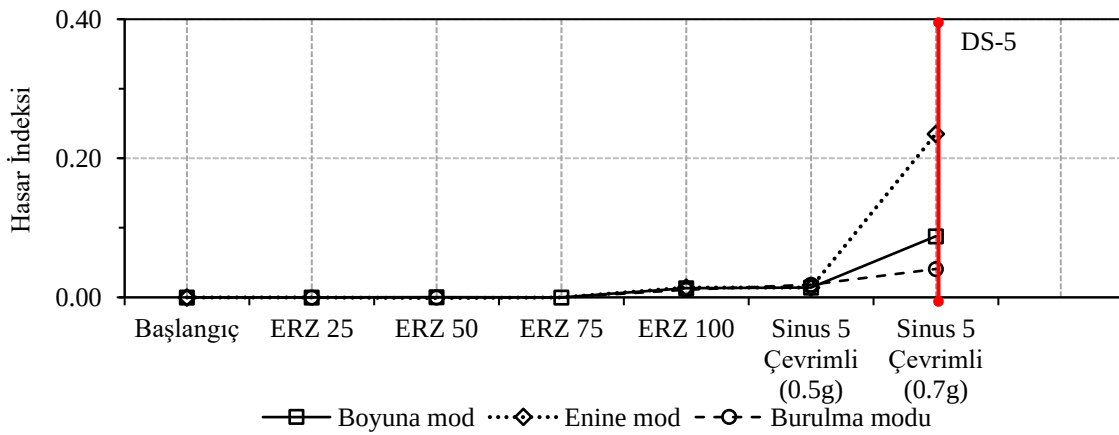
\*Hasarsız duruma (İlave kütleli) göre DS-5 tipi hasar durumunun frekans farkları

Şekil 2.91, Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikleri göstermektedir. DS-5 tipi hasar durumuna kadar doğal frekanslarda gözle görülür bir değişim belirlenmemiştir. Frekanslardaki bu sabit durum modellere ilave ettiğimiz kat kütlelerinden kaynaklandığı ve bu sayede yapının daha stabil olmasını sağladığı söylenebilir. Ağır hasarlı durumun enine modu için hasarsız duruma göre %23.5 seviyesinde frekans azalması belirlenmiştir. GM-3 sismik uyarıma kadar DI değerlerinde artışlar gözlenmemiştir. GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=10.7 g) ile yapılan deney sonrasında ulaşılan DS-5'te DI değerleri boyuna mod için 0.09, enine mod için 0.24 ve

burulma modu için 0.04 olarak belirlendi. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI değerleri Şekil 2.92’de verilmiştir.



Şekil 2.91. Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler



Şekil 2.92. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI

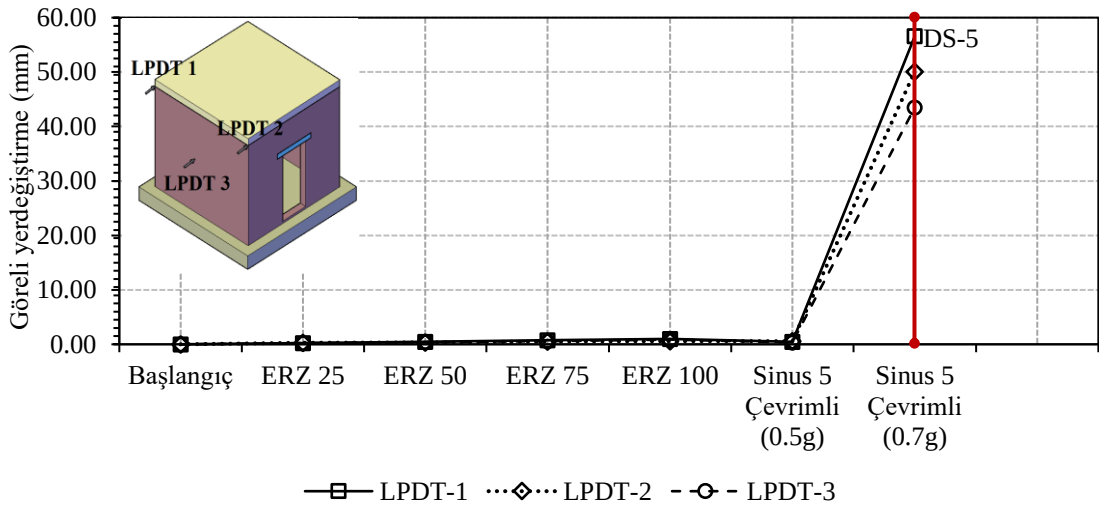
#### 2.3.3.2.4. Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, ölçüm sistemlerinden elde edilen çıktılar işlenerek bims model için deneysel yapısal tepkiler sunulmaktadır. Elde edilen deneysel çıktılar ışığında, her bir sismik uyarım için göreceli yer değiştirmeler, göreceli kat öteleme oranları (IDR) ve mutlak ivmeler

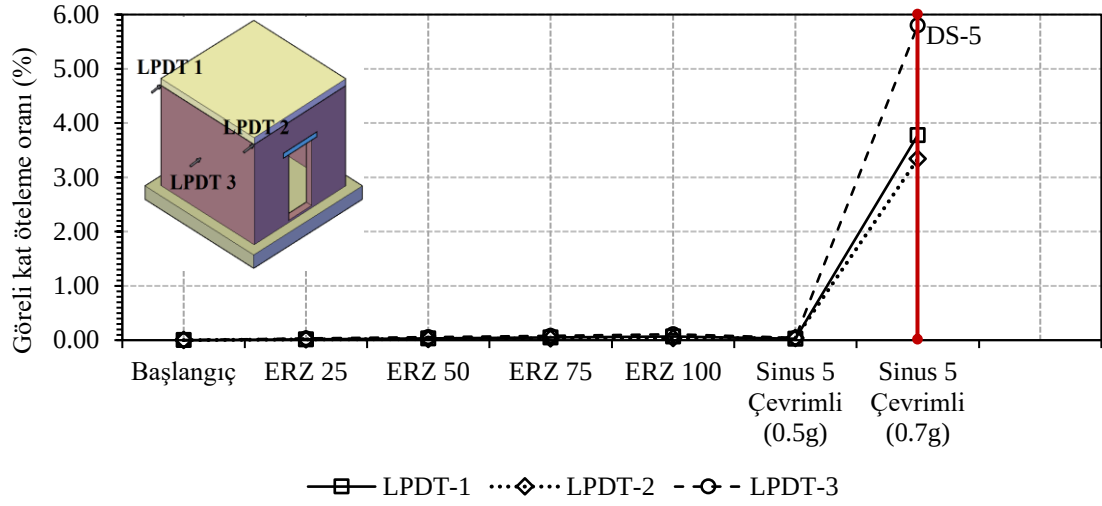
karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Yapısal tepkiler ve hasar arasındaki ilişki de tartışılmıştır.

Şekil 2.93, her bir sismik uyarım için maksimum görelî yer değıştirmelerdeki değışiklikleri göstermektedir. Bu amaçla deney numunesinin döşeme ve orta yüksekliğinde elde edilen görelî yer değıştirmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 2.86’da görüldüğü üzere GM-5 depreminden sonra yukarı yönlü görelî yer değıştirmeler hasarla birlikte artmaktadır. Şekil 2.94, sarsma masası deneylerinden sonra maksimum görelî yer değıştirmeler kullanılarak hesaplanan görelî kat öteleme oranlarının varyasyonunu göstermektedir. DS-5 tipinde hasara neden olan sismik uyarımlar için maksimum IDR %5.8 olarak elde edilmiştir.

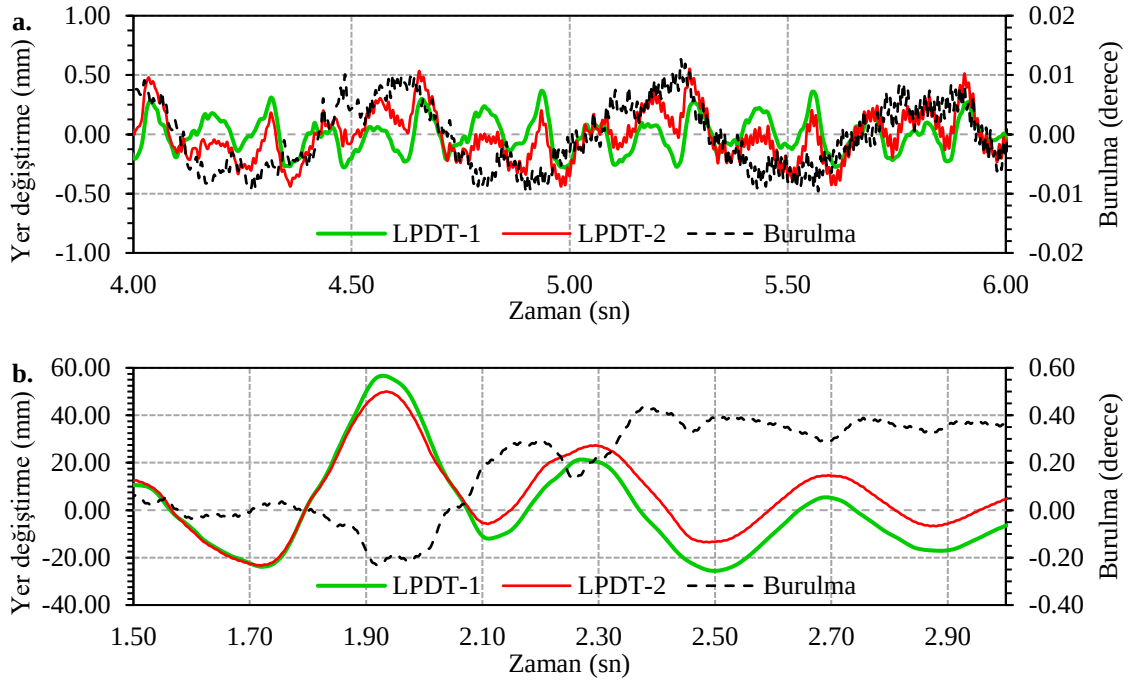
Deney numunesinde kuzeye ve güneye bakan duvarların açıklık alanları birbirinden farklı tasarlanmıştır. Kuzeye bakan duvar için  $0.45\text{m}^2$  ve güneye bakan duvar için  $0.25\text{m}^2$ ’lik açıklık alanları vardır. Bu durum, duvarların düzlem içi rijitliğini etkiledi. Bu nedenle, kuzeye ve güneye bakan duvarlar olarak döşemenin köşelerinde yakalanan görelî yer değıştirmeler arasında farklılıklar vardı ve deney numunesi belirgin burulma tepkilerine sahipti. Bu farklar hasar gerçekleşmeden öncesi için %42 ye kadar çıkmıştır. Burulma tepkilerinin farkı, ön deney numunesine göre daha düşük çıkmıştır çünkü kuzey ve güney duvarında da kesme adımlı diyagonal çatlağı oluşmuştur. Ayrıntılı bir açıklama için, DS-5 tipinin hasar durumlarının gözlemlendiği sismik uyarım sırasında döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değıştirmelerin zaman tanım alanında Şekil 2.95’te verilmiştir.



Şekil 2.93. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değıştirmelerin değışimi



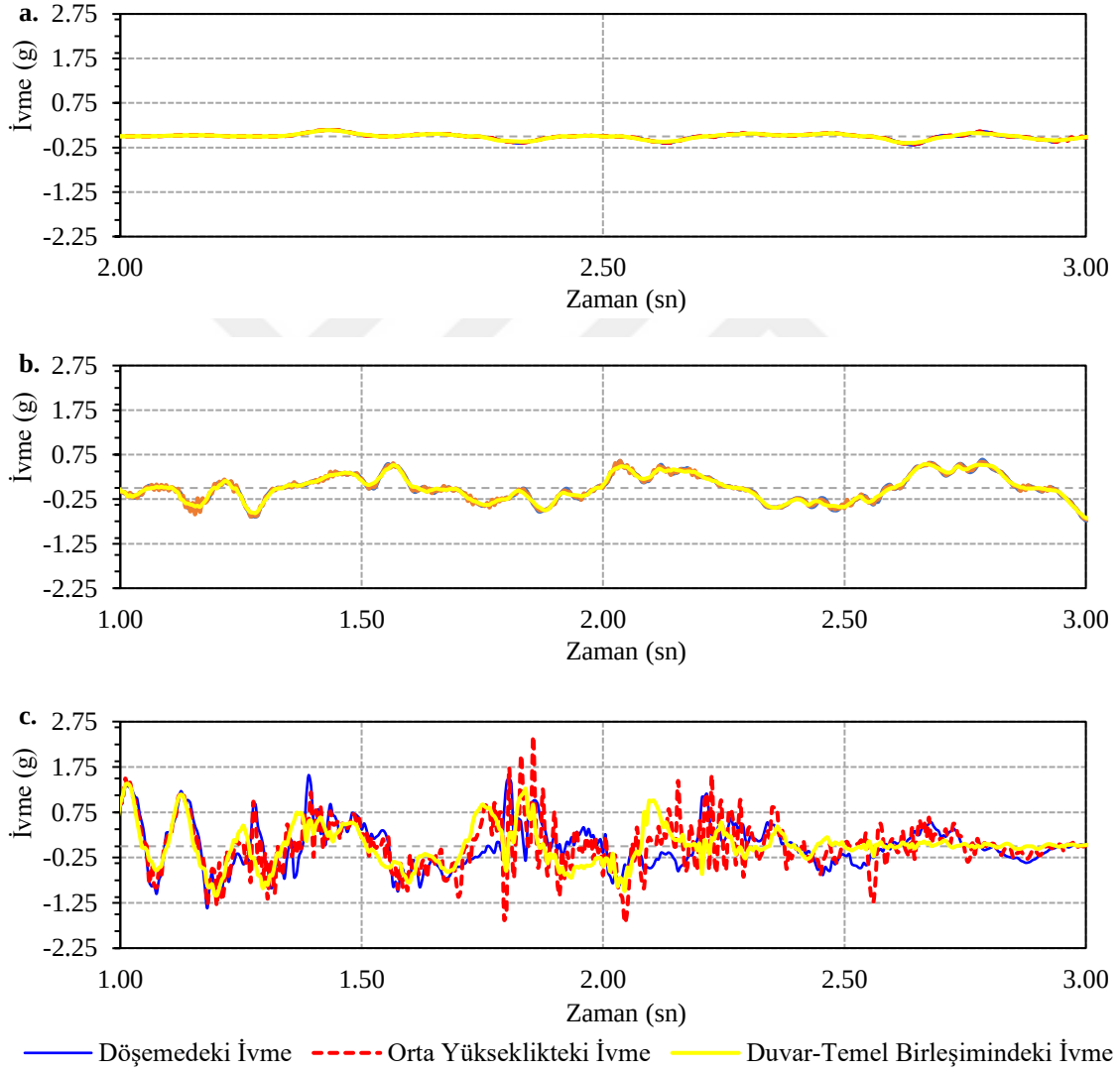
Şekil 2.94. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değişimi



Şekil 2.95. Döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g))

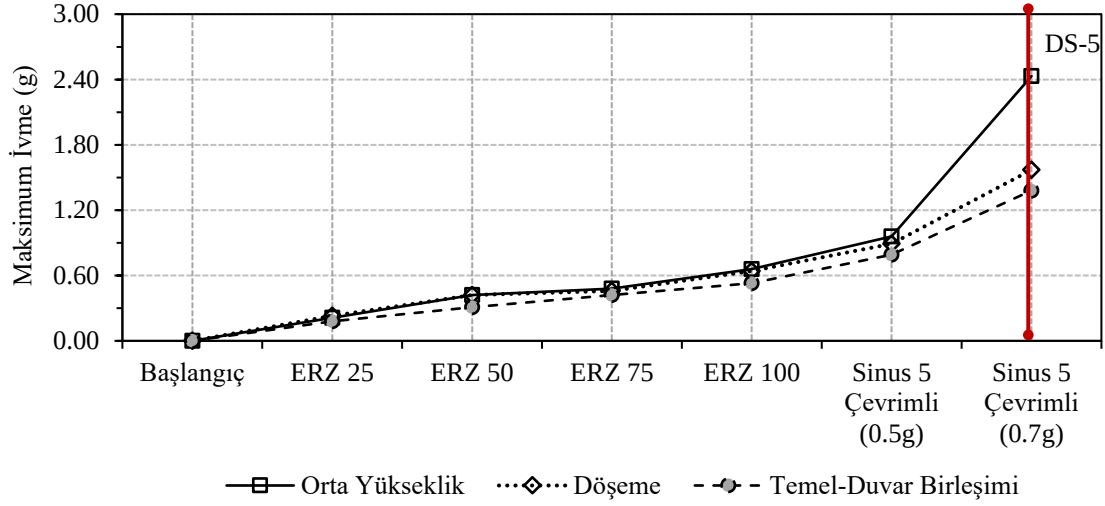
Sarsma masası deneyleri sırasında, ivmeölçerlerden elde edilen sinyal verileri arasındaki atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başladığının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu amaçla, GM-5 ve DS-5 tipinin gerçekleştiği GM-6 sismik uyarımı için gerçekleşen hasar durumlarının gözlemlendiği sarsma masası deneyleri için

duvar-temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotlarındaki ivme tepkileri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir (Şekil 2.96). Hasar gerçekleşmediği GM-5 sinüs dalgası ( $PGA=0.5g$ )'nın ivme-zaman kayıtlarının uyum içinde olduğu ve sinyal verileri arasında faz kayması ve sıçrama olmadığı görüldü. Şekil 2.96c, hasarın oluşmasıyla birlikte orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ivme tepkileri arasında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koydu. Bununla birlikte, çatlak genişlikleri santimetre mertebesine ulaşılmıştır.



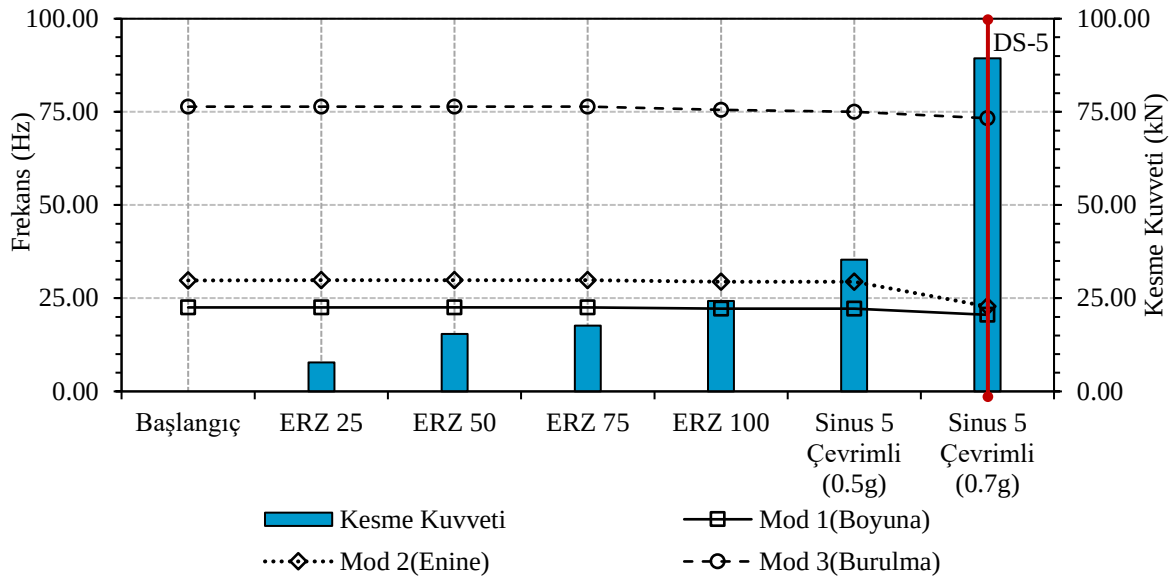
Şekil 2.96. Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotundaki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,; (a) GM-1 ERZ-25 Depremi için ( $PGA=0.13g$ ), (b) GM-5 beş çevrimli Sinüs Dalgası için ( $PGA=0.50g$ ) ve (c) GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası için ( $PGA=0.70g$ )

Test numunesinin temel-duvar birleşiminde, orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ölçülen maksimum ivme değerleri Şekil 2.97’de karşılaştırılmıştır. Ön deneyde belirtildiği gibi, hasarsız durumda elde edilen bu değerler arasında ihmal edilebilir farklılıklar olduğu, ancak maksimum ivmelerin artan hasarla uyumsuz hale geldiği görüldü.



Şekil 2.97. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi

Şekil 2.98, uygulanan sarsma masası sekansı sırasında taban kesme kuvvetlerindeki değişiklikleri özetler. Taban kesme kuvvetleri döşeme seviyesine yerleştirilen her bir ivmeölçerin etki alanına ait kütle ile o ivmeölçerden elde edilen ivmelerin çarpımından elde edilen değerler toplanarak elde edilmiştir. Toplam kütle 3.750 ton olup, duvarların yarısı, betonarme döşeme ağırlıklarının ve ilave kütle toplamı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları, doğal ivme kayıtları ile yapılan testlerde taban kesme kuvvetlerinin benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekanslar azalmıştır. 89.4 kN taban kesme kuvvetine neden olan GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.7 g) ile yapılan deneyde, kesme adımlı diyagonal çatlaklar oluşarak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve numuneler en yüksek frekanslı büzülmeye maruz kalmıştır.



Şekil 2.98. Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri

## 2.4. Gaz Beton Modeli

Bu deney kapsamında,  $\frac{1}{2}$  ölçekli tuğla ve bims modelin planında ve boyutlarında laboratuvar ortamında gaz beton malzeme ile aynı ölçülerde model inşa edilmiştir. Her model çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki modelin hasarsız durumları için DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin bulunması. İkinci aşama ise sarsma masası deneyleri. Son aşama ise her sismik uyarım öncesi ve sonrası DMA yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi.

### 2.4.1. Modelin Geometrik Özellikleri ve İnşa Aşamaları

Deney modeli, profesyonel duvar ustaları tarafından  $\frac{1}{2}$  ölçekli olarak laboratuvarda üretilmiştir. İmalat aşaması tuğla ve bims modeldeki sıralama ve şekilde yapılmıştır. Öncelikle temelde bir kare olan modelin temeli üretildi. Daha sonra duvarlar ve döşeme tamamlandı. Duvarların kalınlığı 10 cm'dir. Temele konulan 16 mm'lik demir kancalar yardımıyla model inşasından sonra sarsma masasına taşındı. Duvarlar, sabit sınır koşulunu temsil etmek için temele 2-3 cm olacak şekilde gömülmüştür (Şekil 2.7). Hazır beton santrallerinden temin edilen beton ile temel betonu dökülmüştür. Döküm esnasında küp ve silindir numuneler malzeme deneyi için alınmıştır. Daha önceki bölümlerde temel kalıp hazırlanması ve temel beton dökümüne ait görseller verilmiştir. Beton dökümünden 28 gün sonra gaz beton yığma duvar imalatına geçilmiştir. Gaz beton üretici firmadan temin edilen G4-600 tipi taşıyıcı özellikteki 10 cm kalınlıktaki birim elemanlar yarım ölçekli olacak şekilde laboratuvar ortamında kesilmiştir. Bu kesim işleri ile alakalı görseller Şekil 2.99'da verilmiştir. Kesilen ve duvar imalatına hazırlanan duvar birim elemanlar ile 1800x1800x1500mm ölçülerinde tek açıklıklı ve tek katlı yığma model duvarı üretilmiştir. Kuzey ve güney duvarlarında sırasıyla kapı ve pencere boşlukları bulunmaktadır. Bir kat yüksekliği boyunca 12 sıra gaz beton kullanılmıştır. Bağlayıcı eleman olan harç için ise çimento esaslı gaz beton örgü harcı kullanılmıştır. Örgü harcı hazırlanma talimatında verilen 25 kg harç için 5.5-6 litre su karıştırılmıştır. Gaz beton taraklı malası ile yapıştırma harcı uygulanmıştır. Birim elemanların yerleştirildiği ilk sıra temele gömülmesi için temel yüzeyinde hazırlanan yuvaya ilk gaz beton elemanlar yerleştirilmiştir ve beton ile temele gömülmüştür. Şekil 2.100'de duvar üretimine ait ayrıntılı görseller sunulmuştur.



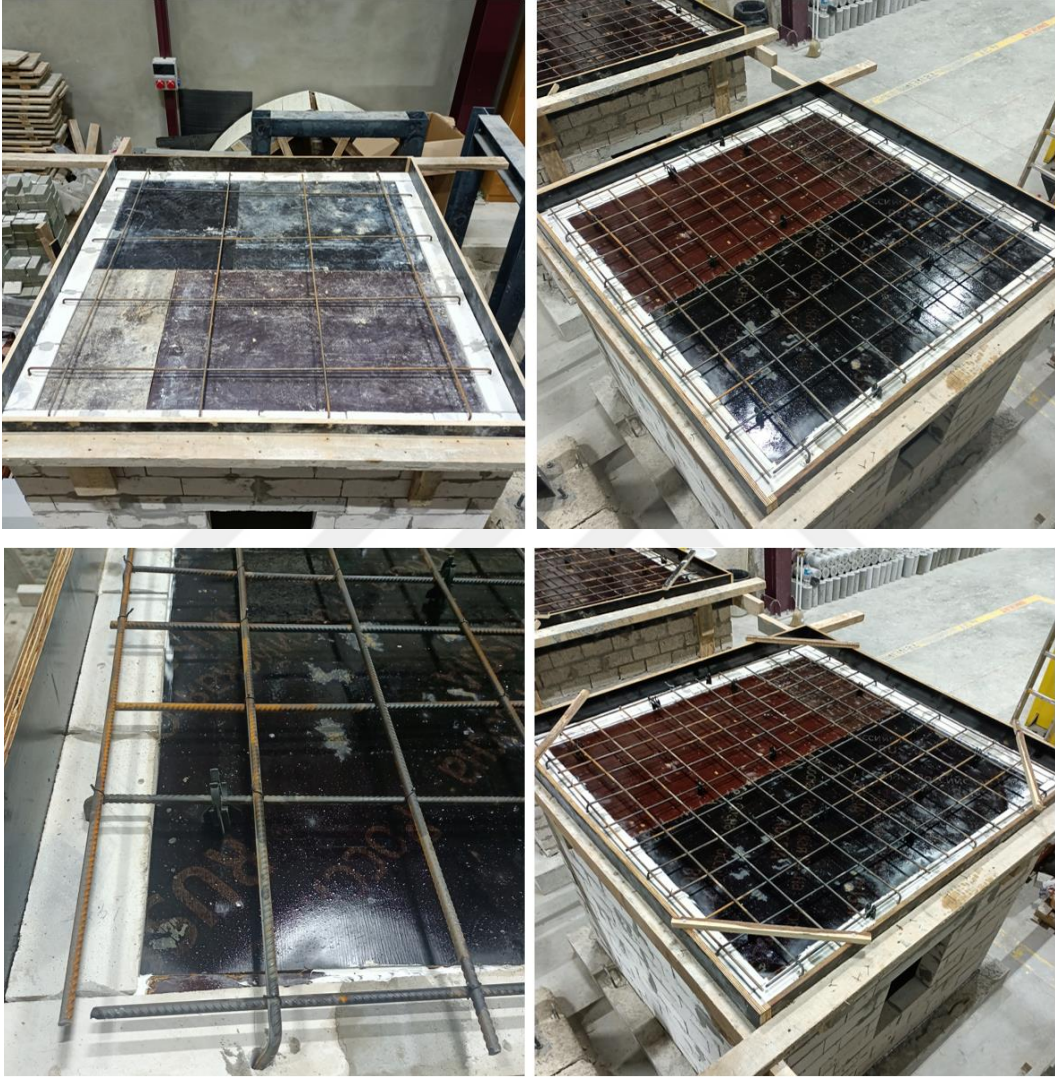
Şekil 2.99. Gaz beton kesimine ait görüşler



Şekil 2.100. Gaz beton duvar üretimi

Taşıyıcı duvar imalatından 7 gün sonra döşeme kalıp çalışmalarına başlanmıştır. Model içine düzgün bir şekilde yerleştirilen 5x10 cm'lik dikmeler ile döşeme kalıbı sabit tutulmuştur. Döşeme kalıbı hazırlığı bittikten sonra döşeme yüzeyi düzgün ve pürüzsüz olması için yağlanmıştır. Döşeme kalıbı imalatına ait görseller daha önceki bölümde bulunan Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu tez kapsamında hatıl imalatı yapılmadığı için döşemenin duvardan kesme/kayma durumunu minimize etmek için 8 adet 8 mm'lik donatılar 50 cm ara

ile en üst duvar birim sırasına matkap yardımıyla yerleştirilmiştir. Kenarlardan 5cm paspayı bırakılarak çift yönlü olmak üzere toplamda 24 adet 8 mm'lik boyuna donatılar kalıp içine yerleştirilmiştir. Döşeme donatı çalışması tamamlanmış modele ait resimler Şekil 2.101'de verilmektedir. Şekil 2.102'de ise inşası tamamlanmış gaz beton modele ait resim verilmiştir.



Şekil 2.101. Döşeme donatı uygulaması



Şekil 2.102. Gaz beton model

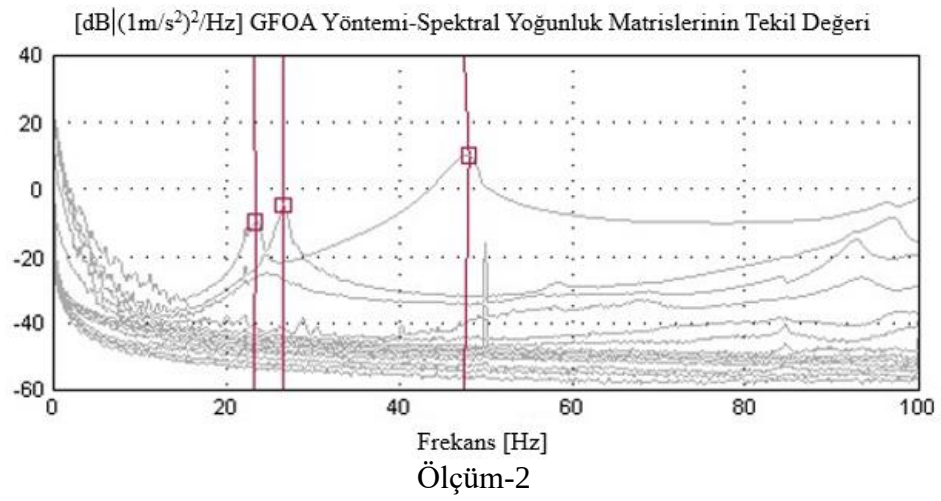
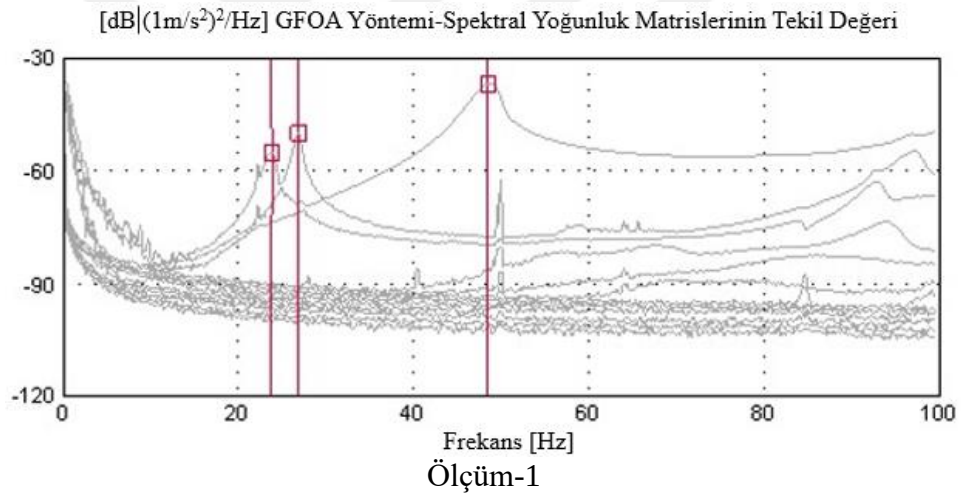
#### 2.4.2. Binanın Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Gaz beton model dayanımını kazandıktan sonra hasarsız dinamik karakteristiklerini elde etmek için DMA yöntemi uygulanmış ve dinamik parametreler (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar modellerinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için kullanılan DMA yönteminde 2.2.1.2. bölümünde anlatılan ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yine aynı bölümde anlatılan yöntemler ve ölçüm prosedürü uygulanmıştır. Tüm bu ölçümlere ait PULSE yazılımında oluşturulan model ve ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 2.13'te şematik olarak verilmiştir. Ölçümlerin alınmasına ait görsel ise Şekil 2.103'te verilmiştir. Hasarsız durum için alınan dinamik karakteristikler sarsma masasına yerleştirilmeden yerde alınan ölçümlere aittir. Gaz beton model binanın OMA deneylerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması ile elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin grafiği 3 ölçüm içinde şekil 2.104'te verilmiştir. Gaz beton model için elde edilen ilk üç mod şekli şekil 2.105'te verilmiştir.

Gaz beton model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.37'de verilmektedir. Tablo 2.37 incelendiğinde gaz beton model için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla ölçüm-1 için 23.71-48.45 Hz ve %1.652-2.43 arasındadır. Ölçüm-2 için ise doğal frekans ve sönüm oranı 23.37-47.53 Hz ve %1.728-2.552 arasında elde edilmiştir. Ölçüm-3 için ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 24.04-47.68 Hz ve %1.871-2.529 arasında olduğu görülmektedir.

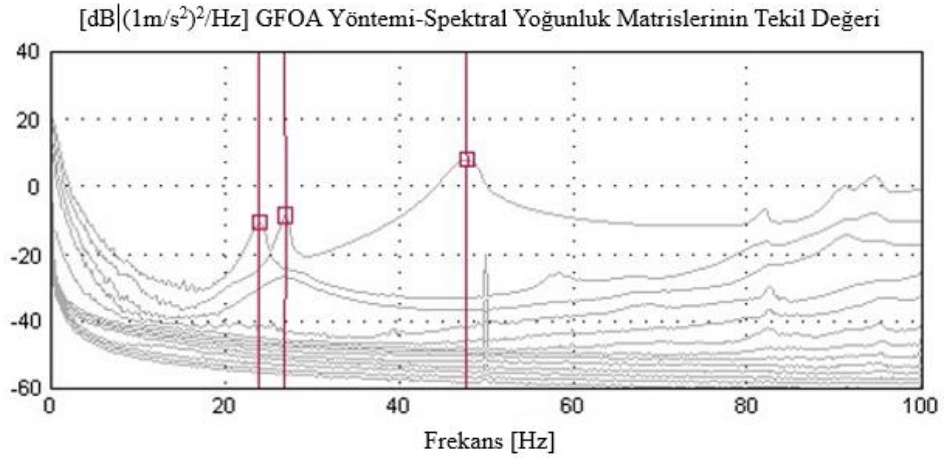


Şekil 2.103. DMA ölçümlerine ait görsel

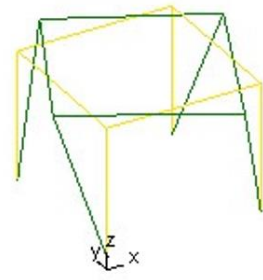
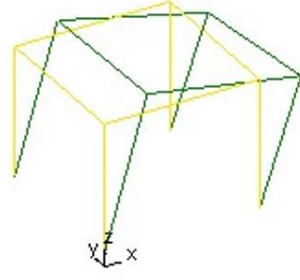
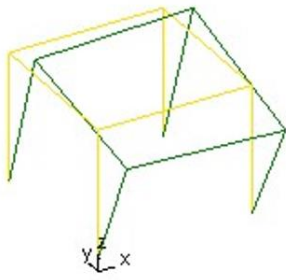


Şekil 2.104. Gaz beton model için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

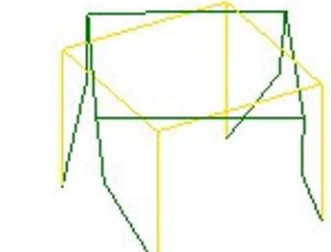
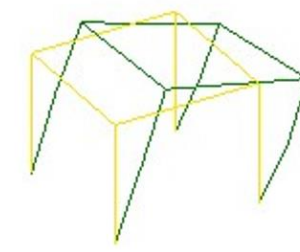
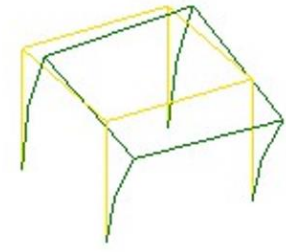
Şekil 2.104'ün devamı



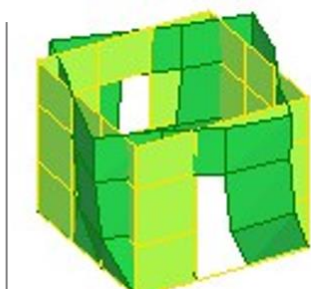
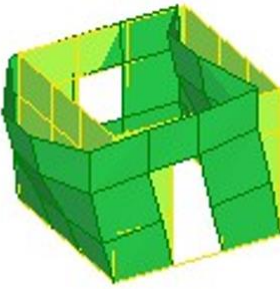
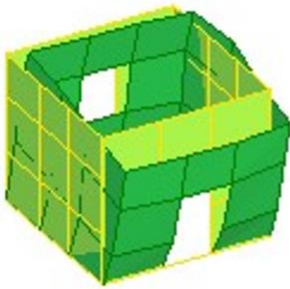
Ölçüm-3



Ölçüm-1



Ölçüm-2



Ölçüm-3

Şekil 2.105. Gaz beton modelin GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.37. Gaz beton model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız durum dinamik karakteristikler

| Mod No.    | Ölçüm-1      |                 | Ölçüm-2      |                 | Ölçüm-3      |                 |
|------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|            | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) | Frekans (Hz) | Sönüm oranı (%) |
| 1(Boyuna)  | 23.71        | 2.005           | 23.37        | 2.552           | 24.04        | 2.122           |
| 2(Enine)   | 26.78        | 1.652           | 26.67        | 1.728           | 26.93        | 1.871           |
| 3(Burulma) | 48.45        | 2.43            | 47.53        | 2.42            | 47.68        | 2.529           |

### 2.4.3. Sarsma Masası Deneyleri

Bu bölümde, ölçekli gaz beton binanın deprem davranışının incelenebilmesi amacıyla sarsma masası deneyleri uygulanmıştır ve çıktılar işlenerek yapısal tepkiler verilmektedir. Sarsma masası deneylerinde uygulanan sismik uyarılar, gerçek deprem kayıtları veya yapay uyarılar olabilir. Sismik uyarılmaların yapılarda ve yapı elemanlarında neden olduğu iç kuvvetler ve deformasyonlar sarsma masası deneylerinde doğru bir şekilde belirlenebilir. İnşa edilen test modelinin yapısal performansı ve hasar durumları, artımlı yer hareketleri dikkate alınarak tek eksenli bir sarsma masası kullanılarak belirlenmiştir. Farklı hasar durumlarını elde etmek için seçilen sismik uyarılar yapıya artımlı olarak uygulanmıştır. Altı farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir. Yer hareketi verileri için geçmiş depremlerden ve sinüs dalgalarından elde edilen kayıtlar kullanılmıştır.

Bu çalışmada tuğla ve bims modelde olduğu gibi deneyler sırasında her bir kata ilave kütleler eklenmemiştir. Tuğla modelin sarsma masası deneylerinde olduğu gibi Erzincan depreminin ölçeklendirilmiş 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artımlı olarak uygulandı. Daha sonra hasar durumuna göre üç adet 0.5g, 0.7 g ve 0.8 g büyüklüklerinde sinüs dalgasının uygulanması ile yedi farklı yükleme koşulu için dinamik test gerçekleştirilmiştir.

#### 2.4.3.1. Sarsma Masası Deney Kurulumu

Laboratuvar zemininde inşa edilen deney modeli daha sonra düz bir polyester kaldırma askısı ve tek kirişli bir gezer vinç kullanılarak sarsma masasına taşınmıştır. 16 adet M20 tij ile model sarsma masasına sabitlenmiştir. Mükemmel bir şekilde sabitlenmiş bir model

sağlamak için model, her biri modelin hem doğu hem de batı tarafında ikişer adet açılı çelik köşebentler ile sabitlendi.

Sarsma masası deneyleri sırasında modelin genel ve lokal davranışını ölçmek için ivmeölçerler ve LPDT'ler kullanıldı. Ayrıca ölçüm sistemlerinden elde edilen yapısal tepkiler işlenerek hasarlarla ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla, uygulanan ve ölçülen sismik uyarımları karşılaştırmak için sarsma masasının rijit platformuna çift eksenli bir ivmeölçer sabitlenmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller arası atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başlangıcının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu nedenle, test numunesinin farklı bölgelerine birçok ivmeölçer yerleştirilmiştir. Batıya bakan duvarda düzlem dışı tepkiyi ölçmek için üç adet tek eksenli ivmeölçer kullanıldı. Test modelinin farklı yüksekliklerinde ve bölgelerinde düzlem içi ve düzlem dışı yapısal tepkileri izlemek için yedi adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirildi. Titreşim yönünde test numunesinin yüksekliği boyunca göreceli yer değiştirmeler ve kat ötelenme oranlarındaki değişiklikler dört adet LPDT ile izlendi. Bunlardan biri temel seviyesinde ve diğeri orta yükseklikte yerleştirilmiştir. Diğer ikisi çatı seviyesinde bulunuyordu. Sarsma masası deneyleri sırasında oluşabilecek olası burulma tepkileri de çatı hizasına yerleştirilmiş iki adet LPDT ile izlenmiştir. Şekil 2.45, ivmeölçerlerin ve LPDT'lerin düzenini göstermektedir. Gaz beton modeline ait deney düzeneğine ait resimler şekil 2.106'da verilmiştir.



Şekil 2.106. Gaz beton modeline ait deney düzeneği

Farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun artırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Test için Erzincan depremi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Sarsma masası testi için doğal yer hareketleri Erzincan depreminin %25 (PGA=0.13 g), %50 (PGA=0.25 g), %75 (PGA=0.37) ve %100 (PGA=0.50 g)'ü seçilmiştir. Ayrıca genliği 50 mm, frekansı 1.6 Hz ve büyüklüğü 0.5 g olan, genliği 25 mm, frekansı 2.7 Hz ve 0.7 g olan ve genliği 25 mm, frekansı 2.85 Hz ve 0.8 g olan sinüs dalgaları 5 döngülü dikkate alınarak uygulanmıştır.

Üretilen deney numuneleri ½ ölçekli olarak imal edildiği için seçilen ivme kayıtlarının da ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde anlatılan ölçeklendirme esasları dikkate alınmıştır. Önceki bölümlerde seçilen kayıtların ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri verilmiştir.

#### **2.4.3.2. Deney Sonuçları**

##### **2.4.3.2.1. Deney Sonrası Hasar Tespitleri**

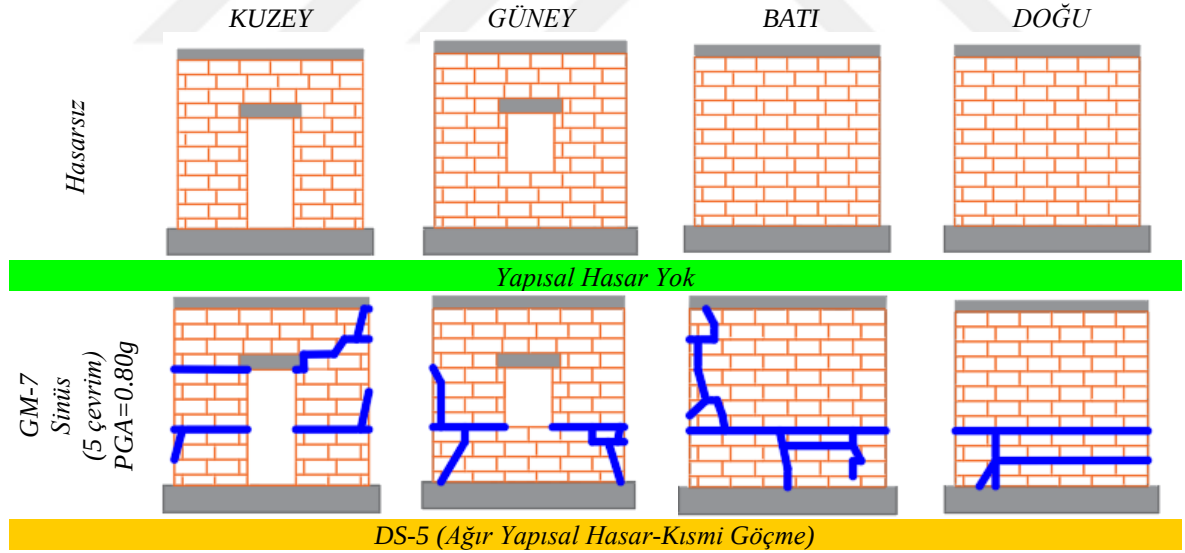
Her yer hareketinin sarsma masasına uygulanmasından sonra test numunesi görsel ve deneysel olarak incelenmiştir. Hasarın deneysel olarak gözlemlenebilmesi için test numunelerinin hasarsız (başlangıç) ve hasarlı durumları için modal parametreler, test öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim ölçümleri ile belirlenmiştir.

Ön deney numunesindeki hasarın niteliksel bir tanımı için, EMS-98 tanımlanan hasar sınıflandırması dikkate alınmıştır. Burada modelin gevrek bir davranış sergilemesi DS-5 tipi ağır yapısal hasar durumu gözlemlendi. Yani model aniden hasar alarak göçme durumuna geldi.

##### **2.4.3.2.2. Görsel Tespitler**

Şekil 2.107, hasarsız ve DS-5 hasar durumu için dış yüzlerden görüntülenen deney numunesinin çatlak ilerlemesini özetlemektedir. Mavi işaretler deney sırasında gözlemlenen çatlaklarla ilişkilendirilir. Sarsma masası deneyi sırasında Erzincan depremlerine (ERZ 25, ERZ 50, ERZ 75 ve ERZ 100) karşılık gelen ilk dört yer hareketinde görünür çatlaklar gözlemlenmedi. Daha sonra GM- 5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA= 0.5 g) ve GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA= 0.7 g) uygulandı ve hasar halen gözlemlenmedi. Fakat frekanslara belli oranlarda düşüşler bulunmaktadır. Altı adet sismik uyarım karşısında yorulan model,

GM-7 beş çevrimli sinüs dalgası ( $PGA = 0.8 \text{ g}$ ) uyarımı sırasında DS-1, DS-2, DS-3 ve DS-4 hasar durumlarını göstermeden aniden hasar alarak DS-5 tipi ağır yapısal hasar ve göçme durumuna geçti. Bu aşamada, doğu ve batı yönündeki duvarlardaki çatlakların önemli bir kısmı yataya yakındı ve temel seviyesine yakın gaz beton birimlerdeki kayma hareketinden kaynaklandı. Ayrıca düzlem içi deformasyon, kuzeye bakan duvarda kapının sağ üst köşesinden döşemeye kadar uzanan çapraz bir çatlağa neden olmuştur. Bu diyagonal çatlaklar tuğla modelin çatlak yayılımları gibi sadece harç yatağı derzleri boyunca oluşmamıştır. Dayanım olarak delikli tuğladan daha düşük bir dayanıma sahip olan gaz beton hasar almıştır. Düşey çatlakların çoğu gaz beton birimin çatlamasından meydana gelmiştir. Pencerenin alt seviyesindeki iki gaz beton sırasında binayı tam olarak çevreleyen kesme/kayma çatlakları gözlenmiştir. Test sonunda bu çatlak genişliklerinin santimetre mertebesinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapısal hasar DS-5 tipi olarak sınıflandırıldı. Hasarın DS-5'e ulaşması üzerine deney düzeneği üzerindeki ölçüm sistemleri (ivmeölçerler ve LPDT'ler) güvenlik amacıyla kaldırıldı. Şekil 2.108, dış yüzden bakıldığında DS-5 için test numunesinin hasar modelini göstermektedir.



Şekil 2.107. Test numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli.

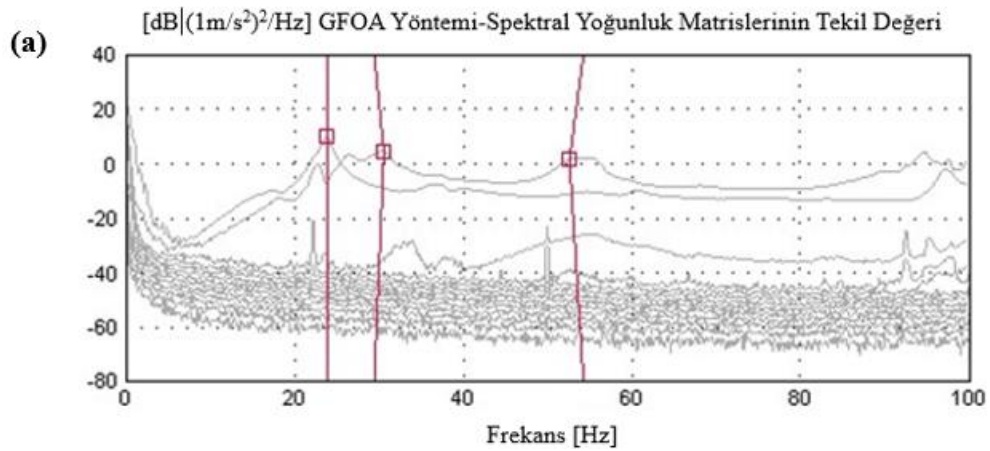


Şekil 2.108. DS-5 tipi hasar durumu için deney numunesinin dış yüzeyinin hasar modeli

#### 2.4.3.2.3. Çevresel Titreşime Dayalı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

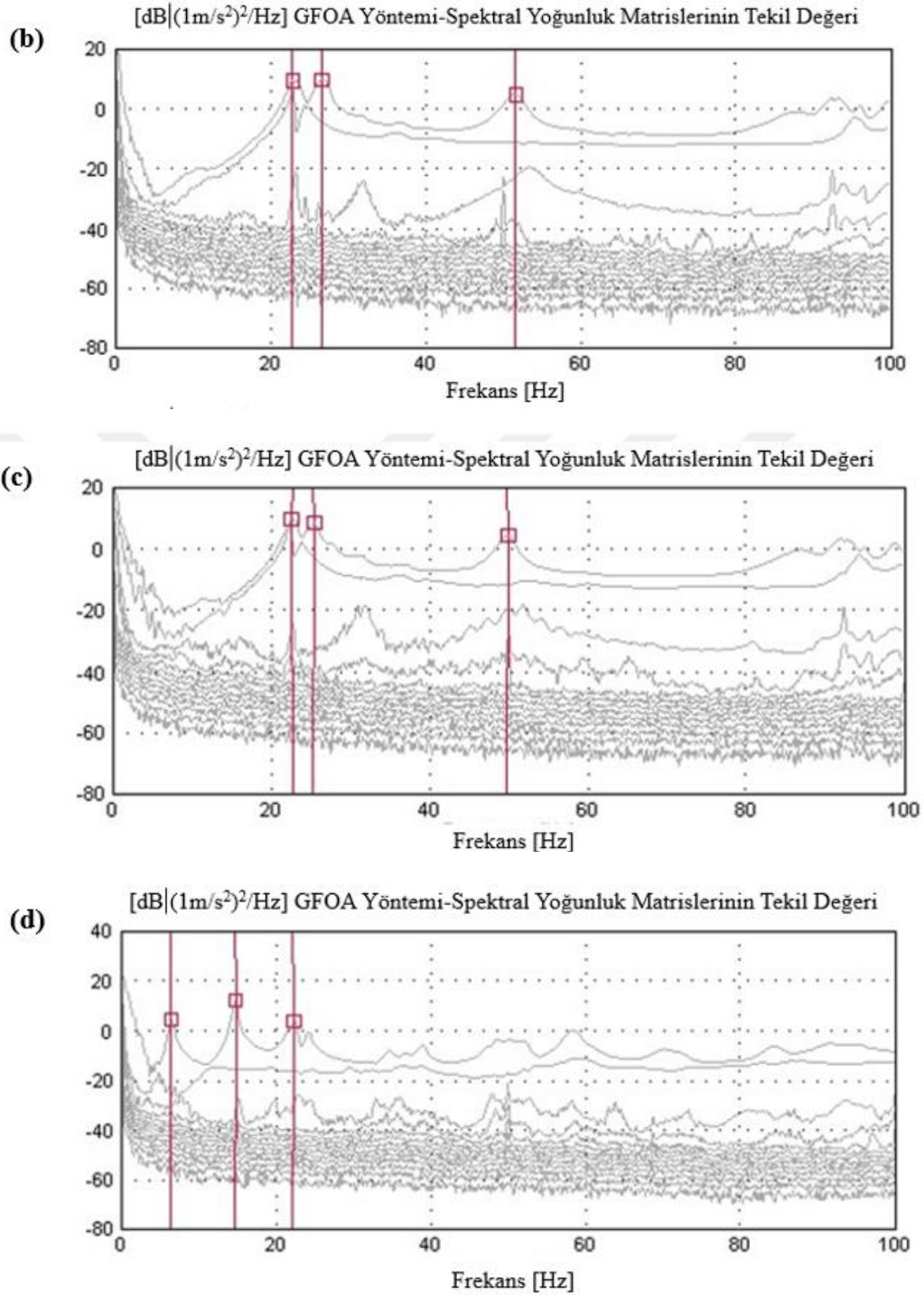
Bu çalışmada, görsel gözlemlere ek olarak, artımlı sarsma masası deneyleri sırasında oluşan hasar ile yığma yapının modal parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her sarsma masası deneyinden sonra ortam titreşim testleri yapılmış ve modal parametreler elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, hasar öncesi ölçümde dikkate alınan aynı ivmeölçer konumları ve ölçüm özellikleri kullanılarak tekrarlandı. Böylece elde edilen hasarsız ve hasarlı modal parametreler karşılaştırılarak hasarın modal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha önce verilen hasarsız modelin dinamik karakteristikleri yerde alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Fakat bu bölümde, model sarsma masasına yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır.

GFOA sonucunda ilk üç doğal frekans ve mod şekli için veri setinin Spektral Yoğunluk Matrislerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 2.109 (a), (b) ve (c), hasarsız modelin, GM-4 ve GM-6 sismik uyarım sonrası durumu için spektral yoğunluk matrislerinin grafiğini göstermektedir. Ayrıca DS-5 tipi için hasar durumlarının grafikleri şekil 2.109 (d)'de verilmiştir. Sarsma masasına yerleştirildikten sonraki hasarsız durum için ilk üç doğal frekans sırasıyla 23.82Hz, 29.46Hz ve 54.3Hz olarak elde edilmiştir. Binanın ilgili mod şekilleri boyuna, enine ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Hasarlı durum için ise ilk üç doğal frekansları boyuna mod için 14.81Hz, enine mod için 6.52Hz ve burulma modu için ise 22.18Hz elde edilmiştir. Hasarlı durum için enine ve boyuna mod şekli yer değiştirmiştir.

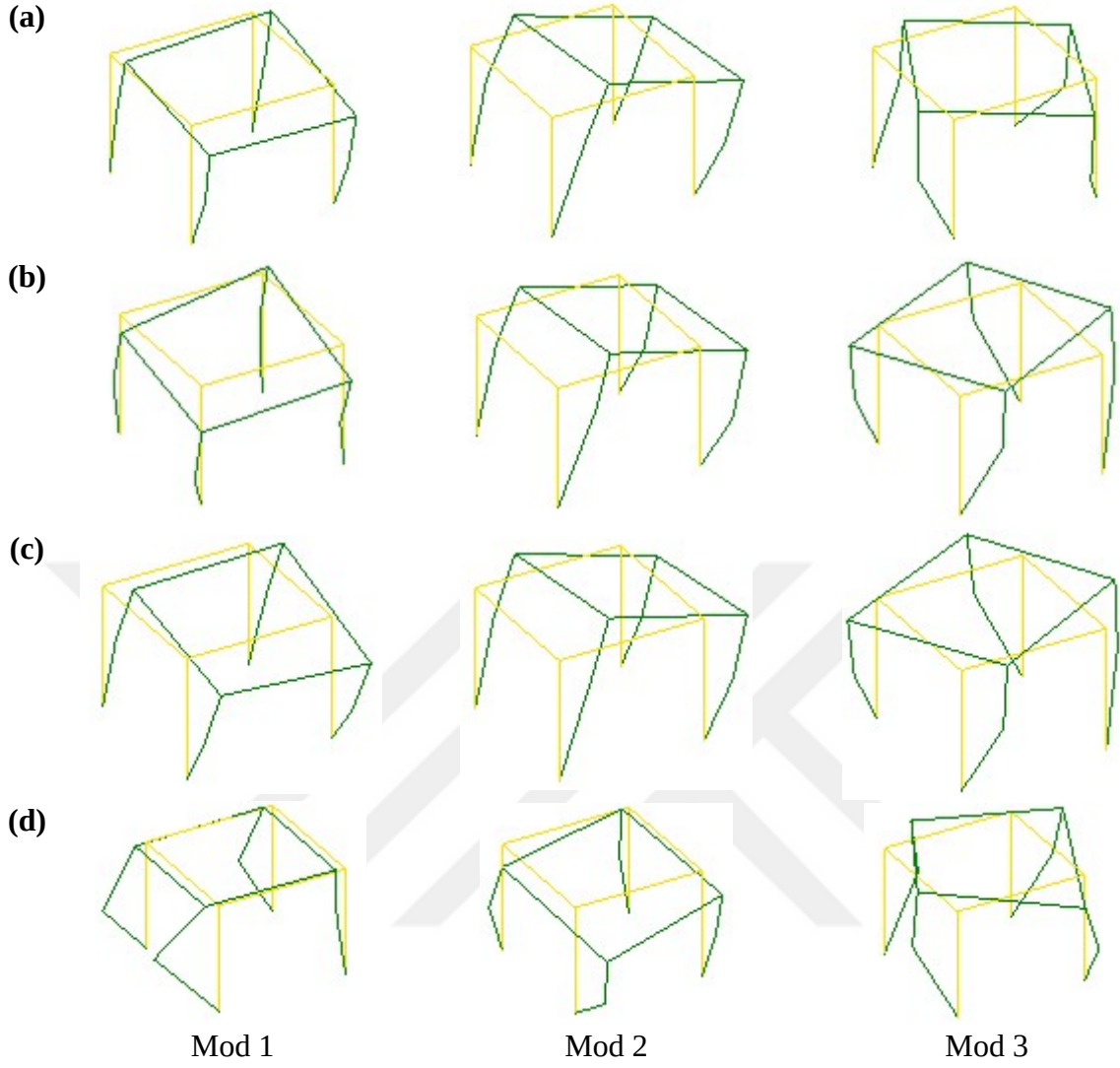


Şekil 2.109. Spektral yoğunluk matrislerinin grafiği: (a) Hasarsız durum için, (b) GM-4 (ERZ-100) için, (c) GM-6 (Sinüs dalgası 0.7 g) için ve (d) GM-7 (Sinüs dalgası 0.8 g)

Şekil 2.109'un devamı



Şekil 2.110, deney ölçümlerinden ve hasarlı durumda (DS-5 tipi) elde edilen ilk üç mod şeklini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Yapının mod şekillerinin yapısal hasar ile değiştiği sonucuna varılmıştır. Her modun genliğinin farklı salınım genliklerine sahip olduğu da belirtilmelidir.



Şekil 2.110. Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli: (a) Hasarsız durum için, (b) GM-4 (ERZ-100) için, (c) GM-6 (Sinüs dalgası 0.7 g) için ve (d) GM-7 (Sinüs dalgası 0.8 g)

Gaz beton model için GFOA yöntemine göre hesaplanan sarsma masası deneyleri öncesi ve sonrası için doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.38’de verilmektedir. Tablo 2.38 incelendiğinde gaz beton modelin sarsma masasındaki hasarsız durum için elde edilen ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla 23.82-54.3 Hz ve %1.304-9.243 arasındadır. Her sarsma masası testinden sonra görsel olarak hasarlar incelenmektedir. GM-6 yer hareketine kadar modelde bir hasar görünmemesine rağmen doğal frekanslarında düşüş gözlenmektedir. DS-5 hasar durumuna gelmeden önceki GM-6 yer hareketinden sonra ölçülen ilk üç doğal frekans (boyuna, enine ve burulma modu) ve sönüm oranı 22.76-49.78 Hz ve %1.732-2.803 arasındadır. DS-5 hasar durumunda ölçülen ilk üç doğal frekans ve

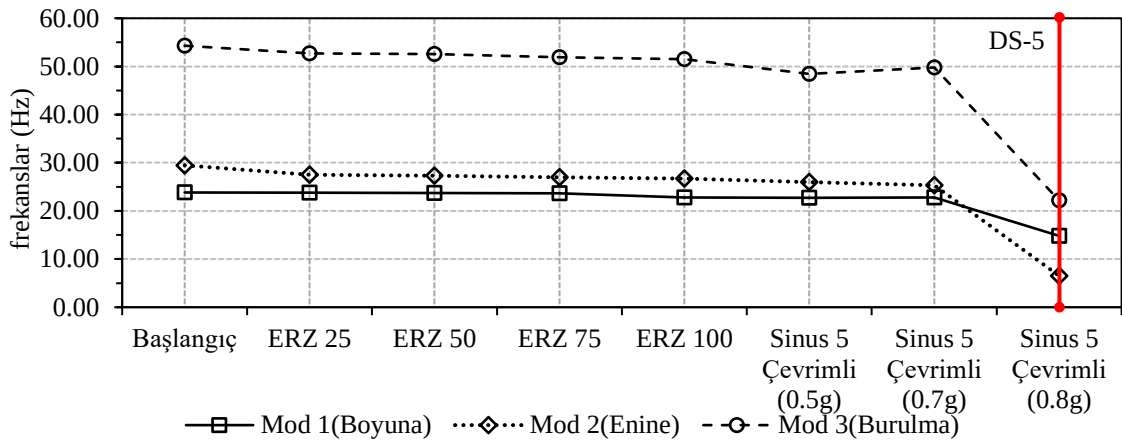
sönüm oranı sırasıyla 6.52-14.81 Hz ve %1.547-3.863 arasındadır. GM-7 sismik uyarımından sonra yapı DS-5 tipi hasar durumuna gelmiştir ve frekanslarda ciddi azalmalar gerçekleşti: azalma enine mod için %77.9, boyuna mod için %37.8 ve hasarsız duruma göre burulma modu için % 59 olarak hesaplandı.

Tablo 2.38. Gaz beton model için GFAO yöntemine göre elde edilen hasarsız ve hasarlı durum dinamik karakteristikler

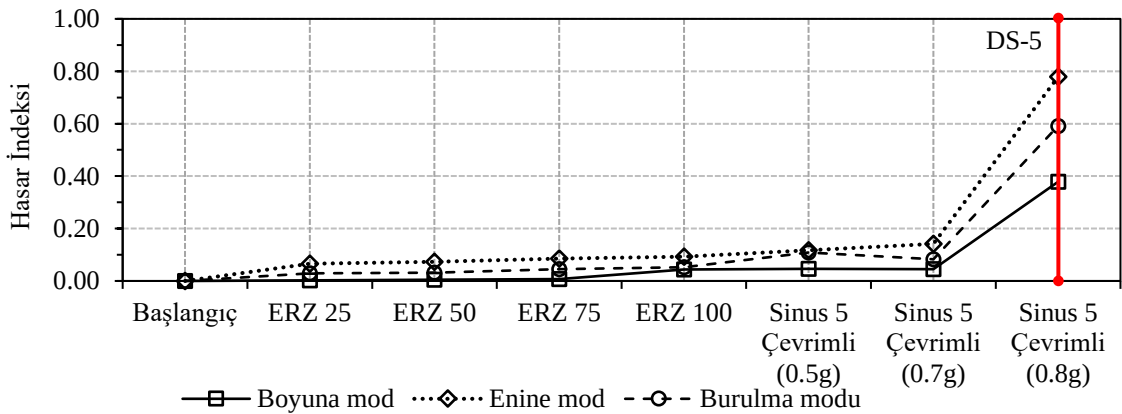
| Mod No.  | Frekans (Hz) |       |       | Sönüm oranı (%) |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|          | 1            | 2     | 3     | 1               | 2     | 3     |
| Hasarsız | 23.82        | 29.46 | 54.3  | 2.555           | 9.243 | 1.304 |
| GM-1     | 23.76        | 27.53 | 52.73 | 1.526           | 2.857 | 1.867 |
| GM-2     | 23.72        | 27.32 | 52.57 | 1.539           | 2.83  | 1.89  |
| GM-3     | 23.64        | 26.95 | 51.89 | 1.334           | 3.038 | 2.277 |
| GM-4     | 22.78        | 26.73 | 51.47 | 0.7933          | 3.072 | 2.098 |
| GM-5     | 22.73        | 26.01 | 48.42 | 1.99            | 2.485 | 1.819 |
| GM-6     | 22.76        | 25.30 | 49.78 | 2.442           | 2.803 | 1.732 |
| GM-7     | 6.52         | 14.81 | 22.18 | 3.863           | 1.547 | 2.377 |

Yapı elemanları hasara maruz kaldıklarında rijitlikleri azalır. Bu, yapının kütlesi ve rijitliği ile doğrudan ilişkili olan dinamik karakteristiklerinde önemli değişikliklere neden olur. Ayrıca rijitlik dağılımındaki değişiklikler mod şekillerinde kırılmalara yol açabilir. Dinamik karakteristiklerdeki bu değişiklikler, inşaat mühendisliği yapılarının yapısal bütünlüğünün değerlendirilmesi için çok önemli bilgiler sağlar. Yapısal hasar ve dinamik özellikler arasındaki ilişki, doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümleme oranları kullanılarak ele alınabilir. Salawu [222], uygulama kolaylığı nedeniyle yapısal bütünlüğün değerlendirilmesi ve yapısal durum izleme için doğal frekanslardaki değişimlerin kullanılmasının yararlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca birçok yapıda hasar, doğal frekans kaymaları ile ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle, deney numunesinin hasarsız ve hasarlı durumları için tanımlanan deneysel doğal frekansların gelişimi Şekil 2.111'de özetlenmiştir. Artımlı dinamik testler sonucunda, duvarların üst ve alt kısımlarında çok sayıda çapraz ve yataya yakın çatlaklar görsel olarak gözlemlendi. Yapısal rijitliği azaltan bu hasarların yapının tüm modlarında doğal frekanslarda düşüşlere neden olduğu görülmektedir. GM-1 (PGA=0.13g), GM-2 (PGA=0.25g), GM-3 (PGA= 0.37 g), GM-4 (PGA= 0.50 g), GM-5 (PGA= 0.5 g) ve GM-6 (PGA= 0.7 g) sismik uyarılar deney numunesinde görünür bir hasara neden olmadı ve bu nedenle doğal frekanslarda büyük bir değişiklik gözlenmedi. GM-7 beş

çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.80g) ile yapılan testte diyagonal çatlak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve yapısal hasar DS-5 tipi olarak sınıflandırılmıştır. Numuneler, DS-5 hasar durumuna ulaşıldığında en yüksek frekans düşüm oranına maruz kaldı. Sarsma deneyleri sonucunda kümülatif hasara bağlı olarak değişen DI değerinin formülü Denklem 1.3'e göre hesaplanmıştır. Hasar durumları için test numunesinin ilk üç doğal frekansına ilişkin DI, Şekil 2.112'de verilmiştir.



Şekil 2.111. Deney numunesindeki hasar durumlarına dayalı ilk üç doğal frekansındaki değişiklikler



Şekil 2.112. Hasar durumları için deney numunesinin ilk üç doğal frekansıyla ilgili DI

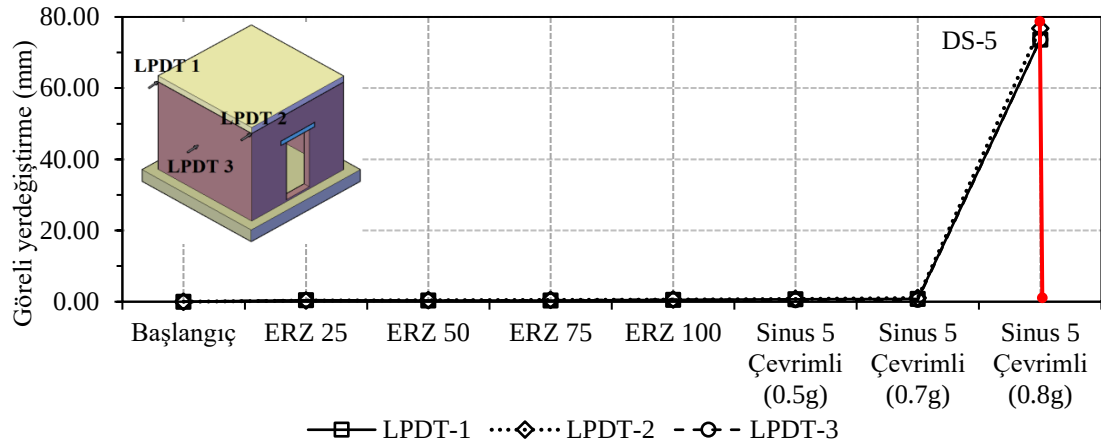
İlk üç sarsma masası deneyinden sonra doğal frekanslarda gözle görülür bir değişiklik olmadı. Bu nedenle DI değerlerinde önemsiz artışlar gözlemlendi ve bu görsel gözlemlerle uyumluydu. Yapının GM-5 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.50g) sonrasında DI değerleri 0.05-0.12 arasında belirlendi. GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.70g) ile

yapılan test sonrasında ulaşılan DI değerleri enine mod için 0.04, boyuna mod için 0.14 ve burulma modu için 0.08 olarak belirlendi. GM-7 beş çevrimli Sinüs Dalgası ( $PGA=0.80g$ ) ile yapılan test sonrasında ulaşılan DS-5'te DI değerleri 0.73-0.50 arasında belirlendi. Betonarme yapılar için DI'nın çeşitli limitleri önerilmiştir. Ancak, yığma binalarında her bir yapısal moda karşılık gelen hasarları ölçmek için DI eşik değerleri mevcut literatür incelemesinden elde edilememiştir. Bu nedenle DI değerleri, daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi bir dizi sarsma masası deneylerinden sonra elde edilen hasar durumlarını yığma binalarının temel titreşim periyoduyla ilişkilendiren önceki çalışmalar dikkate alınarak tartışılmıştır. Tomassetti ve ark. [205], tek katlı bir yığma binasını ele aldı ve test numunesinin başlangıçtaki ve DS-4 hasar durumundaki temel periyodunu sırasıyla 0,22s ve 0,26s (DI, 0,15 olarak hesaplandı) olarak tanımladı. Kallioras ve diğerleri [227], Miglietta ve ark. [218], tarafından yürütülen yığma binalarının sarsma masası deneylerinde DS-4 hasar durumu için DI değerleri 0,51 ve 0,32 idi. Görüldüğü gibi hem literatürden hem de bu çalışmadan elde edilen değerler arasında bir uyum bulunmamaktadır. Bu, seçilen malzeme özellikleri, dikkate alınan simülasyon yasaları ve uygulanan sismik uyarımlar gibi birçok nedenden kaynaklanabilir.

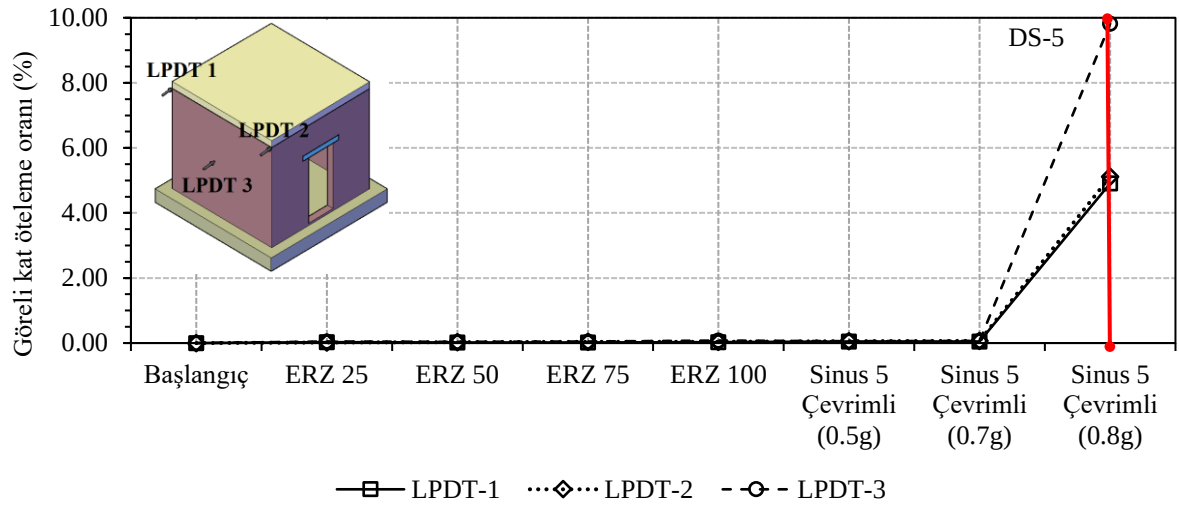
#### **2.4.3.2.4. Yapısal Tepkilerin Değerlendirilmesi**

Bu bölümde, ölçüm sistemlerinden elde edilen çıktılar işlenerek gaz beton model için deneysel yapısal tepkiler sunulmaktadır. Elde edilen deneysel çıktılar ışığında, her bir sismik uyarım için göreceli yer değiştirmeler, göreceli kat öteleme oranları (IDR) ve mutlak ivmeler karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Yapısal tepkiler ve hasar arasındaki ilişki de tartışılmıştır.

Şekil 2.113, her bir sismik uyarım için maksimum göreceli yer değiştirmelerdeki değişiklikleri göstermektedir. Bu amaçla deney numunesinin döşeme ve orta yüksekliğinde elde edilen göreceli yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 2.113'de görüldüğü üzere GM-6 depreminden sonra yukarı yönlü göreceli yer değiştirmeler hasarla birlikte artmaktadır. Şekil 2.114, sarsma masası deneylerinden sonra maksimum göreceli yer değiştirmeler kullanılarak hesaplanan göreceli kat öteleme oranlarının varyasyonunu göstermektedir. DS-5 tipinde hasara neden olan sismik uyarımlar için maksimum IDR %9.82 olarak elde edilmiştir.



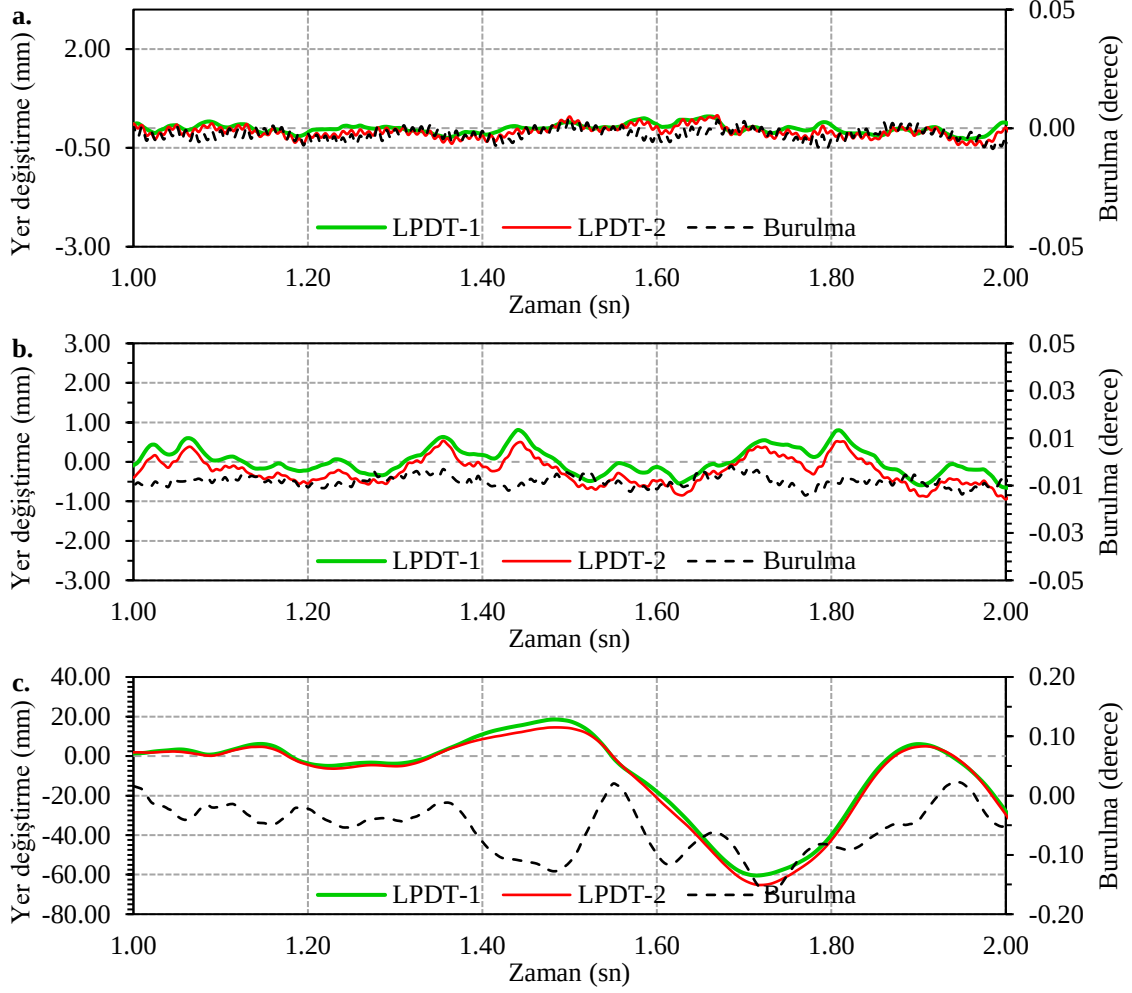
Şekil 2.113. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum görelî yer değıştirmelerin değışimi



Şekil 2.114. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum IDR'lerin değışimi

Deney numunesinde kuzeye ve güneye bakan duvarların açıklık alanları birbirinden farklı tasarlanmıştır. Kuzeye bakan duvar için  $0.45\text{m}^2$  ve güneye bakan duvar için  $0.25\text{m}^2$ 'lik açıklık alanları vardır. Bu durum, duvarların düzlem içi rijitliğini etkiledi. Bu nedenle, kuzeye ve güneye bakan duvarlar olarak döşemenin köşelerinde yakalanan görelî yer değıştirmeler arasında farklılıklar vardı ve deney numunesi belirgin burulma tepkilerine sahipti. Bu farklar hasar gerçekleşmeden öncesi için %29'a kadar çıkmıştır. Burulma tepkilerinin farkı, ön deney numunesine göre daha düşük çıkmıştır çünkü kuzey ve güney duvarında da kesme adımlı diyagonal çatlağı oluşmuştur. Ayrıntılı bir açıklama için, DS-5

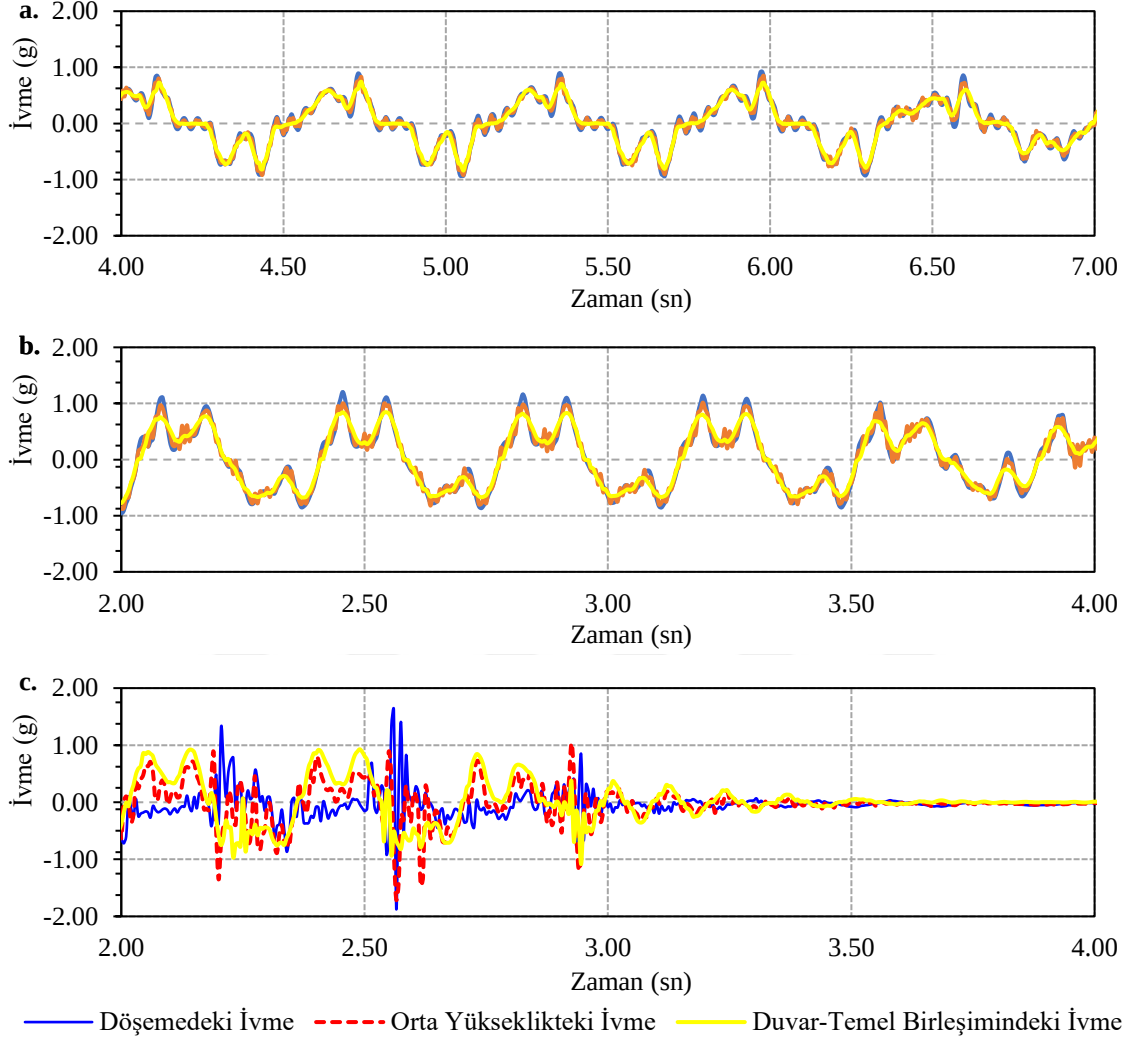
tipinin hasar durumlarının gözlemlendiği sismik uyarım sırasında döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmelerin zaman tanım alanında Şekil 2.115'te verilmiştir.



Şekil 2.115. Döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmeler ve burulmalar (a. GM-5 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.50g); b. GM-6 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g); c. GM-7 beş çevrimli sinüs dalgası (PGA= 0.80 g))

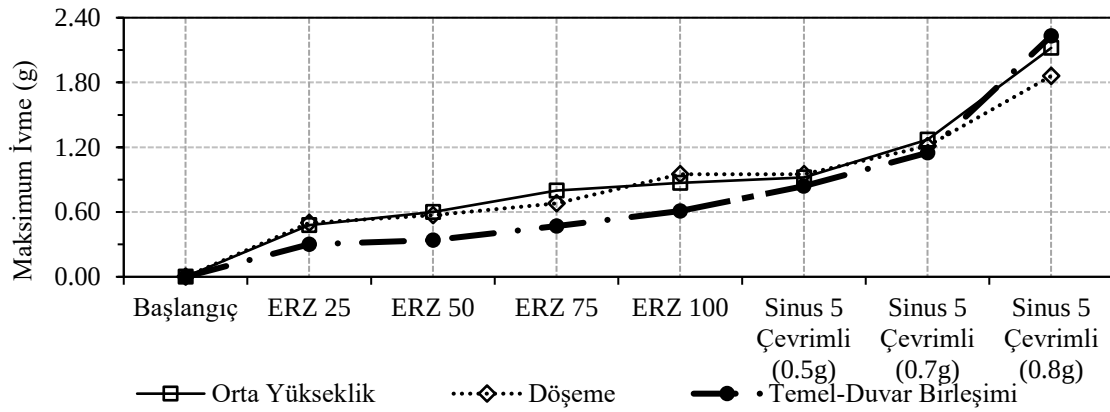
Sarsma masası deneyleri sırasında, ivmeölçerlerden elde edilen sinyal verileri arasındaki atlamalar ve faz kaymaları, yumuşama ve çatlak gelişiminin başladığının göstergesi olarak kullanılabilir. Bu amaçla, GM-5, GM-6 ve DS-5 tipi hasar durumunun gerçekteştiği GM-7 sismik uyarımı için gerçekteşen hasar durumlarının gözlemlendiği sarsma masası deneyleri için duvar-temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotlarındaki ivme tepkileri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir (Şekil 2.116). Hasar gerçekteşmediği GM-5 ve GM-6 sismik uyarımların ivme-zaman kayıtlarının uyum içinde olduğu ve sinyal verileri arasında faz kayması ve sıçrama olmadığı görüldü. Şekil 2.116c, hasarın oluşmasıyla birlikte

orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ivme tepkileri arasında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koydu. Bununla birlikte, çatlak genişlikleri santimetre mertebesine ulaşılmıştır.



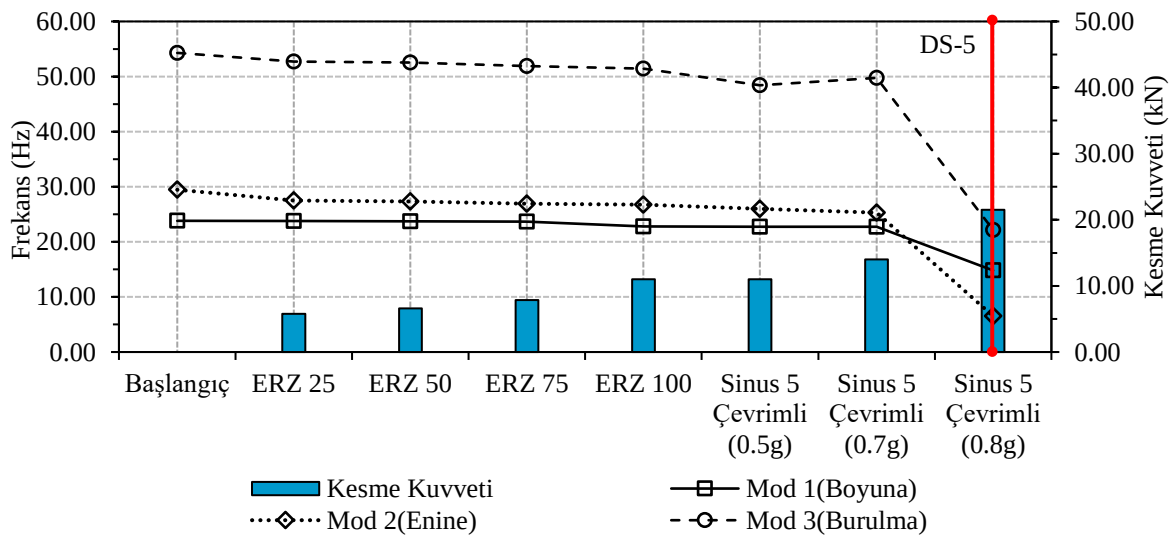
Şekil 2.116. Duvar-Temel birleşimi, orta yükseklik ve döşeme kotundaki ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım alanında ivme grafiği,: (a) GM-5 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.50g), (b) GM-6 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.70g) ve (c) GM-7 beş çevrimli Sinüs Dalgası için (PGA=0.80g))

Test numunesinin temel-duvar birleşiminde, orta yükseklikte ve döşeme kotlarında ölçülen maksimum ivme değerleri Şekil 2.117’de karşılaştırılmıştır. Önceki deneylerde belirtildiği gibi, hasarsız durumda elde edilen bu değerler arasında ihmal edilebilir farklılıklar olduğu, ancak maksimum ivmelerin artan hasarla uyumsuz hale geldiği görüldü.



Şekil 2.117. Sarsma masası deneylerinde ölçülen maksimum ivmelerin değişimi

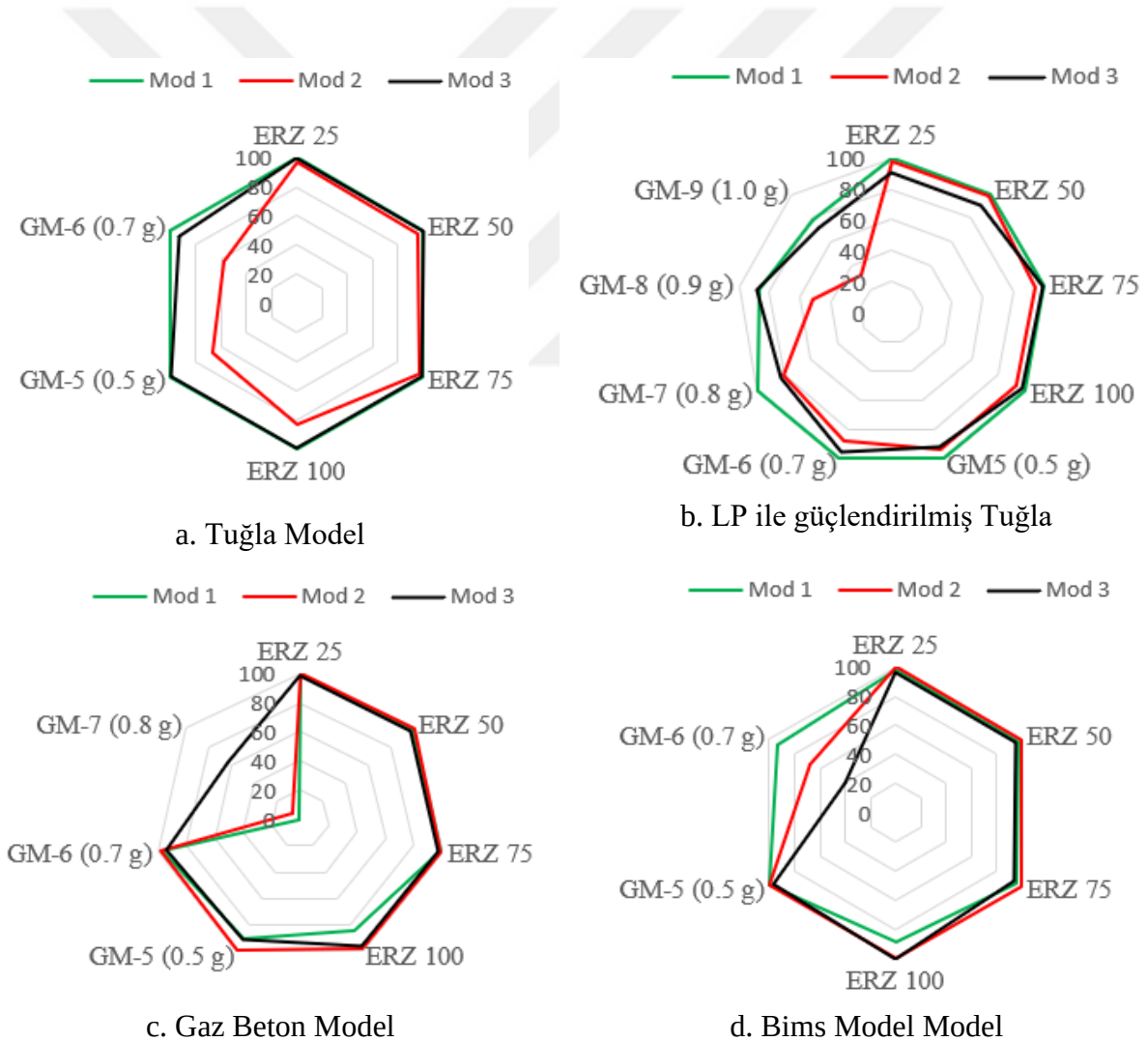
Şekil 2.118, uygulanan sarsma masası sekansı sırasında taban kesme kuvvetlerindeki değişiklikleri özetler. Taban kesme kuvvetleri döşeme seviyesine yerleştirilen her bir ivmeölçerin etki alanına ait kütle ile o ivmeölçerden elde edilen ivmelerin çarpımından elde edilen değerler toplanarak elde edilmiştir. Toplam kütle 1.180 ton olup, duvarların yarısı, betonarme döşeme ağırlıklarının toplamı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları, doğal ivme kayıtları ile yapılan testlerde taban kesme kuvvetlerinin benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan taban kesme kuvvetlerine bağlı olarak doğal frekanslar azalmıştır. 21.53 kN taban kesme kuvvetine neden olan GM-7 beş çevrimli Sinüs Dalgası (PGA=0.8 g) ile yapılan deneyde, kesme adımlı diyagonal çatlaklar oluşarak genişliği santimetre mertebesinde olmuş ve numuneler en yüksek frekanslı büzülmeye maruz kalmıştır.



Şekil 2.118. Sarsma masası deneylerinde kaydedilen taban kesme kuvvetleri

## 2.5. Modal Güvence Kriteri (MGK)'nin Hasarla Değişimi

MGK değerleri, mod şekillerindeki değişimleri dikkate alarak, mod şekillerinin benzerliklerini incelemek ve hasarların nasıl etkilediğini ortaya koymak amacıyla hesaplanmıştır. Denklem (1.9) kullanılarak hesaplanan MGK değerinin 1.00'e yakın olması durumunda, farklı durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliğin iyi olduğunu gösterir. Belirgin azalmalar ise hasarın varlığını gösterir ve değerin 0'a yaklaşması anlamına gelmektedir. Her bir yığma modelin hasarsız ve sarsma masası deneyleri sonrası hasarlı durumlarındaki mod şekilleri kıyaslanarak hesaplanan MGK değerlerinin, artan hasarla birlikte azalması gösterilmiştir ve Şekil 2.112'de sunulmuştur.



Şekil 2.119. Tüm modeller için MGK değerlerinin (%) artan hasar ile değişimi

Şekil 2.119 incelendiğinde ERZ-25, ERZ-50, ERZ-75 ve ERZ-100 Erzincan depremlerine kadar MGK değerlerinde önemli değişimler gözlenmemiştir. Fakat Erzincan depremlerinden sonra değişimler ve azalmalar hasarlarla birlikte önemli boyutlara ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 2.119, yer hareketi büyüklüğünün artmasıyla birlikte MGK değerlerinde belirgin bir düşüş olduğunu belirtmektedir. Gaz beton model ve Bims beton modelin MGK değerleri incelendiğinde daha rijit bir davranış sergilediği söylenebilir. Öyle ki iki numunede de son aşama olan sismik uyarımlarda hasar aldığı görülmüştür.



### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, sarsma masasındaki deneylerle birlikte, farklı yığma birim elemanlarla inşa edilmiş yığma modellerin davranışını belirlemek, sarsma masası deneyleri sonucu oluşan hasarların yapı performansına olan etkilerini deneysel olarak incelemek ve sismik uyarımların hasar etkilerini azaltmak ve yapıları tekrar kullanılabilir duruma getirmek için LP ile güçlendirme işlemi yapılmış ve bu yöntemin uygunluğunu araştırmak için amaçlanmıştır. Bu kapsamda, sarsma masasının kapasitesi ve laboratuvar imkanları dikkate alınarak, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında ön deney ile birlikte ikisi düşey delikli tuğla ve birer adet gaz beton ve bims betondan olmak üzere dört adet ½ ölçekli yığma model inşa edilmiştir.

Farklı yığma birim elemanlarından inşa edilmiş yığma yapıların dinamik davranışının incelendiği deneysel çalışmalar ön deney (düşey delikli tuğla model) ve asıl deneyler olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Yarı statik ve benzeşik dinamik testler göz önüne alındığında sarsma masası testleri süre olarak daha kısa, sismik uyarım esnasında herhangi bir müdahaleye izin vermemesi ve model üretimi bakımından dezavantajlı bir konumdadır. Fakat bu olumsuz yanını dikkate alarak ön deneyler ile hazırlık yapılabilir. Bu bölümde, yapıların farklı yığma birim elemanlarla inşa edilmiş yığma modellerin artımlı yer hareketlerine karşı nasıl tepki verdiklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerin öncesinde yapılacak hazırlıklar ve denetimlerin önemi vurgulanmaktadır. Bu nedenle, numune tasarımından sarsma masası deneylerine kadar olan tüm işlemlerin doğru bir şekilde yapılması çok önemlidir. Bu amaçla, öncelikle esas deneylerde kullanılacak deney düzeni, yer hareketi seçimi, ölçüm sistemi ve yapısal tepkilerin uygunluğunu değerlendirilmek üzere ön deney olarak sarsma masası deneyleri yapılmıştır. Ön deneylerde bir adet düşey delikli tuğla birim ile inşa edilmiş ½ ölçekli model kullanılmış ve sarsma masası deneyleri uygulanmıştır. Ön deney sonuçlarına göre ölçüm cihazlarında, sismik uyarımlarda ve deney düzeninde gerekli değişiklikler yapılarak asıl deneylere hazırlık yapılmıştır.

Asıl deneylerde, 3 adet farklı yığma birimlerle inşa edilen ½ ölçekli deney modeli kullanılarak artımlı yer hareketleri ile yapıların hasar durumları deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Başlangıçta düşey delikli tuğla model deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra bims ile inşa edilen model sarsma masası deneylerine tabi tutulmuştur. Tuğla ve bims model için ilave kütle kullanılmıştır. Son olarak ise gaz beton modeline sarsma masası deneyleri

uygulanmıştır. Ayrıca, düşey delikli tuğla modelin hasarlı durumu için LP malzeme ile güçlendirme uygulaması yapıldıktan sonra tekrar sarsma masası deneyleri ile dinamik karakteristikler incelenmiştir.

Ön deney sürecinde, farklı hasar durumlarını elde etmek için, kademeli olarak sismik uyarımların yoğunluğunun arttırılmasıyla artımlı sarsma masası deney dizisi oluşturulmuştur. Bu süreçte yoğunluk ölçüsü olarak PGA değerleri dikkate alınmıştır. Test için farklı PGA'ya sahip üç farklı doğal yer hareketi seçilmiştir. Ön deney numune sarsma masası testi için doğal yer hareketleri aşağıdakilerden oluşuyordu: (i) 1994 Northridge Depremi ivme kaydı ( $PGA=0.35g$ ), (ii) 1979 Coyote Lake Depremi'nden bir kayıt ( $PGA=0.42g$ ), (iii) 2004 Parkfield Depremi ivme kaydı ( $PGA=0.60g$ ). Ayrıca genliği 50mm, frekansı 2.00Hz ve 0.80g olan üç sinüs dalgası farklı döngüler dikkate alınarak uygulanmıştır.

Asıl deneyler sürecinde, 1992 yılında gerçekleşen Erzincan depreminin Doğu-Batı yönündeki ivme kaydı esas alınarak yapılmıştır. Kaydın farklı oranları olan 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katı deney esnasında uygulanmıştır. Ayrıca, numunelerdeki hasarın arttırılması hedefiyle sinüs dalgaları da ivme kaydı olarak kullanılmıştır. Sarsma masası testi için, Erzincan depreminden farklı olarak genliği 50 mm, frekansı 1.6 Hz 0.5 g sinüs dalgası 5 döngülü, genlikleri 25 mm olan frekansı 2.7 Hz 0.7 g, frekansı 2.85 Hz 0.8 g, frekansı 3.01 Hz 0.9 g ve frekansı 3.2 Hz 1.0 g sinüs dalgası 5 döngülü toplam 9 farklı yükleme koşulu uygulanmıştır. Bu sayede farklı boyutlardaki yer hareketlerinin etkisi üzerindeki yığma yapıların dinamik davranışı incelenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, sarsma masası deneyleri öncesi ve sonrası her numune için çevresel titreşim yöntemi ile deneysel modal analiz yapılmıştır. Tuğla ve bims model deneylerde, ilk olarak hasarsız durumdaki numuneler üzerine ilave kat kütleleri yüklendiği ve yüklenmediği her iki durum için gerçekleştirilmiştir. Sonra, numuneler sismik uyarımların yoğunluğunun arttırılmasıyla deney devam etmiştir. Her sarsma masası deney sonrası numunelerin dinamik karakteristikleri tanımlanmış ve hasarlı durumdaki numunelerin ilave kat kütleleri indirilerek tekrar çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Dinamik karakteristiklere dayalı olarak, frekans değişimleri ve mod şekillerindeki değişimler dikkate alan hasar tespit yöntemleri (MGK) kullanılmıştır.

Bu yapılan sarsma masası testleri, yığma yapıların dinamik karakteristiklerini anlamaya ve hasarları tespit etmeye fırsat sunmaktadır. Bu çalışma yığma yapıların dinamik davranışını inceleyen önceki çalışmaları onaylamakla kalmayıp, sarsma masası testlerinde

yoğun yer hareketlerine maruz kalan yığma yapıların tepkilerini de sunmaktadır. Yukarıda açıklanan deneysel çalışmalar sonucu, aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

➤ Deneysel Modal Analiz (DMA)

- Ön deney tuğla model için GFOA yöntemine göre hesaplanan hasarsız durumlar için doğal frekanslar yapılan üç farklı ölçüm için birbirine yakın çıkmıştır. Ölçüm-2 dikkate alındığında laboratuvar zemininde alınan ölçümlerde hasarsız durumdaki ilk üç doğal frekans 28.79, 33.14 ve 57.98 Hz olarak belirlendi. Ölçüm-2 için sönüm oranları ise sırasıyla 3.065, 3.637 ve 2.983 olarak belirlendi.
- Sarsma masasının numunelerin dinamik karakteristikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Sarsma masasına çıkarılan ön deney tuğla modelin hasarsız durumu için GFOA yöntemine göre hesaplanan doğal frekanslar 22.07, 27.49 ve 45.16 Hz olarak belirlendi. İlk üç doğal frekansları ilgilendiren mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak belirlendi. DS-2 ve DS-4 tipi hasar durumdaki ilk üç doğal frekans sırasıyla enine mod için 19.51Hz/16.69 Hz, boyuna mod için 27.06 Hz/26.46 Hz ve burulma modu için 38.28 Hz/38.11 Hz olarak belirlendi.
- Asıl deney tuğla model için ise laboratuvar zemininde iken alınan ölçümlerde hasarsız durum için ilk üç doğal frekans sırasıyla 38.29 Hz, 45.13 Hz ve 76.97 Hz olarak belirlendi. Farklı zamanlarda, farklı sıcaklıklarda ve farklı ustaların etkisi ile ön deney tuğla model ile asıl deney tuğla model frekansları aynı gelmemektedir. Sarsma masasına çıkarıldıktan sonra alınan ölçümler için hasarlı durumdaki (ilave kütsüz) doğal frekansların hasarsız durum (ilave kütsüz) doğal frekanslarına kıyasla enine mod için % 43.6, boyuna mod için % 4.8 ve burulma modu için % 37.3 düşüş elde edilmiştir. Aynı kıyaslamayı ilave kütleli yaptığımız zaman oran enine mod için % 7.6, boyuna mod için % 24.2 ve burulma modu için ise % 3.2 olarak elde edilmiştir. İlave kütleleri hasarlı tuğla yapıdan indirdiğimiz zaman birinci mod ile ikinci mod yer değiştirmektedir.
- LP ile güçlendirilmiş modelin laboratuvar zemininde iken alınan ölçümlerde hasarlı güçlendirilmemiş duruma göre ilk üç doğal frekansını sırasıyla %11.6, %10.9, ve %12.1 olarak iyileştirilmiştir. Sarsma masasına yerleştirilen LP ile güçlendirilmiş tuğla modelin hasarlı durumu (ilave kütsüz) için frekans değerleri hasarsız duruma (ilave kütsüz) kıyasla enine mod %45.7, boyuna mod için % 34.1 ve burulma modu için ise % 62.56 düşmüştür. İlave kütleli karşılaştırmada ise hasarsız duruma göre

hasarlı durumun frekans değerleri enine mod için %5.7, boyuna mod için %30.1 ve burulma modu için ise %1.2 düşüş göstermiştir.

- Bims modelin sarsma masası deneylerinin sonunda aldığı hasarlar doğrultusunda frekans değerleri hasarsız durumuna (ilave kütleli) göre enine mod için %23.5, boyuna mod için %8.8 ve burulma modu için ise %4.1 düşüş göstermiştir.
- Gaz beton model sarsma masasına yerleştirildikten sonrası için hasarsız durumun ilk üç doğal frekansı enine, boyuna ve burulma modu olarak sırasıyla 29.46 Hz, 23.82 Hz ve 54.3Hz olarak elde edilmiştir. DS-5 için hasar koşullarının doğal frekansı enine mod için 6.52 Hz, boyuna mod için 14.81 Hz ve burulma modları için 22.18 Hz olarak elde edildi. DS-5 tipi hasar durumuna ulaşan gaz beton model frekansları hasarsız duruma göre %77.9'a kadar düşmüştür. Ağır hasardan sonra mod şekillerinde belirgin bozulmalar ve enine ve boyuna mod şekilleri yer değiştirmiştir.

#### ➤ Sarsma Masası Deneyleri

- Tuğla model için 0.50g PGA'ya karşılık gelen GM-5 sinüs dalgasına sahip olan sismik uyarıma kadar, frekanslarda %13.9'luk düşüşlere rağmen herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Son testte GM-6 5 çevrimli sinüs dalgası (PGA=0.70g), duvarların üst kısmında kapı ve pencere boşluklarının köşelerinden başlayan ve döşemeye kadar uzanan diyagonal çatlaklar gözlemlenmiştir. Temel-duvar birleşiminin hemen üzerindeki ilk iki tuğlada ve lento kirişleri çevresinde de kesme çatlakları gözlenmiştir.
- Tuğla ile yoğunluklarının yakın olduğu bims modelde de benzer davranış gerçekleşmiştir. 0.50g PGA'ya karşılık gelen GM-5 sinüs dalgasına sahip olan sismik uyarıma kadar, frekanslarda belirgin bir değişim ve herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Son sismik uyarım olan 0.70g PGA'ya karşılık gelen GM-6 sinüs 5 çevrimli testte ağır hasar olarak DS-5 tipi hasar durumuna gelmiştir.
- Karbon takviyeli LP malzeme ile güçlendirilen tuğla model beklenildiği gibi deprem direncini arttırarak 9 adet sismik uyarım sonucu göçme durumu olan DS-5 tipi hasar durumuna gelmiştir. Hasar şekli ise sadece temel-duvar birleşim yerindeki ilk tuğlanın üzerinden kesme etkisi ile yatay şekilde hasar almıştır. O bölgedeki LP ise duvardan ayrılarak hasar almıştır.
- Tuğla ve bims modellerdeki yoğunluk ve ilave kat kütlesi gibi benzerliklerin olmasına karşın birim eleman basınç dayanımı farklılığı bims modelin daha şiddetli hasar almasına neden olmuştur.

- Tuğla modelde yığma birim elemanlarda hasar bulunmazken bims modeldeki yığma birim elemanlarda çatlaklar gözlemlenmiştir.
  - Gaz beton model için ön deney numunede olduğu gibi ilave kat kütleleri kullanılmamıştır. Gaz beton model 7 adet sismik uyarım sonucu DS-5 tipi hasar durumuna gelmiştir. Frekanslarda %14'lük düşüşlerin olmasına rağmen model yüzeyinde çatlak gözlenmemiştir. GM-7 (PGA=0.80 g) 5 çevrimli sinüs dalgası sonucu model çoğu yataya yakın hasar modeli olmak üzere ağır hasar ve göçme durumuna gelmiştir. Kapı boşluğunun batı yönünde lento girişinden döşemeye kadar uzanan diyagonal çatlak mevcuttur. Gaz beton modelde birim elemanlarda hasar almaktadır. Bu modelin ağırlığı diğer modellerin ağırlığının yaklaşık olarak üçte biridir.
  - Tuğla model deneylerinin sonunda gerçekleşen DS-4 tipi hasar durumu için DI değerleri enine mod için 0.08, boyuna mod için 0.24 ve burulma modu için ise 0.01 olarak elde edilmiştir.
  - LP ile güçlendirilmiş model için DI değerleri enine mod için 0.09, boyuna mod için 0.30 ve burulma modu için 0.04 olarak belirlendi.
  - DS-5 tipi hasar durumuna ulaşan bims beton modeli DI değerleri enine mod için 0.24, boyuna mod için 0.09 ve burulma modu için 0.04 olarak belirlendi.
  - Daha hafif bir malzeme olan gaz beton modelin DS-5 tipi hasar durumu için DI değerleri enine mod için 0.78, boyuna mod için 0.38 ve burulma modu için ise 0.59 olarak bulunmuştur.
  - Kuzeye ve güneye bakan duvarlarda farklı oranlarda olan boşluklar nedeni ile döşeme köşelerinden elde edilen görelî yer değiştirmelerde önemli denebilecek farklar bulunmaktadır. Bu nedenle sarsma masası deneyleri sırasında çatı seviyesinde burulma gözlenmiştir.
  - Deneyler sırasında elde edilen görelî kat öteleme oranları, önerilen eşik değerlerle kısmen uyumludur.
- Sayısal Simülasyon
- 1/2 ölçekli ön deney tuğla ve önerilen güçlendirme tekniği ile güçlendirilen modellerde gerçekleşen sarsma masası deney serileri farklı hasar tiplerini oluşturmuştur. Artımlı deney esnasında gerçekleşen göçme modellerine yakın şekilde modelin yıkıldığı başarılı bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu tür

alışmalar ile yapının yapısal davranışı sismik hareketlerden önce belirlemek mümkün olabilir.

- Deneysel bir model olarak yapılan yığma çalışmalarımıza rağmen, önerilen deprem simülasyon tekniği ile yapıların tamamında kullanılabilecek bir yöntem sunulmuştur. Bu teknik öncelikle depremin yapı üzerindeki görsel etkilerini değerlendirmek amacıyla tasarlandı ve geçmiş depremleri yeniden oluşturmamıza veya gelecekteki depremlerin yıkıcı sonuçlarını tahmin etmemize imkn tanır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ışığında konu ile alakalı yapılan öneriler ve bu öneriler ışığında geliştirilmesi gereken çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

- Güncellenmiş yığma yapı modelleri kullanılarak bu tez çalışmasında gerçekleşen deneysel verilerin yardımıyla, sarsma masası deneylerine uygulanması zor olan farklı sismik uyarımlar ve sismik büyüklükler altındaki dinamik tepkiler incelenebilir. Konuyu daha derinlere inerek yığma binaların dinamik tepkilerini ve sismik kırılğanlığını ayrıntılı incelemek için parametrik çalışmalar yapılabilir.
- Farklı birimlerle inşa edilen yığma yapıların hasar görme ve yıkılma modellerine ilişkin mevcut çalışmamız göz önüne alındığında, ileride atılması gereken adımlar güçlendirme önerilerinin geliştirilmesi ve test edilmesidir.
- Deneysel alışmalar yardımıyla elde edilen veriler daha önceki yapılan çalışmalar veya yönetmelikler ile karşılaştırılmalı ve bununla birlikte en elverişsiz durumlar göz önüne alınmalıdır.
- Deneysel çalışmaların sonuçları incelenirken veya benzer durumlarla karşılaştırılırken yapım sürecindeki malzeme kusurları, işçilik hatası ve yapım hatalarından kaynaklı kusurlar da dikkate alınmalıdır. Bu hata ve kusurlar beklenen yapı davranışının dışında bir sonuç ortaya çıkarabilmektedir.
- Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında sarsma masası gibi kısa süren ve model üretim sürecindeki zorluklar sebebiyle asıl deneylerden önce bir n deney veya pilot deneyler gerçekleştirilmesi deneylerin sağlıklı ilerlemesi için büyük fayda sağlayacaktır.

#### 4. KAYNAKLAR

1. Saloustros, S., Pela, L., Roca, P. ve Portal, J., Numerical Analysis of Structural Damage in the Church of the Poblet Monastery, Engineering Failure Analysis, 48 (2015) 42-61.
2. Korkmaz, H. H., Korkmaz, S. Z., ve Donduren, M. S., Earthquake Hazard and Damage on traditional Rural Structures in Turkey, Natural Hazards and Earth System Sciences, 10,3 (2010) 605-622.
3. Bruneau, M., State-of-the-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings, Journal of Structural Engineering-ASCE, 120, 1 (1994) 230-251.
4. Tornabvie, M., Seismic Design of Masonry Structures. Prog. Struct. Eng. Mat., 1, 1 (1997) 88-95.
5. Benedetti, D., Carydis, P. ve Pezzoli, P., Shaking Table Tests on 24 Simple Masonry Buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1 (1998) 67-90.
6. Abrams, D. P., Performance-Based Engineering Concepts for Unreinforced Masonry Building Structures. Progress in Structural Engineering and Materials, 3, 1 (2001) 48-56.
7. Paquette, J. ve Bruneau, M., Pseudo-Dynamic Testing of Unreinforced Masonry Building with Flexible Diaphragm, Journal of Structural Engineering- ASCE, 129, 6 (2003) 708-716.
8. Doherty, K., Griffith, M.C., Lam, N., ve Wilson, J., Displacement-Based Seismic Analysis for out-of-Plane Bending of Unreinforced Masonry Walls. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 4 (2002) 833-850.
9. Jing, L., Shi-ping, Y., and Farhad, A., Textile-Reinforced Mortar Strengthening of Masonry Piers Containing Industrial Waste Coal Gangue Sintered Bricks, Journal of Composites for Construction, 26, 2 (2022) 04022013.
10. Altunışık, A.C., ve Genç, A.F., Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques After Restoration, Natural Hazards and Earth System Sciences, 17, 10 (2017) 1710-1811.
11. Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E., ve De Luca, A., Damage and Performance Evaluation of Masonry Churches in the 2009 L'Aquila Earthquake, Engineering Failure Analysis, 34 (2013) 693-714.
12. Mendes, N.A.L., Seismic Assessment of Ancient Masonry Buildings: Shaking Table Tests and Numerical Analysis, Doktora Tezi, Minho Üniversitesi, Braga, 2012.

13. Zeng, F., Numerical Modeling and Experimental Investigation of Masonry Structure, Doktora Tezi, The City University of New York, 2010.
14. Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coskun, N., Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of a Historical Masonry Minaret. Journal of Testing and Evaluation, 36, 6 (2008) 516-524.
15. Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunişik, A.C. ve Yildirim, F., Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test. Journal of Testing and Evaluation, 28, 1 (2009) 37-47.
16. Bayraktar, A., Birinci, F., Altunişik, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge Using Ambient Vibration Tests, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4 (2009) 177-185.
17. Altunişik A.C., Bayraktar A., Sevim B., ve Birinci F., Vibration-Based Operational Modal Analysis of the Mikron Historic Arch Bridge After Restoration. Civil Engineering and Environmental Systems, 28, 3 (2011) 247-259.
18. Pepi, C., Cavalagli, N., Gusella, V. ve Gioffre, M., Damage Detection via Modal Analysis of Masonry Structures Using Shaking Table Tests, Earthquake Engineering Structure Dynamics, 50 (2021) 2077-2097.
19. Turek, M., Ventura, C.E. ve Placencia, P., Dynamic Characteristics of a 17th Century Church in Quito, Proceedings of SPIE, Ecuador , 4753, 2 (2002) 1259-1264.
20. Gentile, C. ve Saisi, A., Ambient vibration testing of historic masonry tower for structural identification and damage assessment. Construction and Building Materials, 21, 6 (2007) 1311-1321.
21. Ramos, L.F., Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD. Thesis, Univ. of Minho, 2007.
22. Ramos, L.F., Marques, L., Lourenco, P.B., De Roeck, G., Campos-Costa, A. ve Roque, J., Monitoring Historical Masonry Structures with Operational Modal Analysis: Two Case Studies, Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 5 (2010) 1291-1305.
23. Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 24, 1 (2010) 46-52.
24. Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., ve Tashkov, L., Experimental and Numerical Modal Analyses of a Historical Masonry Palace, Construction and Building Materials, 25, 1 (2011) 81-91
25. Sevim, B., Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Atamtürktür, S., ve Birinci, F., Assessment of Non-Linear Seismic Performance of a Restored Historical Arch Bridge Using Ambient Vibrations, Nonlinear Dynamics, 63, 4 (2011) 755-770.

26. Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Sevim, B., and Türker, T., Seismic Response Of A Historical Masonry Minaret Using a Finite Element Model Updated with Operational Modal Testing, J. Vib. Control., 17, 1 (2011) 129-149.
27. Oliveira, C. S., Çaktı, E., Stengel, D., and Branco, M., Minaret Behavior Under Earthquake Loading: The Case of Historical Istanbul, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41, 1 (2012) 19-39.
28. Brown, S., Hwang, J. P., and Parker, A., Assessment of Masonry Bell Tower Responseto Bell Ringing Using Operational Modal Analysis and Numerical Modelling, Proceedings of Acoustics, Fremantle, 2012, Australia.
29. Diaferio, M., Foti, D., and Giannocaro, N. I., Non-Destructive Characterization and Identification of the Modal Parameters of an Old Masonry Tower. 2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems Proceedings, 2014, Naples, Italy, 57-62.
30. Bartoli, G., Betti, M., Facchini, L., Marra, A. M., and Monchetti, S., Bayesian Model Updating of Historic Masonry Towers Through Dynamic Experimental Data. Procedia Engineering, 199 (2017) 1258-1263.
31. Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H. and Karabulut, A., Seismic Assessment in a Historical Masonry Minaret by Linear and Non-Linear Seismic Analyses, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64, 2 (2020) 438-448.
32. Cattari, S., Abbati, S. D., Alfano, S., Brunelli, A., Lorenzoni, F., and Porto, F., Dynamic Calibration and Seismic Validation of Numerical Models of URM Buildings Through Permanent Monitoring Data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 50 (2021) 2690-2711.
33. Meymand, P. J., Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay, Ph.D. Thesis, University of California-Berkeley, 1998.
34. Burke, C. B., Full-Scale Shaking Table Tests and Finite Element Analysis of Reinforced Soil Retaining Walls, Ph.D. Thesis, Columbia University, 2004.
35. Pinzon, A. F. S., Development, Modeling, Identification and Simulation of a Small Shaking Table System, Ph.D. Thesis, University of California-Los Angeles, 2005.
36. Lin, M. L. and Wang, K. L., Seismic Slope Behavior in a Large-Scale Shaking Table Model Test, Engineering Geology, 86, 2 (2006) 118-133.
37. Muhlenkamp, M. J., Analysis, Design and Construction of a Shaking Table Facility, M.Sc. Dissertation, Rice University, 2007.
38. Koutromanos, I., Kyriakides, M., Stavridis, A., Billington, S., and Shing, P. B., Shake-Table Tests of a 3-Story Masonry-Infilled RC Frame Retrofitted With Composite Materials, J. Struct. Eng., 139, 8 (2013) 1340-1351.

39. Lourenço, P. B., Avila, L., Vasconcelos, G., Alves, J. P. P., Mendes, N., and Costa, A. C., Experimental Investigation on the Seismic Performance of Masonry Buildings Using Shaking Table Testing, Bull. Earthquake Eng., 11, 4 (2013) 1157-1190.
40. Dar, A. M., Umair, S. M., Numada, M., and Meguro, K., Reduction of PP-Band Mesh Connectivity for Masonry Structure Retrofitting, J. Struct. Earthquake Eng., 70, 4 (2014) 586-595.
41. Stavridis, A., Ahmadi, F., Mavros, M., Shing, P. B., Klingner, R. E., and McLean, D., Shake-Table Tests of a Full-Scale Three-Story Reinforced Masonry Shear Wall Structure, J. Struct. Eng., 142, 10 (2016) 04016074.
42. Saleem, M. U., Numada, M., Amin, M. N., and Meguro, K., Shake Table Tests on FRP Retrofitted Masonry Building Models, J. Compos. Constr., 20, 5 (2016) 04016031.
43. Candeias, P. X., Campos Costa, A., Mendes, N., Costa, A. A., and Lourenço, P. B., Experimental Assessment of the out-of-Plane Performance of Masonry Buildings Through Shaking Table Tests, Int. J. Archit. Heritage, 11, 1 (2017) 31-58.
44. Xu, D., Xie, Q., Zhang, Y., and Hao, W., Effects of Inclination on the Seismic Performance of Chinese Historical Masonry Tower Identified through Shaking Table Tests, Journal of Earthquake Engineering, (2022) 1-24.
45. Chacara, C., Cannizzaro, F., Panto, B., Calio, I., and Lourenço, P. B., Assessment of the Dynamic Response of Unreinforced Masonry Structures Using a Macroelement Modeling Approach, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 47(2018) 2426-2446.
46. Milani, G., Shehu, R., and Valente, M., Role of Inclination in the Seismic Vulnerability of Bell Towers: FE Models and Simplified Approaches. Bull. Earthq. Eng., 15(2017) 1707–1737.
47. Sarhosis, V., Milani, G., Formisano, A., and Fabbrocino, F., Evaluation of Different Approaches for the Estimation of the Seismic Vulnerability of Masonry Towers, Bull. Earthq. Eng. 16,3 (2018) 1511–1545.
48. Xie, Q., Xu, D., Zhang, Y., Yu, Y., and Hao, W., Shaking Table Testing and Numerical Simulation of the Seismic Response of a Typical China Ancient Masonry Tower, Bull. Earthq. Eng., 18 (2020) 331-355.
49. De Felice, G., De Santis, S., Lourenço, P. B., and Mendes, N., Methods and Challenges for the Seismic Assessment of Historic Masonry Structures, Int J. Archit. Herit., 11, 1 (2016) 1–18.
50. Emily, W., John, O., ve Frédo, D., Procedural Modeling of Structurally Sound Masonry Buildings, ACM Transactions on Graphics, 28, 5 (2009) 1-9.
51. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley, New York, 1992.

52. Lourenço P.B., Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Netherlands, 1996.
53. Bayülke, N., Yığma Yapılar (Taş ve Tuğla) Genişletilmiş 3.Baskı. TMMOB İnşaat Mühendisler Odası, Ankara Şubesi, 2013.
54. Ersubaşı, F., Yığma Yapıların Deprem Davranışının Sarsma Masasında Dinamik Olarak İncelenmesi ve Farklı Güçlendirme Seçeneklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2008.
55. Tomazevic, M. Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Singapore: Imperial College Press, 1999, p.268.
56. Bournas, D. A., Concurrent Seismic and Energy Retrofitting of RC and Masonry Building Envelopes Using Inorganic Textile-Based Composites with Insulation Materials: A New Concept, Compos. Part B, 148 (2018) 166–179.
57. Günaydın, M., Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
58. Babaeidarabad, S., Masonry Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to in-Plane and Out-of-Plane Load, Ph.D. Thesis, University of Miami, USA, 2013.
59. Bakis, C., Bank, L., Brown, V., Cosenza, E., Davalos, J., Lesko, J., Machida, A., Rizkalla, S., and Triantafillou, T., Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction State-of-the-Art Review, Journal of Composite for Construction, 6, 2 (2002) 73–87.
60. TS 2510, Nisan 1977. Kâğıt Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 27 s.
61. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), T.S.E., Ankara, 2007.
62. TS EN 771-1:2011+A1, Kâğıt Birimler- Özellikler- Bölüm 1: Kil Kâğıt Birimler, T.S.E, Ankara, 2015.
63. TS 705, Duvarlar İçin Dolu ve Düşey Delikli Fabrika Tuğlaları, T.S.E., Ankara, 1985.
64. Ünay, A., İ., A Method for the Evaluation of the Ultimate Safety of Historical Masonry Structures, Ph.D. Dissertation, METU, Ankara, 1997.
65. Ünay, A. İ., Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Basım İşliği, Ankara, 2002.

66. TS EN 771-3., Kâgir birimler- Özellikler - Bölüm 3: Beton kâgir birimler (Yoğun ve hafif agregalı), T.S.E., Ankara, 2011.
67. Page, A.W., Finite Element Model for Masonry, Journal of the Structural Division, ASCE, 104(ST8), Proceeding Paper, 13957 (1978) 1267-1285.
68. Oliveira, D.V.C., Mechanical Characterization of Stone and Brick Masonry, Report 00-DEC/E-4, University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal, 2000.
70. TS EN 998-2, Kâgir harcı- Özellikler- Bölüm 2: Kâgir Harcı, T.S.E., Ankara, 2011.
71. Blondet, M., Construction and Maintenance of Masonry Houses for Masons and Craftsmen, Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, 2005.
72. Yoshimura, K., Kikuchi, K., Kuroki, M., Nonaka, H., Kim, K. T., Wangdi, R. ve Oshikata, A., Experimental Study for Developing Higher Seismic Performance of Brick Masonry Walls, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Ağustos 2004, Vancouver, Canada, Proceeding Books, 1870.
73. Tena Colunga, A., Juarez-Angeles, A. ve Salinas-Vallejo, V. H., Cyclic Behavior of Combined and Confined Masonry Walls, Engineering Structures, 31 (2009) 240-259.
74. Kayaalp, F. B., Kilitli Yığma Birim Elemanlarla Üretilen Yığma Duvarların Tekrarlı Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışları, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
75. ABK., Methodology for Mitigation of Seismic Hazards in Existing Unreinforced Masonry Buildings: The Methodology. Agbabian & Associates, S.B. Barnes & Associates, and Kariotis & Associates, El Segundo, Calif., ABK-TR-08, 1984.
76. FEMA 154, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (ATC-20).
77. Bruneu, M., State of the Art Report on the Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings, ASCE Journal of Structural Engineering, 120, 1(1994) 230-251.
78. Centeno, J., Ventura, C.E., Brzev, S., Modeling of Sliding Shear Resistance of Reinforced Masonry Squat Walls, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Eylül 2012, Lizbon, Portekiz, Proceeding Books, 20428-20436.
79. Leiva, G., H., Seismic Resistance of Two-Story Masonry Walls With Openings, PhD Thesis, The University of Texas, Texas, 1991.
80. Mendes, N., Lourenço, P. B. ve Campos-Costa, A., Shaking Table Testing of an Existing Masonry Building: Assessment and Improvement of the Seismic Performance, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43 (2014) 247-266.
81. Grünthal, G., European Macroseismic Scale 1998, LUXEMBOURG, 1998.

82. Friswell, M.I. ve Mottershead, J.E., Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Solid Mechanics and Its Applications, Kluwer Academic Publishers Group, 1-286, ISBN 978-0-7923-3431-6, 1995.
83. Jaishi, B. ve Ren, W.X., Structural Finite Element Model Updating using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131 (2005) 4, 617-628.
84. URL-1.<https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe/4506-b-003>, 17.01.2023.
85. URL-2.<https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe/4507-b>, 17.01.2023.
86. Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universiteit, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium, 2007.
87. Ramos, J.L.F.S., Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal, 2007.
88. Altunışık, A.C., Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
89. Sevim, B., Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
90. PULSE, Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark, 2006.
91. OMA, Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.
92. Chuntavan, C., Structural Identification of Steel Stringer Bridges for Condition Assessment, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA, 1993.
93. Womack, K.C. ve Halling, M.W., Forced Vibration Testing of the I-15 South Temple Bridge, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: UT-99.15, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA, 1999.
94. Ewins, D.J., Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd. England, 2000.
95. Zhao, J. ve DeWolf, J.T., Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 7, 6 (2002) 350-356.

96. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6 (2007) 487-502.
97. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., Kömürhan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, İMO İstanbul Şubesi Bülteni, 98 (2008) 10-21.
98. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2 (2009b) 81-89.
99. Bendat, J. ve Piersol, A., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA, 1986.
100. Caetano, E., Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal, 2000.
101. Rodrigues, J., Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal, 2004.
102. Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, (2002) 152-161.
103. Brincker, R., Ventura, C.E. ve Andersen, P., Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, 2003, Kissimmee, Orlando, USA.
104. Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, The International Conference on Noise and Vibration Engineering, 2006, Belgium.
105. Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA, 2004.
106. Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, 2000, San Antonio, USA, Bildiriler Kitabı: 4062, 2 625-630.
107. Allemang, R.J., The Modal Assurance Criterion: Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, 37, 8 (2003) 14-23.
108. Ricamato M., Numerical and Experimental Analysis of Masonry Arches Strengthened with FRP Materials, Ph.D. Dissertation, University of Cassino, Cassino, 2007.

109. Lofti, H.R. ve Shing, B. P., Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, 120, 1 (1994) 63-80.
110. Giambanco, G. ve Di Gatti, L., A Cohesive Interface Model for the Structural Mechanics of Block Masonry, Mechanics Research Communications, 24, 5 (1997) 503-512.
111. Alfano, G. ve Sacco, E., Combining Interface Damage and Friction in a Cohesive-Zone Model, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 68, 5 (2006) 542-582.
112. DeJong, M.J. ve Vibert, C., Seismic Response of Stone Masonry Spires: Computational and Experimental Modeling, Engineering Structures, 40 (2012) 566-574.
113. Mele, T.V., McInerney, J., DeJong, M.J. ve Block, P., Physical and Computational Discrete Modeling of Masonry Vault Collapse, Proceedings of the SAHC 2012 Eight International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Ekim 2012, Wroclaw, Poland, 15-17.
114. Luciano R. and Sacco, E., Homogenization Technique and Damage Model for Old Masonry Material, International Journal of Solids and Structures, 34, 4 (1997) 3191-3208.
115. Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A., Homogenized Limit Analysis of Masonry Walls, Part I: Failure Surfaces; Part II: Structural Examples, Computers and Structures, 84 (2006) 166-195.
116. Mojsilovic', N., Kostic, N. ve Schwartz, J., Modeling of the Behavior of Seismically Strengthened Masonry Walls Subjected to Cyclic In-Plane Shear, Journal of Engineering Structures, 56 (2013) 1117-1129.
117. Sandoval, C., Roca, P., Bernat, E. ve Gil, L., Testing and Numerical Modelling of Buckling Failure of Masonry Walls, Construction and Building Materials, 25, 12 (2011) 4394-4402.
118. Giordano, A., Mele, E. ve De Luca, A., Modeling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches through a Case Study, Engineering Structures, 24, 4 (2002) 1057-1069.
119. Peña, F., Lourenço, P.B., Mendes, N. ve Oliveira, D.V., Numerical Models for the Seismic Assessment of an Old Masonry Tower, Engineering Structures, 32, 5 (2010) 1466-1478.
120. Li, T. ve Atamtürk, S., Fidelity and Robustness of Detailed Micro, Simplified Micro, and Macro Modeling Techniques for a Masonry Dome, Journal of Performance of Constructed Facilities, 28, 3 (2013) 480-490.

121. Rots, J.G., Structural Masonry: An Experimental/ Numerical Basis for Practical Design Rules, AA Taylor and Francis, 1, 1997.
122. Wei, H., Minggang, H. ve Qun, H., Quasi-Static Testing of Composite Masonry Construction, Building Research And Information, 27, 2 (1999) 120-123.
123. Indirli, M., Carpani, B., Martelli, A., Castellano, M.G., Infanti, S., Croci, G., Biritognolo, M., Bonci, A., Viskovic, A. ve Viani, S., Experimental Tests on Masonry Structures Provided with Shape Memory Alloy Antseismic Devices, Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, 2000, Auckland, New Zealand, 1773.
124. Burnett S., Gilbert, M., Molyneaux, T., Tyas, A., Hobbs, B. ve Beattie, G., The Response of Masonry Joints to Dynamic Tensile Loading, Materials and Structures, 40, 5 (2007) 517-527.
125. Klingner, R.E., Shing, P.B., McGinley, W.M., McLean, D.I., Okail, H. ve Jo, S., Seismic Performance Tests of Masonry and Masonry Veneer, Proceedings of the Eleventh NAMC, 2011, Minneapolis, USA.
126. Beyer K. ve Dazio, A., Quasi-Static Cyclic Tests on Masonry Spandrels, Earthquake Spectra, 28, 3 (2012) 907-929.
127. Salmanpour, A., Mojsilović, N. ve Schwartz, J., Experimental Study of the Deformation Capacity of Structural Masonry, Proceedings of the Twelfth Canadian Masonry Symposium, Haziran 2013, Vancouver, British, Columbia.
128. Javed, M., Seismic Risk Assessment of Unreinforced Brick Masonry Buildings System of Northern Pakistan, Ph.D. Dissertation, N-W.F.P. University of Engineering and Technology, Peshawar, Pakistan, 2009.
129. Shing P. B. ve Mahin, S.A., Computational Aspects of a Seismic Performance Test Method Using On-Line Computer Control, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, 4 (1985) 507-526.
130. Kumar, S., Itoh, Y., Saizuka, K., ve Usami, T., Pseudo Dynamic Testing of Scaled Models, Journal of Structural Engineering, (1997) 524-526.
131. Tan, X. J. ve Wu, B., Substructure Pseudo-Dynamic Testing of a Full-Scale Confined Masonry Building, Advanced Materials Research, 250 (2011) 2566-2570
132. An, D., Qu, T.J. ve Liang, J.W., Full-Scale Test on Seismic Performance of Masonry Structure, Applied Mechanics and Materials, 204, 208 (2012) 2610-2617.
133. An, D., Qu, T.J. ve Liang, J.W., Pseudo-Dynamic Test of Brick Masonry under Different Earthquake Motion, Applied Mechanics and Materials, 256, 259 (2013) 2111-2116.

134. Blondet, J. M., Clough, R.W. ve Maphin, S.A., Evaluation of Shaking Table Test Program on Response Behavior of a Two Story Reinforced Concrete Frame, Report No. UCB/EERC-80/42, EERC, University of California, Berkeley, California, 1980.
135. Takanashi K. ve Nakashima, M., Japanese Activities on On-line Testing, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 113, 7 (1987) 1014-1031.
136. Mahin S.A., ve Shing, P.B., Pseudo Dynamic Test Method-Current Status and Future Directions, ASCE Journal of Structural Engineering, 115, 8 (1989) 2113-2128.
137. Iiba, M., Mizuno, H., Goto, T. ve Kato, H., Shaking Table Test on Seismic Performance of Confined Masonry Wall, Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Haziran 1996, Acapulpo, Mexico, 659.
138. Lu, X., Zhou, Q., Wu, X. ve Zhang, W., Shaking Table Testing on Model Building Constructed in Moderate Seismic Region, Proceedings of the International Workshop on Earthquake Engineering for Regions of Moderate Seismicity, 1996, Hong Kong, 227-237, 1996.
139. Zhang, M., Study on Similitude Laws for Shaking Table Test, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 17, 2 (1997) 52-58.
140. Juha'sova', E., Hurak, M. ve Zembaty, Z., Assessment of Seismic Resistance of Masonry Structures Including Boundary Conditions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 9-12 (2002) 1193-1197.
141. Elwood, K. J. ve Moehle, J.P., Shaking Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, PEER Report No. 2003/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 2003.
142. Xianguo, Y., Jiaru, J. ve Kangning, L., Shaking Table Test and Dynamic Response Prediction on an Earthquake-Damaged RC Building, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 3, 2 (2004) 205-214.
143. Li, C. S., Lam, S.S.E., Zhang, M.Z. ve Wong, Y.L., Shaking Table Test of a 1:20 Scale High-Rise Building with a Transfer Plate System", Journal of Structural Engineering, 132, 11 (2006) 1732-1744.
144. Rezaifar, O., Kabir, M.Z. ve Bakhshi, V., Shaking Table Test of a 1:2.35 Scale 4-Story Building Constructed with a 3D Panel System, Transaction A: Civil Engineering, 16, 3 (2009) 199.
145. Yang, G., Dynamic Analyses of a Masonry Building Tested in a Shaking Table, Master Thesis, University of Minho, Portugal, 2010.
146. Tomazevic, M. ve Gams, M., Shaking Table Study and Modeling of Seismic Behavior of Confined AAC Masonry Buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 3 (2012) 863-893.

147. Takanashi, T., Seismic Failure Analysis of Structures by Computer-Pulsator on-line System, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, University of Tokyo*, 26, 11 (1974) 13-25.
148. Candeias, P., Costa, A.C. ve Coelho, E., Shaking Table Test of 1:3 Reduced Scale Models of Four Storey Unreinforced Masonry Buildings, *Proceedings of Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Ağustos 2004, Vancouver, 2199.
149. Krstevska L., Tashkov, L.A., Gramatikov, K., Mazzolani, F.M. ve Landolfo, R., Shaking Table Test of Mustafa Pasha Mosque Model in Reduced Scale, *Protection of Historical Buildings*, PROHITECH 09 Mazzolani (ed), Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-55803-7, 2009.
150. Liu, M., Cheng, Y. ve Liu, X., Shaking Table Test on Out-of-plane Stability of Infill Masonry Wall, *Transaction of Tianjin University*, 17, 2 (2011) 125-131.
151. Nakagawa, T., Narafu, T., Imai, H., Hanazato, T., Ali, Q. ve Minowa, C., Collapse Behavior of a Brick Masonry House Using a Shaking Table and Numerical Simulation Based on the Extended Distinct Element Method, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 1 (2012) 269-283.
152. Spada, A., Giambanco, G. ve Rizzo, P., Damage and Plasticity at The Interfaces in Composite Materials and Structures, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198, 49–52 (2009) 3884-3901.
153. Bayraktar, A., Çalik, İ., Türker, T., ve Ashour, A., Restoration Effects on Experimental Dynamic Characteritics of Masonry Stone Minarets, *Materials and Structures* 51 (2018) 141.
154. Ercan, E., Assessing the Impact of Retrofitting on Structural Safety in Historical Buildings via Ambient Vibration Tests, *Constr. Buid. Mater.*, 164 (2018) 337-349.
155. Nohutcu, H., Demir, A., Ercab, E., Hokelekli, E. ve Altintas, G., Investigation of a Historic Masonry Structure by Numerical and operational modal analyses, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24 (2015) 821-834.
156. Reuland, Y., Garofano, A., Lestuzzi, P. ve Smith, L.F.C., Evaluating Seismic Retrofitting Efficiency through Ambient Vibration Tests and Analytical Models, *IABSE Conference-Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, September 2015, Geneva, Switzerland.
157. Karbassi, A., Michel, C. ve Lestuzzi, P., Ambient Vibration Tests an Numerical Modelling to Evaluate Seismic Retrofitting, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, August 2014, İstanbul, *Bildiriler Kitabı*: 1-3.

158. Kaya, A., Dawood, M. ve Gencturk, B., Repair of Corroded and Buckled Short Steel Columns Using Concrete-Filled GFRP Jackets, Construction and Building Materials, 94 (2015) 20-27.
159. Myers, J.J., Strengthening unreinforced masonry structures using externally bonded fiber-reinforced polymer systems: An overview of the American Concrete Institute 440.7R design approach, 9th Australasian Masonry Conference, 2011, Queenstown, New Zealand, 15–18.
160. Petersen, R. B., Masia, M. J. ve Seracino, R., In-Plane Shear Behavior of Masonry Panels Strengthened with NSM CFRP Strips. II: Finite-Element Model, Journal of Composites For Construction, 14 (2010) 764-774.
161. Silva, P.F., Yu, P. ve Nanni, A., Monte Carlo Simulation for Validating the in-Plane Shear Capacity of URM Walls Strengthened with GFRP Grid Reinforced Polyurea, Journal of Composites for Construction, 12, 4 (2008) 405–415.
162. Li, T., Galati, N., Tumialan, J.G. ve Nanni, A., Analysis of Unreinforced Masonry Concrete Walls Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars, ACI Structural Journal, 102, 4 (2005) 569–577.
163. Grando, S., Valluzzi, M.R., Modena, C. ve Tumialan, J.G., Shear Strengthening of URM Clay Walls With FRP Systems, *Advancing with Composites*, First Edition, Crivelli Visconti, Milan, Italy, 2003,
164. Nanni, A., Galati, N. ve Tumialan, J.G., Outline of Provisional Design Protocols and Field Applications of Strengthening of URM Walls, Advancing with Composites, (2003) 187–197.
165. Morbin, A., Strengthening of Masonry Elements with FRP Composites, CIES Research Report, 02-23, University of Missouri, Rolla, 2002.
166. Tumialan, J.G., Morbin, A., Nanni, A. ve Modena, C., Shear Strengthening of Masonry Walls with FRP Composites, Convention and Trade Show, Composites Fabricators Association, Tampa, FL, October 2001, 6 pp. CD-ROM.
167. Tinazzi, D., Assessment of Technologies of Masonry Retrofitting with FRP, Ph.D. Thesis, CIES Research Report, University of Missouri, Rolla, 2000.
168. Yu, P., Silva, P.F. ve Nanni, A., In-Plane Response of URM Walls Strengthened with GFRP Reinforced Polyurea, North America Masonry Conference, June 2007, St. Louis, MO.
169. Hrynyk, T. ve Myers, J.J., Comparative Study on the out-of-Plane Behavior of Retrofitted Wall Systems with Arching Action, 10th North American Masonry Conference, 2006, St. Louis.

170. Triantafillou, T.C. ve Papanicolaou, C.G., Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets, Materials and Structures, 39, 1 (2006) 93–103.
171. Tumialan, J.G., Galati, N. ve Nanni, A., FRP Strengthening of URM Walls Subject to Out-of-Plane Loads, Aci Structural Journal, 100, 3 (2003) 312-329.
172. Babaeidarabad, S. ve Nanni, A., Out-of-Plane Strengthening of URM Walls with Fabric-Reinforced-Cementitious-Matrix (FRCM), In American Concrete Institute, 299 ed., ACI Special Publication, American Concrete Institute, 2015.
173. Sesigür, H., Çelik, O.C. ve Çılı, F., Esnek Döşemeli Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi İzmit Sultan Abdülaziz Av Köşkü Örneği, Deprem Sempozyumu, Mart 2005, Kocaeli.
174. Altın, S., Kuran, F., Kara, M. E. ve Anil, Ö., Yığma Yapıların Rehabilitasyonu İçin Bir Yöntem, YDGA 2005- Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 2005, Orta Dogu Teknik Üniversitesi, Ankara.
175. Li-hua, X., Zhang, S., Hu, X. ve Zhang, M., Seismic Performance of Masonry Structures Strengthened with FRP Laminates: A Shaking Table Study, Proc., 15th World Conf. on Earthquake Engineering (15WCEE), Eylül 2012, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica (SPES), Portugal.
176. Urban, M. ve Stempniewski, L., Comparison of Different Earthquake Strengthening Methods For Masonry Buildings, Proc. 15th World Conf. on Earthquake Engineering (15WCEE), Eylül 2012, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica (SPES), Portugal.
177. Sathiparan, N. ve Meguro, K., Seismic Behavior of Low Earthquake- Resistant Arch-Shaped Roof Masonry Houses Retrofitted By PP-Band Meshes, Pract. Period. Struct. Des. Constr., 113 (2012) 54-64.
178. Paquette, J., Bruneau, M., ASCE, M. ve Brzev, S., Seismic Testing of Repaired Unreinforced Masonry Building Having Flexible Diaphragm, Journal of Structural Engineering, 130 (2004) 10.
179. Bayülke, N., Doğan, A. ve Esat, Y., %35 Düşey Delik Oranlı Taşıyıcı Tuğladan Yapılmış Yığma Yapının Sarsma Tablası Deneyi Raporu, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 1996.
180. Başyigit, C., Gençer, Ö. ve Terzi, S., Bimsblok Yığma Yapının Deprem Tablası Deneyi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4, 1 (2001) 26-31.
181. Korkmaz, K.A., Çarhoğlu, A.I., Orhon, A.V. ve Nuhoğlu, A., Farklı Yapısal Malzeme Özelliklerinin Yığma Yapı Davranışına Etkisi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3, 1(2014) 69-78.

182. Alakoç, C. A., Özcebe, G. ve Sucuoğlu, H., Gazbeton Duvarların Davranışı ve Mekanik Özellikleri, Türkiye İnşaat Mühendisliği 15. Teknik Kongre, 1999, 131, 146.
183. Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G. ve Aldea, C., Experimental in-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites, Journal of Composite for Construction, 10, 3 (2006) 223-233.
184. Parisi, F., Iovinella, A., Balsamo, A., Augenti, N. ve Prota, A., In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Inorganic Matrix-Grid Composites, Composites: Part B, 45,1 (2012) 1657–1666.
185. Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Karlos, K. ve Papathanasiou, M., Textile Reinforced Mortar (TRM) Versus FRP as Strengthening Material of URM Walls: In-Plane Cyclic Loading, Materials and Structures, 40 (2007) 1081- 1097.
186. Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papathanasiou, M. ve Karlos, K., Textile Reinforced Mortar (TRM) Versus FRP as Strengthening Material of URM Walls: Out-of-Plane Cyclic Loading, Materials and Structures, RILEM, 41, 1 (2008) 143- 157.
187. Enginsal, M.A., Applications of FRP in Reinforcing and Strengthening Concrete Masonry Beams, Master Thesis, Concordia University, Canada, 2009.
188. Erol, G. ve Karadogan, H.F., Seismic Strengthening of Infilled Reinforced Concrete Frames by CFRP, Composite Part B, 91 (2016) 473-491.
189. Günday, F., GFRP Retrofitting Effect on The Dynamic Characteristics of Model Steel Structure Using SSI, International Journal of Advance Engineering and Research Development, 5 (2018) 04.
190. Altunışık, A. C., Karahasan, O., Genç, A. F., Okur, F. Y., Kalkan, E. ve Adanur, S., Effect of Fiber-Reinforced Polymer Strengthening on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Frame Using Model Updating, Acı Structural Journal 115, 6 (2018).
191. Altunışık, A. C., Genç, A. F., Günaydın, M., Okur, F. Y. ve Karahasan, O., Dynamic Response of a Historical Armory Building Using The Finite Element Model Validated by the Ambient Vibration Test, Journal of Vibration and Control. DOI:10.1177/1077546318755559, 2018.
192. Altunışık, A. C., Karahasan, O., Genç, A. F., Okur, F. Y., Günaydın, M., Kalkan, E. ve Adanur, S., Modal Parameter Identification of RC Frame under Undamaged, Damaged, Repaired and Strengthened Conditions, Measurement, 124 (2018) 260-276
193. Altunışık, A. C., Okur, F. Y., Genç, A. F., Günaydın, M. ve Adanur, S., Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32, 1 (2018).
194. TS EN 1015-11, Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, T.S.E, Ankara, 2020.

195. Das, A., Deb, S. K. ve Dutta, A., Shake Table Testing of Un-Reinforced Brick Masonry Building Test Model Isolated by U-FREI, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 45, 2 (2016) 253-272.
196. Tomazevic, M., Shear Resistance of Masonry Walls and Eurocode 6: Shear Versus Tensile Strength of Masonry. Materials and Structures, 42 (2009) 889-907.
197. Sedov, L. I., Similarity and Dimensional Methods in Mechanics, Academic Press, New York, 1959.
198. Sulaeman, A., The Use of Lightweight Concrete Piles For Deep Foundation on Soft Soils, Ph.D. Dissertation, Faculty of Civil and Environmental Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia, 2010.
199. Baker, W. E., Westine, P. S. ve Dodge, F.T., Similarity Methods in Engineering Dynamics: Theory and Practice of Scale Modeling, Hayden Books, Rochelle Park, NJ, 1973.
200. Bairrao, R. ve Vaz, C.T., Shaking Table Testing of Civil Engineering Structures The LNEC 3D Simulator Experience, Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Ocak 2000, Auckland, New Zealand, 2129.
201. Avila, L., Vasconcelos, G. ve Lourenco, P.B., Experimental Seismic Performance Assessment of Asymmetric Masonry Buildings, Eng Struct, 155 (2018) 298–314.
202. Quintana Gallo, P., Pampanin, S., Carr, A.J. ve Bonelli, P., Shake Table Tests of Under-designed Frames for the Seismic Retrofit of Buildings Design and Similitude Requirements of the Benchmark Specimen, Proceedings of the NZSEE Conference, Mart 2010, Wellington, 39.
203. Meguro, K., Sathiparan, N., Sakurai, K. ve Numada, M., Shaking Table Test of Two-Story Masonry House Model Retrofitted by PP-Band Mesh. In Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Eylül 2012, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica (SPES), Portugal.
204. Saleem, M. U., Numada, M., Amin, M. N. ve Meguro, K., Seismic Response of PP-Band and FRP Retrofitted House Models under Shake Table Testing, Construction and Building Materials, 111 (2016) 298-316.
205. Tomassetti, U., Correia, A. A., Candeias, P. X., Graziotti, F. ve Campos Costa, A., Two-Way Bending Out-Of-Plane Collapse of a Full-Scale URM Building Tested on a Shake Table, Bulletin of Earthquake Engineering, 17 (2019) 2165-2198.
206. Wang, M., Liu, K., Guragain, R., Shrestha, H. ve Ma, X., Shake Table Tests on The Two-Storey Dry-Joint Stone Masonry Structures Reinforced with Timber Laces and Steel Wires, Bulletin of Earthquake Engineering, 17 (2019) 2199-2218.

207. Tu, Y. H., Chuang, T. H., Liu, P. M. ve Yang, Y. S., Out-of-Plane Shaking Table Tests on Unreinforced Masonry Panels in RC Frames, Engineering Structures, 32 (2010) 3925-3935.
208. Mayorca, P., Sathiparan, N., Guragain, R. ve Meguro, K., Comparison of the Seismic Performance of Different Strength Masonry Structures Retrofitted with PP-Band Meshes, In Proceeding of the 5th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2006, Phuket.
209. Senaldi, I. E., Guerrini, G., Comini, P., Graziotti, F., Penna, A., Beyer, K. ve Magenes, G., Experimental Seismic Performance of a Half-Scale Stone Masonry Building Aggregate, Bulletin of Earthquake Engineering, 18 (2020) 609-643.
210. Guerrini, G., Senaldi, I., Graziotti, F., Magenes, G., Beyer, K. ve Penna, A., Shake-Table Test of a Strengthened Stone Masonry Building Aggregate with Flexible Diaphragms, International Journal of Architectural Heritage, 13 (2019) 1078-1097.
211. Afreen, A., Ahmed, A. ve Moin, K., Effect of Near-Field Earthquake on Masonry Structure, Asian Journal of Civil Engineering, 22 (2021) 895-910.
212. Bilgin, H. ve Hysenlliu, M., Comparison of Near And Far-Fault Ground Motion Effects on Low and Mid-Rise Masonry Buildings, Journal of Building Engineering, 30 (2020) 101248.
213. Adanur, S., Altunişik, A. C., Bayraktar, A. ve Akköse, M., Comparison of Near-Fault and Far-Fault Ground Motion Effects on Geometrically Nonlinear Earthquake Behavior of Suspension Bridges, Natural Hazards, 64 (2012) 593–614.
214. Davoodi, M., Jafari, M. K. ve Hadiani, N., Seismic Response of Embankment Dams under Near-Fault and Far-Field Ground Motion Excitation, Engineering Geology, 158 (2013) 66–76.
215. Zhang, S. ve Wang, G., Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Nonlinear Dynamic Response and Seismic Damage of Concrete Gravity Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 53 (2013) 217–229.
216. Güllü, H. ve Karabekmez, M., Effect of Near-Fault and Far-Fault Earthquakes on a Historical Masonry Mosque Through 3D Dynamic Soil-Structure Interaction, Engineering Structures, 152 (2017) 465–492.
217. Altunişik, A. C., Sunca, F., Genç, A. F. ve Tavşan, C., Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses, International Journal of Architectural Heritage, (2021) 1-36.
218. Miglietta, M., Damiani, N., Guerrini, G. ve Graziotti, F., Full-Scale Shake-Table Tests on Two Unreinforced Masonry Cavity-Wall Buildings: Effect of an Innovative Timber Retrofit, Bulletin of Earthquake Engineering, 19 (2021) 2561-2596.

219. Chandramohan, R., Baker, J. W. ve Deierlein, G. G., Quantifying the Influence of Ground Motion Duration on Structural Collapse Capacity Using Spectrally Equivalent Records, Earthquake Spectra, 32 (2016) 927-950.
220. Todorov, B. ve Billah, A. M., Seismic Fragility and Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Pier under Long-Duration, Near-Fault, and Far-Field Ground Motions, Structures, 31 (2021) 671-685.
221. Chellappa, S. ve Dubey, R. N., Performance Evaluation of a Reinforced Masonry Model and an Unreinforced Masonry Model Using a Shake Table Testing Facility, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32 (2018) 04017121.
222. Salawu, O. S., Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: a Review, Engineering Structures, 19 (1997) 718-723.
223. Altunışık, A. C., Okur, F. Y. ve Kahya, V., Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam, Engineering Failure Analysis, 79 (2017) 154-170.
224. Ghezelbash, A., Beyer, K., Dolatshahi, K. M. ve Yekrangnia, M., Shake Table Test of a Masonry Building Retrofitted with Shotcrete, Engineering Structures, 219 (2020) 110912.
225. Sunca, F., Ergün, M., Altunışık, A. C., Günaydin, M. ve Okur, F. Y., Modal Identification and Fatigue Behavior of Eynel Steel Arch Highway Bridge with Calibrated Models, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11 (2021) 1337-1354.
226. Inci, P., Goksu, C., Tore, E. ve Ilki, A., Effects of Seismic Damage and Retrofitting on a Full-Scale Substandard RC Building-Ambient Vibration Tests, Journal of Earthquake Engineering, 26 (2022) 5747-5774.
227. Kallioras, S., Correia, A. A., Graziotti, F., Penna, A. ve Magenes, G., Collapse Shake-Table Testing of a Clay-URM Building with Chimneys, Bulletin of Earthquake Engineering, 18, 3 (2020) 1009-1048.
228. Calvi, G. M., A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings, Journal of Earthquake Engineering, 3, 3 (1999) 411-438.
229. Graziotti, F., Penna, A. ve Magenes, G., A Comprehensive in Situ and Laboratory Testing Programme Supporting Seismic Risk Analysis of URM Buildings Subjected to Induced Earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering, 17, 8 (2019) 4575-4599.
230. Ma, R., Jiang, L., He, M., Fang, C. ve Liang, F., Experimental Investigations on Masonry Structures Using External Prestressing Techniques for Improving Seismic Performance, Engineering Structures, 42 (2012) 297-307.

232. Bothara, J. K., Dhakal, R. P. ve Mander, J. B., Seismic Performance of an Unreinforced Masonry Building: an Experimental Investigation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39, 1 (2010) 45-68.
233. T. B. institute, "Blender," [Online]. Available: <https://www.blender.org/-/download/>. [Accessed 07 06 2021].
234. Kai, K. ve Oliver, W., Final release of the Blender and Bullet physics engine based on fast on-site assessment tool, INACHUS, 2017.
235. Couman, E., "GitHub," 2017. [Online]. Available: <https://github.com/-bulletphysics/bullet3>. [Accessed 23 06 2021].
236. LUAS, "GitHub," 2017. [Online]. Available: <https://github.com/KaiKostack-/bullet-constraints-builder>. [Accessed 23 06 2021].
237. Roessler, T. ve Katterfeld, A., DEM Parameter Calibration of Cohesive Bulk Materials Using a Simple Angle of Repose Test, Particuology, 45 (2019) 105-115.
238. Hustrulid, A. I. ve Graham, G. W. M., Engineering Analysis of Transfer Points Using Discrete Element Analysis, Geomechanics Research Center, Colorado School of Mines, Colorado, 1996.
239. Bender, J., Erleben, K., Trinkle, J. ve Coumans, E., Interactive Simulation of Rigid Body Dynamics in Computer Graphics, Computer Graphics Forum, 33 (2014)1.
240. Bakeer, T., Collapse Analysis Of Masonry Structures Under Earthquake Actions, PhD thesis, TU Dresden, Dresden, 2009.
241. Smith, N., "The seven ages of materials," 9 September 2019. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2019/09/the-seven-ages-of-materials/>.
242. Billington, D. P., Shirley-Smith H. and Billington, P. N., Bridge, <https://www.britannica.com/technology/bridge-engineering> 27 March 2022.
243. LUAS, GitHub, <https://github.com/KaiKostack-/bullet-constraints-builder>. 23 June 2021.
244. Bello, R. A., Collapse Simulation of Half-Scaled Unreinforced Masonry Building And Validation of Shaking Table Tests, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2022.
245. He, H., Zheng, J., Sun, Q. ve Li, Z., Simulation of Realistic Particles with Bullet Physics Engine, E3S Web of Conferences 92, 2019, Glasgow.
246. National Aeronautics and Space Administration, Autonomous Systems-NASA Tensegrity Robotics Toolkit (NTRT) v1 (ARC-17093-1), <https://software.nasa.gov/software/ARC-17093-1> 06 May 2022.

247. BBZ, LEO training system for robotic surgery, <https://www.bbzsrl.com/index.php/materialis/leo-3/> 25 May 2022.
248. Wikipedia, the free encyclopedia, PhysX, <https://en.wikipedia.org/wiki/PhysX>. 25 February 2022.
249. Russell, L. S. Open Dynamics Engine, <http://www.ode.org/>. 25 February 2022.
250. Hummel, J., Wolff, R., Stein, T., Gerndt, A. ve Kuhlen, T., An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual Reality Assembly Simulations, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 7432 (2012) 346-357.
251. Martin, F., Kai, K., JT, N., Dennis, F. ve Jens, V., Fracture Modifier for Blender 2.79x, <http://kaikostack.com/fracture> 27 June 2021.
252. Antonio, B., Giulio, C. ve Marco, C., Determination of Shear Strength of Masonry Panels Through Different Tests, International Journal of Architectural Heritage, 9, 8 (2015) 913-927.
253. Liu, G., Shi, C. ve Bin, J., The Shear Strength Of Unreinforced Masonry Wall, 11th International Brickblock Masonry Conference, Ekim 1997, Shanghai, China.
254. Enea, M., Erion, L., Marco, C., Antonio, B., Ylber, M. ve Aleksandra, Z., Physical-Mechanical Properties of Stone Masonry of Gjirrokastër, Albania, Materials- MPDI, 14, 5 (2021) 1127.
255. Earthquake / Masonry Building Collapse Simulation- WIP | BCB | INACHUS. [Film]. Kostack Studio, New Zealand, 2015.
256. Laird, D. A., Drysdale, R. G., Stubbs, D. W. ve Sturgeon, G. R., The New CSA S304.1-04- Design Of Masonry Structures, 10th Canadian Masonry Symposium, June 2005, Banff, Alberta.
257. Fıta, J. L., Besuevsky, G. ve Patow, G., Earthquake Simulation on Ancient Masonry Buildings, Journal on Computing and Cultural Heritage, 13, 2 (2020) 1-18.
258. Doğan, O. ve Odacıoğlu, O. G., An Experimental Study To Determine Sliding Shear Strength and Internal Friction Coefficient of Clay Brick Wall in a Masonry Building, International Journal of Engineering Research and Development, 11,2 (2019) 670-676.
259. Ferretti, F., Ferracuti, B., Mazzotti, C. ve Savoia, M., Destructive and Minor Destructive Tests on Masonry Buildings: Experimental Results and Comparison Between Shear Failure Criteria, Construction and Building Materials, 199 (2019) 12-29.
260. Tralli, A., Alessandri, C. and Milani, G., Computational Methods for Masonry Vaults: A Review of Recent Results., The Open Civil Engineering Journal. 8, (2014) 272-287.

261. Smoljanović, H., Zivaljic, N. ve Nikolić, Ž., Overview of the Methods for the Modelling of Historical Masonry Structures, Građevinar, 65,7 (2013) 603-618.
262. Lipscombe, P. R. ve Pellegrino, S., Free Rocking of Prismatic Blocks, J. Eng. Mech., 119, 7 (1993) 1387-1410.
263. Kalali A. ve Kabir M. Z., Experimental Response of Double-Wythe Masonry Panels Strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymers Subjected to Diagonal Compression Tests, Engineering Structures, 39(2012), 24-37.



## ÖZGEÇMİŞ

Ali KAYA, ilk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2006 yılında Adana Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı "Lisans" eğitimini 2010 yılında tamamladı. YLSY bursunu kazandıktan sonra 2012 yılında ABD, Texas, Houston Üniversitesi, İnşaat Mühendisliğinde "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. 2014 yılında hazırladığı "AN EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR OF STEEL BRIDGE PILES USING GFRP CONCRETE-FILLED JACKET" başlıklı tez ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2015 yılında Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesine Araştırma görevlisi olarak atandı. 2016 Yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı'nda "Doktora" eğitimine başladı. Halen Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi'ndeki görevine devam eden KAYA, İngilizce bilmektedir.