



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TBDY-2018'DE BELİRTİLEN DONATLI VE
DONATISIZ YIĞMA YAPI TÜRLERİNİN
YATAY YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet ORHAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet ORHAN tarafından hazırlanan “TBDY-2018’de Belirtilen Donatılı ve Donatısız Yığma Yapı Türlerinin Yatay Yükler Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 28/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Nihal ERATLI
(İstanbul Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. M. Sami DÖNDÜREN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Fatih BAHADIR
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 231104051 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet ORHAN

Tarih: 28/05/2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TBDY-2018'DE BELİRTİLEN DONATILI VE DONATISIZ YIĞMA YAPI TÜRLERİNİN YATAY YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet ORHAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2025, 143 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Nihal ERATLI
Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
Doç. Dr. Fatih BAHADIR**

Yığma yapılar, özellikle Doğu Anadolu, Kuzey Anadolu ve Batı Ege fay hatları boyunca yaygın olarak kullanılan ve mevcut yapı stoğunun önemli bir bölümünü oluşturan yapılardır. Malzeme kalitesinin yetersiz olması durumunda ve inşaat tekniklerinin düzgün uygulanmamasından dolayı depreme karşı yetersiz olan bu yapılar, özellikle ekonomik nedenlerle tercih edilmekte olup, özellikle kırsal alanlar ve tarihi dokularda yoğun olarak görülmektedir. Bu nedenle, yığma yapılar üzerine yapılan araştırmalar hem mevcut riskin azaltılması hem de tarihsel ve çağdaş yapıların güvenliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), yığma binalar için farklı yapı türleri tanımlamaktadır. Bu çalışmada, yönetmeliğin 11. bölümünde yer alan donatılı ve donatısız yığma yapıların yatay yükler altındaki davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel olarak laboratuvar ortamında 1/1 ölçekli, tek katlı, $3.2 \times 3.3 \times 3$ m boyutlarında, tek açıklıklı donatılı ve donatısız yığma yapı numuneleri üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında davranışları incelenmiştir. Yükleme, maksimum yüke kadar yük kontrollü, ardından deplasman kontrollü olarak uygulanmış; her yükleme adımında elde edilen veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Hasar durumları gözlemsel olarak değerlendirilmiş ve ilgili bölgeler işaretlenmiştir. Sayısal çalışmalar ANSYS programı ile gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca numunelerin üretim sürecindeki işçilik zorlukları ve maliyet farkları analiz edilmiştir. Sonuçlar, donatılı yığma yapıların donatısız yapılara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketme kabiliyetine sahip olduğunu; ancak uygulamadaki işçilik zorlukları ve maliyet artışı nedeniyle yaygın kullanımları için detaylı planlama ve mühendislik gerektirdiğini göstermiştir. Sayısal verilerin deneysel bulgularla büyük oranda örtüşmesi, çalışmanın güvenilirliğini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Deneysel, sayısal ve model analiz, yığma yapılar, TBDY-2018, yığma yapı türleri, donatısız ve donatılı yığma yapı, sismik performans

ABSTRACT

PhD THESIS

AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE LATERAL LOAD RESPONSE OF REINFORCED AND UNREINFORCED MASONRY STRUCTURES IN ACCORDANCE WITH TBDY-2018

Mehmet ORHAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2025, 143 Pages

Jury

Prof. Dr. Nihal ERATLI

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Assoc. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL

Assoc. Prof. Dr. Fatih BAHADIR

Masonry structures are widely used along the Eastern Anatolian, North Anatolian, and Western Aegean fault zones and constitute a significant portion of the existing building stock in Turkey. Due to inadequate material quality and the improper application of construction techniques, these structures often exhibit poor seismic performance. Nevertheless, they are frequently preferred for economic reasons and are predominantly found in rural areas and historic settlements. Consequently, research on masonry structures is of vital importance for both mitigating existing seismic risks and enhancing the safety of historical and contemporary buildings.

The Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018) defines various types of masonry structures. In this study, the seismic behavior of reinforced and unreinforced masonry buildings, as classified in Section 11 of the code, was investigated through experimental and numerical methods. Full-scale, single-story, single-bay masonry specimens measuring 3.2×3.3×3 m were constructed in a laboratory setting. These specimens were subjected to reversed cyclic loading to examine their structural response. The loading protocol involved load-controlled cycles up to the maximum load, followed by displacement-controlled cycles. Data collected at each loading stage were digitally recorded. Damage states were evaluated through visual inspection, and affected regions were marked accordingly. Numerical analyses were conducted using the ANSYS software, and the results were compared with the experimental findings. In addition, challenges encountered during the specimen fabrication process such as labor intensity and cost differences were analyzed. The results indicate that reinforced masonry structures demonstrate superior load-bearing capacity, ductility, and energy dissipation compared to unreinforced ones. However, due to increased construction complexity and costs, their widespread implementation requires comprehensive planning and engineering considerations. The strong correlation between the numerical and experimental results supports the reliability and validity of the study.

Keywords: Experimental, analytical and model analysis, masonry structures, TBDY-2018, types of masonry structures, unreinforced and reinforced masonry, seismic performance

ÖNSÖZ

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, sabrı ve desteğiyle katkı sunan değerli danışmanım Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca bilgi ve emekleriyle bana katkı sağlayan Doç. Dr. Fatih BAHADIR ve Öğr. Gör. Dr. Mehmet BAHADIR'a da içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte en büyük desteği ve sabrı gösteren sevgili eşim Nursena ORHAN ile her daim ilham kaynağım olan kıymetli evlatlarım Nil Duha ve Osman Kaan'a minnettarım. Ayrıca destek ve dualarını her zaman yanımda hissettiğim sevgili babam Osman ORHAN'a, annem Fatmanur ORHAN ve kardeşlerim Beyza ve Taha Emre'ye gönülden teşekkür ederim.

Mehmet ORHAN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER TABLOSU	x
ÇİZELGELER TABLOSU	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
2. KAYNAKÇA.....	5
2.1. Yığma Yapılar ile İlgili Yapılmış Deneysel Çalışmalar	5
2.2. Yığma Yapılar ile İlgili Yapılmış Sayısal Çalışmalar	6
2.3. Deneysel ve Sayısal Çalışmalar	9
3. YIĞMA YAPILAR	13
3.1. Yığma Yapıların Tarihsel Gelişimi.....	13
3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler	14
3.2.1. Tuğla	14
3.2.2. Harman tuğlası	15
3.2.3. Doğal taş	15
3.2.4. Kerpiç.....	16
3.2.5. Beton briket.....	17
3.2.6. Gaz beton	17
3.2.7. Harç.....	18
3.2.8. Diğer malzemeler.....	19
3.3. TBDY 2018’de Belirtilen Yığma Bina Çeşitleri	19
3.3.1. Donatısız yığma binalar	19
3.3.2. Donatılı yığma binalar	23
3.3.3. Kuşatılmış yığma binalar	24
3.3.4. Donatılı panel sistemli yığma binalar	24
3.4. Yığma Yapıların Deprem Karşısındaki Davranışı.....	25
3.5. Yığma Yapılarda Oluşan Hasar Biçimleri ve Deprem Hasar Düzeyleri	27
3.5.1. Yığma binalarda oluşan hasar biçimleri	28
3.6. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemelerin Dayanımı	30
3.7. Yığma Yapılarda Deprem Hesabı.....	32
3.8. Taşıma Gücü Yöntemine Göre Hesap	32
3.9. Diğer Tasarım İlkeleri.....	34

4. MATERYAL ve YÖNTEM	39
4.1. Deneysel Çalışma	39
4.1.1. Yığma bina olarak tasarlanan numunelerin genel özellikleri	39
4.1.2. Yığma bina numunelerin üretilmesinde kullanılan malzemeler ve basınç dayanım testleri	42
4.1.2.1. Yığma tuğla.....	42
4.1.2.2. Harç.....	44
4.1.2.3. Beton.....	46
4.1.2.4. Çelik donatı.....	48
4.1.3. Deney numunelerinin temel boyutları ve teknik özellikleri	49
4.1.4. Donatısız yığma bina numunenin üretilmesi	52
4.1.5. Donatılı numunenin teknik özellikleri	58
4.2. Donatısız ve Donatılı Yığma Deney Düzenekleri	69
4.2.1. Ölçüm tekniği	69
4.2.2. Ölçümlerin değerlendirilmesi	71
4.3. Sayısal Çalışma.....	71
4.3.1. Yığma duvarların modellenme teknikleri	73
4.3.2. Sonlu eleman modelleri	74
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	80
5.1. Yük Geçmişi Grafiklerinin Oluşturulması.....	80
5.2. Yatay Yük-Tepe Deplasmanı Grafiklerinin Oluşturulması	80
5.3. Rijitlik Azalımı Grafiklerinin Oluşturulması.....	80
5.4. Enerji Tüketimi Grafiklerinin Oluşturulması	81
5.5. Yığma Binaların Deneysel Sonuçları ve Karşılaştırmaları.....	82
5.5.1. Donatısız yığma duvar deneyi ile ilgili bulgular	83
5.5.2. Donatılı yığma duvar deneyi ile ilgili bulgular.....	98
5.5.3. Deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	113
5.5.3.1. Dayanımların karşılaştırılması	114
5.5.3.2. Rijitliklerin karşılaştırılması	116
5.5.3.3. Enerji tüketme kapasitesinin karşılaştırılması	119
5.5.3.4. Finansal maliyet karşılaştırması.....	122
5.6. Yığma Binaların Sayısal Sonuçları ve Karşılaştırılması.....	123
5.6.1. Donatısız yığma binanın sayısal sonuçları.....	123
5.6.2. Donatılı yığma binanın sayısal sonuçları.....	128
5.7. Yığma Binaların Sayısal Sonuçları ve Karşılaştırmaları	131
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	134
6.1. Sonuçlar	134
6.2. Öneriler	137
7. KAYNAKÇA.....	139

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$f_{m,min}$	: En Düşük Küp Basınç Dayanımı
f_{ck}	: Beton Karakteristik Basınç Dayanımı
$f_{b,c}$	: Tuğlanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı
MPa	: Megapascal
kN	: Kilonewton
f_k	: Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı
N_{Ed}	: Düşey Tasarım Kuvveti
N_{Rd}	: Düşey Yük Tasarım Dayanımı
f_d	: Duvar Basınç Dayanımı
λ	: Kapasite Azaltma Katsayısı
(h_{ef} / t_{ef})	: Narinlik Oranı
h_{ef}	: Dayanım Azaltma Katsayısı
V_{Rd}	: Tasarım Kesme Kuvveti Dayanımı
V_{Ed}	: Duvarın Kesme Kuvveti Dayanımı
M_{Ed}	: Tasarım Momenti
M_{Rd}	: Tasarım Dayanım Momenti
E_b	: Elastisite Modülü
φ_i	: Rijitlik
F	: Yük
δ_i	: Deplasman
$\$$	: ABD Doları
₺	: Türk Lirası

Kısaltmalar

TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TDY 2007	: Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007
TDY 1998	: Türkiye Deprem Yönetmeliği 1998
XFEM	: Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi
DP	: Drucker Prager
URM	: Donatısız Yığma
FEMA 273	: Amerika Birleşik Devletleri Federal Acil Durum Yönetim Ajansı
NZSEE	: Yeni Zelanda Deprem Mühendisliği Derneği
TS EN 1015-11	: Türk Standardı
TS EN 1052-1	: Türk Standardı
TS EN 772-1	: Türk Standardı
TS EN 1996-1-1	: Türk Standardı
TS EN 771-1	: Türk Standardı
TS EN 998-2	: Türk Standardı
TS EN 197-1	: Türk Standardı
TS 138	: Türk Standardı
TS 708	: Türk Standardı
TS 500-2	: Türk Standardı

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 1.1 Türkiye deprem tehlike haritası(AFAD, 2018)	1
Şekil 1.2 Türkiye İstatistik Kurumu 2024 Nüfus Yoğunluğu haritası (TÜİK, 2024)	1
Şekil 3.1 Yığma bina örneği	13
Şekil 3.2 Tuğla örnekleri (Url-1, 2024)	15
Şekil 3.3 Harman tuğla örneği	15
Şekil 3.4 Doğal taş örneği	16
Şekil 3.5 Kerpiç örneği	17
Şekil 3.6 Beton briket örneği	17
Şekil 3.7 Gaz beton blok örneği	18
Şekil 3.8 Harç örneği	18
Şekil 3.9 Taş yığma bina örneği (Tellioğlu ve Satıcı, 2023)	21
Şekil 3.10 Kerpiç bina örneği (Url-2, 2023)	21
Şekil 3.11 Tuğla yığma bina örneği (Url-3, 2022)	23
Şekil 3.12 Donatılı yığma bina örneği	23
Şekil 3.13 Kuşatılmış bina örneği (Url-4, 2021)	24
Şekil 3.14 Ytong taşıyıcı düşey paneli	25
Şekil 3.15 Kahramanmaraş'ta depremde hasar alan yığma bina (Yetkin, 2024)	26
Şekil 3.16 Deprem sonrasında yığma yapılarda meydana gelebilecek çatlak türleri (Arya, Boen ve Ishiyama, 2014)	29
Şekil 3.17 Yığma duvarlarda, yatay derzlere paralel yüklerin etkisi altında meydana gelen kırılma biçimleri (Moon, 2003)	29
Şekil 3.18 Duvarların birleşim noktalarında görülen düşey ya da diyagonal çatlaklar (Arun, 2005)	30
Şekil 3.19 Donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda, taşıyıcı duvarların desteklenmeden bırakılabilecek maksimum uzunlukları ile düşey hatıllar arasındaki mesafeler belirli sınırlar (TBDY,2018)	34
Şekil 3.20 Taşıyıcı yığma duvarlarda oluşturulacak kapı ve pencere açıklıklarına ilişkin uygulanması gereken tasarım kuralları (TBDY, 2018)	35
Şekil 3.21 Kuşatılmış yığma binalarda yatay ve düşey hatıllar (TBDY, 2018)	35
Şekil 3.22 Kuşatılmış yığma binalarda yatay hatıllar (TBDY, 2018)	36
Şekil 3.23 Donatılı yığma yapılarda taşıyıcı duvarların inşa edilme yöntemi	36
Şekil 3.24 Donatılı yığma binalarda yatay ve düşey hatıllar (TBDY, 2018)	37
Şekil 3.25 Donatılı panellerde betonarme hatıllara ve temele bağlantı detayları	38
Şekil 4.1 Donatısız ve donatılı yığma binaların mimari planı	40
Şekil 4.2 Yığma bina deney numunelerinin cephelerinden görünüşler	41
Şekil 4.3 Deney düzeneğinin 3D görünümü	41
Şekil 4.4 Yığma tuğla numunesi	42
Şekil 4.5 Tuğla numunelerinin basınç dayanımı testi	43
Şekil 4.6 Yığma tuğla harç malzemelerinin hazırlanışı	44
Şekil 4.7 Harç numunelerinin basınç dayanımı testleri	46
Şekil 4.8 Beton numunelerinin basınç dayanımı testleri	47
Şekil 4.9 Deney numuneleri temel planı teknik çizimi	49
Şekil 4.10 Temel kalıbının hazırlanması	50
Şekil 4.11 Deney numuneleri temel planı fotoğrafı	50
Şekil 4.12 Deney numuneleri temel beton dökümü	51
Şekil 4.13 Temel sabitleme tijlerinin görüntüsü	52
Şekil 4.14 Donatısız yığma bina duvar örülme işlemi	53
Şekil 4.15 Donatısız yığma bina lento üretimi öncesi ve sonrası.	53

Şekil 4.16 Donatısız yığma bina döşeme ve yatay hatıl kalıp ve donatı planı	54
Şekil 4.17 Hidrolik pistonu sabitleme plaka, somunları ve tijleri	55
Şekil 4.18 Beton dökümü işlemi.....	56
Şekil 4.19 Beton dökümü işlemi, numune alımı.....	57
Şekil 4.20 Beton dökümü sonrası sulama işlemi yapılmış numune	57
Şekil 4.21 Donatısız deney numunesinin beyaz renk ile boyanmış görünümü	58
Şekil 4.22 Donatılı yığma bina duvar örülme işlemi ve ekimi yapılmış donatılar	59
Şekil 4.23 Donatılı yığma bina duvar örülme işlemi ile yatay ve düşey donatıların montajı	60
Şekil 4.24 Donatılı yığma bina köşe donatı planı görseli	61
Şekil 4.25 Donatılı yığma bina donatı yerleşimi	62
Şekil 4.26 Donatılı yığma bina lento üretimi.....	63
Şekil 4.27 Donatılı yığma bina döşeme ile yatay hatıl kalıp ve donatı planı	64
Şekil 4.28 Beton dökümü öncesi hazırlanmış donatılı yığma deneyi numunesi	64
Şekil 4.29 Beton dökümü işlemi.....	65
Şekil 4.30 Beton dökümü işlemi, numune alımı.....	66
Şekil 4.31 Beton dökümü sonrası sulama işlemi yapılmış numune	67
Şekil 4.32 Donatılı deney numunesi beyaz renk ile boyanmış görünümü.....	68
Şekil 4.33 Deneylerde kullanılan potansiyometrik cetvel ve yük hücresi	69
Şekil 4.34 Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi	70
Şekil 4.35 Yükleme düzeneği	71
Şekil 4.36 SOLID65 elemanı geometrisi	72
Şekil 4.37 Üç boyutlu uzayda Willam-Warnke kırılma yüzeyi ve düzlemde Willam-Warnke kırılma yüzeyi Kömürcü, (2017).....	72
Şekil 4.38 Mikro modelleme tekniği	73
Şekil 4.39 Basitleştirilmiş mikro model tekniği.	73
Şekil 4.40 Basitleştirilmiş makro model tekniği.....	74
Şekil 4.41 ANSYS Statik analiz sistemi görünümü	74
Şekil 4.42 ANSYS kullanılan malzeme verileri-1	75
Şekil 4.43 ANSYS kullanılan malzeme verileri-2.....	76
Şekil 4.44 Yığma binaların geometrisi (ANSYS)	77
Şekil 4.45 S1 Numuneleri mesh kalite durumu	78
Şekil 4.46 Numunelerin statik analizi öncesi verilerin girilmesi.....	79
Şekil 5.1 Donatısız deney numunesindeki (S1) elemanların isimlendirilmesi	83
Şekil 5.2 S1 deney numunesinin deney öncesi görünümü.....	83
Şekil 5.3 S1 deneyi yatay yük-deplasman çevrimsel histeresis eğrileri	85
Şekil 5.4 4.çevrim sonrası genel görünümü.....	86
Şekil 5.5 4.çevrim döngüsü sonrası yakın görünüm.....	87
Şekil 5.6 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm-1	88
Şekil 5.7 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm-2	89
Şekil 5.8 6.çevrim döngüsü sonrası görünüm.....	90
Şekil 5.9 7.çevrim döngüsü sonrası görünüm.....	91
Şekil 5.10 8. çevrim bittikten sonra genel görünüm	92
Şekil 5.11 S1 numunesinin sol yan cephesinde deney sonu oluşan çatlakların görünümü.	94
Şekil 5.12 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-1.....	94
Şekil 5.13 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-2.....	95
Şekil 5.14 S1 deneyi Rijitlik azalımı grafiği.....	96
Şekil 5.15 İtme ve çekme yönünde ayrı ayrı çevrimlerin kümülatif enerji tüketimi	97
Şekil 5.16 S1 numunesinde tüketilen enerji-deplasman grafikleri	98

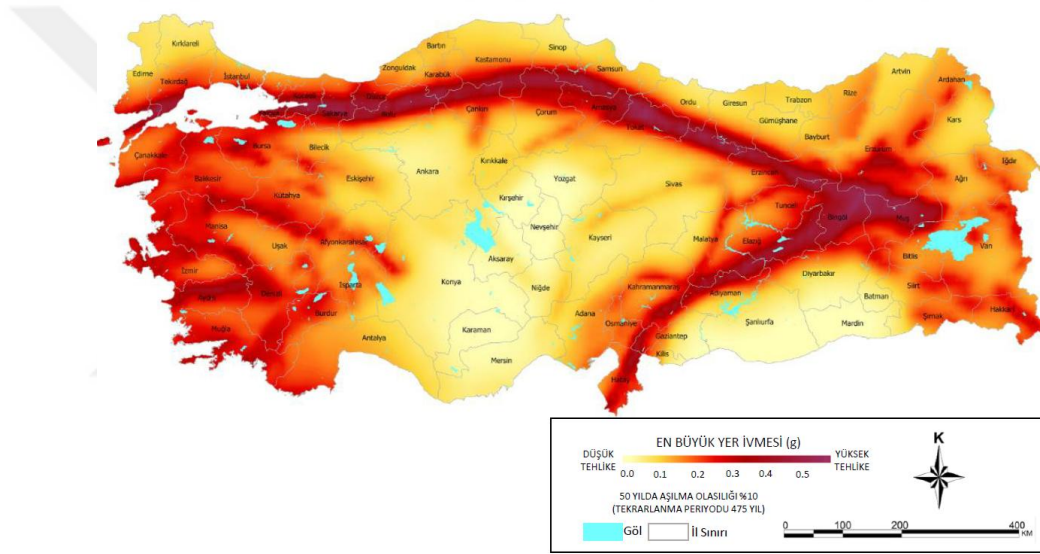
Şekil 5.17 Donatılı yığma yapı deney numunesindeki (S2) elemanların isimlendirilmesi	99
Şekil 5.18 S2 deney numunesin deney öncesi görünümü.....	99
Şekil 5.19 S2 deneyi yatay yük-deplasman çevrimsel histeresis eğrileri	101
Şekil 5.20 4.çevrim döngüsü sonrası yakın görünüm	102
Şekil 5.21 5.çevrim sonrası genel görünüm.....	103
Şekil 5.22 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm	104
Şekil 5.23 6.çevrim döngüsü sonrası görünüm	105
Şekil 5.24 7.çevrim döngüsü sonrası sol yan cepheden görünüm	106
Şekil 5.25 Bütün çevrim bittikten sonra sol yan cepheden genel görünüm.....	107
Şekil 5.26 S2 deney numunesinin sol yan cephesinde deney sonu oluşan çatlakların görünümü.	109
Şekil 5.27 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-1.....	109
Şekil 5.28 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-2.....	110
Şekil 5.29 S2 deneyi Rijitlik azalımı grafiği.....	111
Şekil 5.30 S2 deneyi tüketilen enerji-deplasman grafikleri	112
Şekil 5.31 İtme ve çekme yönünde ayrı ayrı çevrimlerin kümülatif enerji tüketimi	113
Şekil 5.32 Numunelerin yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri.....	114
Şekil 5.33 Kırılma yükleri kıyaslanması.....	115
Şekil 5.34 İtme yönünde(+) Deplasmanların kıyaslanması	115
Şekil 5.35 Çekme yönünde ön rijitliklerin kıyaslanması	116
Şekil 5.36 Numunelerin rijitlik eğrileri.....	118
Şekil 5.37 Kümülatif tüketilen enerjilerin kıyaslaması	119
Şekil 5.38 Numunelerin itme ve çekme çevrimlerinde kümülatif tükettiği enerji eğrileri	120
Şekil 5.39 Numunelerin kümülatif tükettiği enerji eğrileri.....	121
Şekil 5.40 Maliyet kıyaslaması	122
Şekil 5.41 S1 numunesinin çekme yönündeki analitik sonuçları	124
Şekil 5.42 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin penceredeki yakın görünümü	125
Şekil 5.43 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü.....	126
Şekil 5.44 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin 3D, sol yan ve sağ yan cephelerdeki görünümü	127
Şekil 5.45 S1 numunesinin itme yönündeki analitik sonuçları.....	128
Şekil 5.46 S2 numunesinin çekme yönündeki analitik sonuçları	129
Şekil 5.47 S2 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü.....	130
Şekil 5.48 S2 numunesinin itme yönündeki analitik sonuçları.....	130
Şekil 5.49 S2 numunesinin itme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü.....	131
Şekil 5.50 Analitik kıyaslaması	133
Şekil 6.2 S1 (donatısız) ve S2 (donatılı) numunelerine ait deney sonu çatlak oluşumlarının genel görünümleri.....	136

ÇİZELGELER TABLOSU

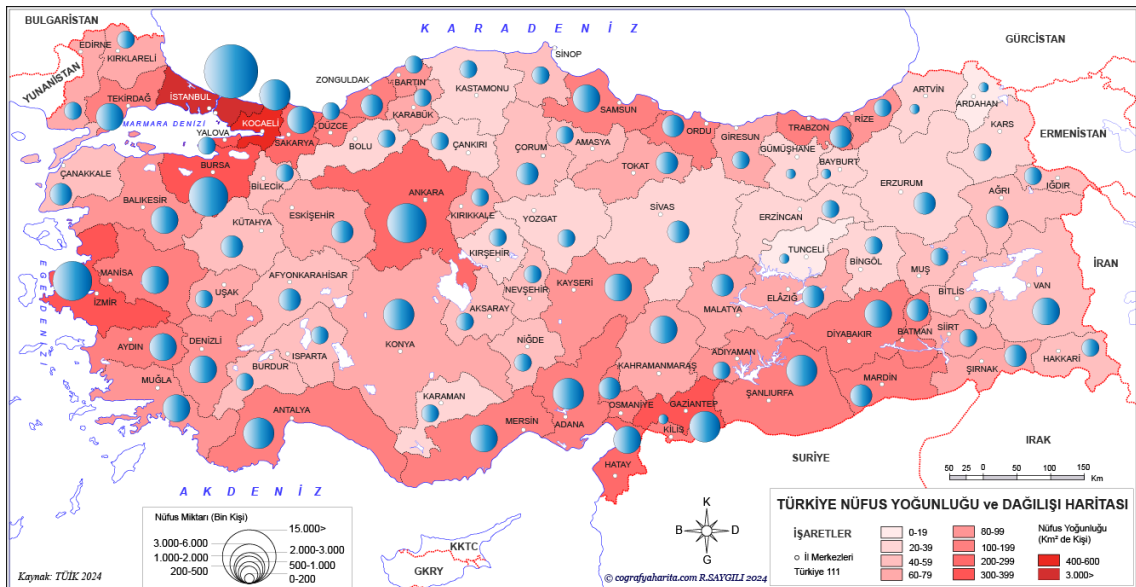
Çizelge 3.1 Yığma binalardaki çatlak düzeyleri (Bayülke, 1992).....	27
Çizelge 3.2 Kargir Birimlerin Delik Oranlarına Göre Gruplandırılması (TBDY, 2018).....	30
Çizelge 3.3 Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k , (MPa).....	31
Çizelge 3.4 Kesme kuvvetinin maksimum ve minimum değerlerine sahip duvarlarda uygulanması gereken şartlar (TBDY,2018).....	34
Çizelge 4.1 Tuğla basınç deneyi test sonuçları.....	43
Çizelge 4.2 Kullanılan çimentonun özellikleri	45
Çizelge 4.3 Harç kumunun granülometrik değerleri	45
Çizelge 4.4 Donatısız ve donatılı yığma duvarlardaki harçların basınç dayanımı	45
Çizelge 4.5 Deneylerde kullanılan betonun basınç dayanımları.....	47
Çizelge 4.6 B420C Nervürlü Çelik Donatı Mekanik Özellikleri.....	48
Çizelge 4.7 Yığma binalardaki malzemelerin genel özellikleri.....	49
Çizelge 4.8 S1 ve S2 Numuneleri mesh kalite durumu	78
Çizelge 5.1 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman verileri	84
Çizelge 5.2 S1 numunesinin çevrimleri ve gözlemlenen davranışlar	93
Çizelge 5.3 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman verileri	100
Çizelge 5.4 S2 numunesinde çevrimler sonucu gözlemlenen davranışlar.....	108
Çizelge 5.5 Yatay yük taşıma kapasiteleri ve deplasman değerleri.....	116
Çizelge 5.6 Başlangıç rijitlikleri	117
Çizelge 5.7 İlk çatlağın oluşumunda meydana gelen rijitlikler	117
Çizelge 5.8 Maksimum yükteki rijitlikler	117
Çizelge 5.9 Kümülatif enerji tüketim kapasiteleri	120
Çizelge 5.10 S1 ve S2 numunelerinde malzeme ve işçilik maliyet analizi	123
Çizelge 5.11 Yığma binaların sayısal sonuçları.....	132
Çizelge 5.12 Analitik ve deneysel çalışma kıyaslaması	133

1. GİRİŞ

Doğal afetler arasında yer alan depremler, büyük can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Ülkemiz, dünyanın en aktif ve tehlikeli deprem kuşaklarının üzerinde yer almakta olup, Türkiye toplam nüfusunun önemli bir kısmı, depremlerin daha yoğun olarak yaşandığı bölgelerde bulunmaktadır. Nüfus yoğunluğu ise her geçen gün deprem riski daha fazla olan bölgelerde artış göstermektedir. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de gösterildiği gibi daha koyu kırmızı renkli yerler daha çok riskli bölgeler ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu yerlerdir. Bu durum, depremlerin toplum üzerindeki etkisini artırmakta ve riskleri göz önünde bulundurmaya zorunlu kılmaktadır.



Şekil 1.1 Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2018)



Şekil 1.2 Türkiye İstatistik Kurumu 2024 Nüfus Yoğunluğu haritası (TÜİK, 2024)

Türkiye'de binaların yıkılmasının başlıca nedenleri arasında, depremler önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, binaların yıkılmasına veya hasar görmesine neden olan faktörlerin başında yapılardaki tasarım hataları ve işçiliklerdeki yetersizlikler gelmektedir.

Birçok bina, depremler nedeniyle yanlış tasarım ve uygulamalar yüzünden ekonomik ömrünü tamamlamadan yıkılmış, bu da canlıların hayatına ve ekonomiye büyük kayıplar oluşturmuştur. Bu kayıpları önlemek için, yıllar içinde binalarla ilgili tasarım kriterleri ve deprem yönetmelikleri oluşturulmuştur. Türkiye’de de son olarak, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) yürürlüğe girmiştir.

Türkiye’de yığma yapılar oldukça yaygındır. Bu yapılar çoğunlukla kırsal bölgelerde, eski yerleşim alanlarında ve tarihi nitelikte olan yapılardadır. Yığma yapıların tercih edilmesinin en önemli nedenleri arasında, malzemelerin kolay temin edilebilmesi, yapım maliyetlerinin düşük olması ve karmaşık teknolojik ekipman gerektirmeyen basit inşaat teknikleri ile inşa edilebilmesi yer almaktadır.

Yığma yapılar, taş, tuğla, briket ve gaz beton gibi yapı malzemelerinin harç kullanılarak üst üste dizilmesiyle oluşturulan ve bu duvar elemanlarının hem düşey hem de yatay yükleri taşıdığı yapılardır. Bu özellikleri sayesinde çeşitli iklim koşullarına ve zamanın yıpratıcı etkilerine karşı da direnç gösterebilen yapılardır.

Geçmişte inşa edilmiş ve günümüze kadar varlığını sürdüren yığma yapılar, tarih boyunca mimari ve mühendislik bilgisinin birer göstergesi olarak önemli kültürel ve tarihi değerler taşırlar. Bu tarihi yığma yapılar, bulundukları dönemlerin estetik anlayışını, teknolojik seviyesini ve yapı tekniklerini yansıtır.

TBDY-2018, farklı yapı malzeme ve teknikleri kullanılarak yığma yapıların inşa edilmesine olanak tanımıştır. Bu yönetmelik, depremlere dayanıklı yığma yapı türlerinin yapılmasını sağlamakta olup tasarım aşamasından statik hesaplarına kadar gerekli verileri sunmaktadır. TBDY-2018 11. bölümünde dört farklı yığma bina türünün inşasına izin verilmektedir: Bunlar Donatısız, Donatılı, Kuşatılmış ve Donatılı panel sistemli yığma yapılardır.

Bu çalışmada, Donatılı ve Donatısız yığma binaların farklı yükler etkisi altında gösterdiği davranışlar deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Laboratuvar ortamında, tek katlı, $3.2 \times 3.3 \times 3$ m boyutlarında ve tek açıklıklı olacak şekilde, 1/1 ölçekli donatılı ve donatısız yığma yapı numuneleri üretilmiş ve bu numunelere tersinir tekrarlanır yükleme uygulanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlemeler ise ANSYS paket programı kullanılarak yapılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel

verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, donatılı ve donatısız numune üretim süreçlerindeki yapım farklılıkları, karşılaşılan teknik zorluklar ve maliyetler açısından karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Yığma yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi, yapı mekaniğinin en karmaşık sorunlarından biridir. Bu yapılarının homojen olmayışı ve izotropik özellik göstermemesi, ayrıca mekanik özelliklerinin kullanılan malzeme ve işçilik kalitesine bağlı olması bu zorluğun temel nedenlerindendir. Ayrıca, yığma yapıların analitik olarak incelenmesi de malzeme özellikleri ve modelleme açısından birçok varsayıma ihtiyaç duyar.

Bu amaçla, tez çalışması kapsamında tam ölçekli bir yığma yapının deprem davranışının sayısal ve deneysel yöntemlerle ortaya konulması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda duvar malzemesi, bağlayıcı harç, yığma duvarlar ve genel olarak yığma yapılar üzerinde kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal bölümde ise çeşitli modelleme teknikleri ve yapısal analiz yazılımları kullanılarak çözümler yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile sayısal sonuçlar kıyaslanmıştır.

Çalışmanın hem malzeme bazında hem de tam ölçekli yapı deneyleriyle desteklenmiş olması; farklı modelleme teknikleri ve analiz yazılımları aracılığıyla sayısal incelemelerin yapılmış olması nedeniyle, yığma yapı davranışının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde giriş ve tezin amacı anlatılmıştır. Bu kısımda yığma yapıların kullanım şekilleri, Türkiye'nin depremselliği, TBDY 2018'de anlatılan yığma yapı türlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca tezin amacı detaylıca anlatılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümü, kaynak araştırmasını içermektedir. Birinci grupta yığma yapılar ile ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır. İkinci grupta ise yığma yapılar ile ilgili analitik olarak yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, yığma yapıların tarihsel gelişimi, tuğla, taş, gaz beton, harç gibi kullanılan malzemeler anlatılmıştır. Ayrıca kerpiç, tuğla, donatılı ve donatısız, donatılı panel, kuşatılmış gibi yığma bina türlerinden bahsedilmiş ve yığma yapıların deprem karşısındaki davranışı, hasar biçimleri ve tasarım ilkeleri anlatılmıştır.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, araştırmada kullanılan malzemeler ayrıntılı olarak tanıtılmış ve deneysel yönteme ilişkin uygulama adımları sistematik biçimde açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca, numune hazırlığı, deney düzeneği ve ölçüm yöntemlerine ilişkin teknik bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde ise, deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmuş, bu veriler grafik ve tablolarla desteklenerek yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmış, bulguların yapısal davranış üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise, araştırma süreci sonunda ulaşılan genel sonuçlara yer verilmiş ve bu sonuçlara dayalı olarak çeşitli öneriler sunulmuştur. Ayrıca, çalışmanın sınırlılıkları belirtilmiş ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik öneriler geliştirilmiştir.

2. KAYNAKÇA

2.1. Yığma Yapılar ile İlgili Yapılmış DeneySEL Çalışmalar

Bahadır ve Balık (2021) yaptıkları çalışmada, 1/6 ölçekli, tek katlı ve üç bölmeli prototip yığma yapılar, farklı duvar örgü tipleri kullanılarak üretilmiş ve sarsma tablası üzerinde sinüzoidal dinamik testlere tabi tutulmuştur. Aynı yer hareketi altında, numunelerin yer değiştirme ölçümleri görüntü işleme yöntemiyle, ivme değerleri ise ivmeölçerler ile belirlenmiştir.

Döndüren (2008) yaptığı çalışmada, laboratuvar ortamında aynı geometrik özelliklere sahip iki adet 1/1 ölçekli yığma duvar prototipi oluşturulmuştur. Bu prototiplerden biri, harman tuğlası ile normal harç kullanılarak üretilmişken, diğeri Sikalatex kimyasal katkı malzemesi ile güçlendirilmiş bir harç ile inşa edilmiştir. Her iki duvar modeli, basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

Döndüren ve Kollu (2018) yaptıkları çalışmada, son 15 yılda Türkiye’de gerçekleşen depremlerde yığma yapılarda oluşan hasarlar, çökme nedenleri ve çözüm önerileri fotoğraflarla desteklenerek analiz edilmiştir. Amaç, gelecekteki depremlerde, özellikle kırsal bölgelerdeki yığma yapıların hasarlarını en aza indirerek can ve mal kayıplarını azaltmaktır.

García ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, tuğla yapıların sismik dayanıklılığını değerlendirmek için deneysel testlere dayalı bir hasar modeli kullanarak etkili malzeme özellikleri tanımlamakta ve bu özelliklerle tuğla duvarlarının davranışını makro-model yaklaşımıyla incelemekte, Ekvador'un Cuenca şehrindeki gerçek örnekler üzerinden doğrulamaktadır.

Saberi (1998) yaptığı tez çalışmasında yükseklik/genişlik oranı 1’den büyük olan boşluklu (kapı boşluklu) yığma duvarların deprem koşullarındaki davranışları incelenmiştir. Bu araştırmada, duvarların yükseklik/genişlik oranlarının deprem davranışları üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Çalışma, yarı-statik deney yöntemini kullanarak gerçekleştirilmiş ve duvarlar, sabit bir düşey yük altında düzlem içi yüklemeye maruz bırakılmıştır.

Thamboo ve Dhanasekar (2016) yaptıkları çalışmada, ince tabaka polimer harçlı beton yığma panellerin kesme-basınç birleşik etkisi altındaki davranışını deneysel olarak incelemektedir. Çalışma kapsamında, beş farklı yatak derzi yöneliminde toplam otuz adet panel üretilmiş ve düşey basınç altında test edilerek her bir yatak derzinde sıfırdan

sonsuzu kadar değişen basınç/kesme oranları elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda taşıma kapasitesi ve şekil değiştirme özellikleri değerlendirilmiştir. Geleneksel 10 mm kalınlığındaki çimento harçlı yığma yapılardan farklı olarak, ince tabaka polimer harçlı beton yığma paneller, kesme–basınç etkileşimi altında hem blok hem de harcın katıldığı birleşik bir göçme mekanizması sergilemiştir. Ancak, geleneksel yığma sistemlerde olduğu gibi, bu sistemde de taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışı, yatak derzinin uygulanan yüke göre yönelimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çalışmada ayrıca, elde edilen deneysel veriler literatürde yer alan farklı yığma sistemleri üzerinde yapılan kesme–basınç testlerinin sonuçları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, ince tabaka harçlı beton yığma sistemlerinin geleneksel yığma yapılara kıyasla daha izotropik (yön bağımsız) bir mekanik davranış eğilimi gösterdiğini, oysa geleneksel sistemlerin daha belirgin şekilde ortotropik (yön bağımlı) özellik sergilediğini ortaya koymaktadır.

Yıldızoğlu ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, Bayburt'ta 1944-1947 yılları arasında inşa edilen Korkut Ata Lisesi'nin yapım tekniği, malzeme özellikleri ve mevcut problemleri incelenerek StatiCAD-Yığma programı ile 2007 Deprem Yönetmeliği (TDY 2007) ve 2013 Riskli Yapılar Yönetmeliği (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013) çerçevesinde yapının performans analizi gerçekleştirilmiştir.

2.2. Yığma Yapılar ile İlgili Yapılmış Sayısal Çalışmalar

Abdulla, ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, plastisite tabanlı kurucu modeller ile genişletilmiş sonlu elemanlar yönteminin (XFEM) bir araya getirildiği basitleştirilmiş bir mikro model yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşımın, monotonik düzlem içi, düzlem dışı ve döngüsel yükler altında duvarın üç boyutlu doğrusal olmayan davranışını simüle etmede etkili olduğu gösterilmiştir. Kurucu modeller, duvar derzlerinin elastik ve plastik davranışını yakalamak için yüzey tabanlı kohezif davranış ve duvarın ezilmesini simüle etmek için Drucker Prager (DP) plastisite modelini içermektedir. XFEM'in, çatlak yerinin önceden tanımlanmasına gerek olmaksızın, duvar birimleri içindeki çatlak yayılımını simüle etmedeki yeni kullanımı detaylandırılmıştır. Analiz, kullanıcı tanımlı alt rutinler olmadan bir Newton Raphson algoritması ile çözümlenmiş ve standart sonlu elemanlar yazılımı Abaqus (Dassault Systèmes, 2015) kullanılmıştır. Modelin, düşey ve yatay yükler altında duvarın doğrusal olmayan davranışını ve hasar modlarını yakalama yeteneği, çeşitli yayınlanmış deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak kanıtlanmıştır.

Adhikari ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, mühendislik hizmeti almamış yığma yapı tipolojilerine yönelik olarak, Uygulamalı elemanlar yöntemi (Applied Element Method - AEM) esas alınarak gerçekleştirilen bir sismik analiz ve göçme olasılığı değerlendirme prosedürünü sunmaktadır. Rijit diyaframlara sahip yapılara kıyasla, esnek diyafram davranışı gösteren yığma yapılarda kutu benzeri bütüncül davranış sergilenmemesi, geleneksel itme analizine dayalı değerlendirme yöntemlerinin uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu kapsamda çalışma, farklı diyafram türlerinden bağımsız olarak uygulanabilecek, doğrusal olmayan bir itme analizi yöntemini tanıtmaktadır. Yöntemde, artan yer ivmesi uygulanmakta ve yatay taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde uygun mühendislik talep parametreleri dikkate alınmaktadır. Devamında, yapıların hem düzlem içi hem de düzlem dışı göçme mekanizmalarını kapsayacak şekilde güvenilir bir sismik performans değerlendirme ve göçme olasılığı analiz yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, Himalaya kuşağında ve benzeri bölgelerde yaygın olarak karşılaşılan farklı sismik detaylandırma düzeylerine sahip donatısız ve sınırlandırılmış yığma okul binalarına uygulanarak test edilmiştir.

Aydemir (2010) yaptığı çalışmada, tuğla duvarlı yığma yapıların deprem performansını değerlendirmeye yönelik yenilikçi bir yöntem geliştirilmiştir. ANSYS simülasyon programı aracılığıyla sonlu eleman analizleri uygulanarak, yığma yapılardaki düşey elemanların performans limitleri ve kapasite eğrileri belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yığma yapıdaki tüm bileşenlerin etkilerini bir araya getirerek, yapının genel performans değeri ve kapasite eğrisinin oluşturulmasını sağlamıştır.

Bayülke (1978, 1992, 2011) tarafından gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda, yığma binaların deprem kuvvetleri etkisi altındaki davranışları ve güvenlik düzeyleri incelenmiş; bu kapsamda tuğla yığma binalar, betonarme yapıların dolgu duvarları gibi farklı konular ele alınmıştır. Yığma binalar üzerine yoğunlaşan bu çalışmalar, ülkemizde bu alanda gerçekleştirilen önemli akademik katkılar arasında yer almaktadır. Çalışmaların yığma yapılarla ilgili bölümlerinde, yığma bina türleri, deprem etkisiyle ortaya çıkan hasar biçimleri ve depreme dayanıklı yığma bina tasarım ilkeleri gibi temel konulara değinilmiştir.

Döndüren ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, Edirne ilinde 15. ve 16. yüzyıllarda inşa edilen Tütünsüz Baba Türbesi'nin mekanik davranışları incelenmiştir. Yapının mevcut durumu, statik analizler yoluyla değerlendirilmiş ve taşıyıcı sistemin performansı belirlenmiştir. Türbe, SAP2000 V18 (Computers and Structures Inc., 2015) sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş ve çeşitli yükleme

senaryoları altında oluşan iç kuvvetler ile gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Elde edilen gerilmelere bağlı olarak yapıda meydana gelen deformasyonlar belirlenmiş ve bu değerlerin malzemenin emniyet gerilmesi sınırlarını aşıp aşmadığı analiz edilmiştir. Analiz sürecinde, sonlu elemanlar yöntemi çerçevesinde makro modelleme yaklaşımı benimsenmiş ve bu kapsamda türbenin yapısal davranışı detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları doğrultusunda, türbede oluşan asal gerilmeler yorumlanmış ve statik açıdan yapının taşıyıcılık kapasitesi ortaya konulmuştur. Bu çalışma, tarihi yığma yapıların mühendislik temelli değerlendirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Güner ve Nuhoğlu (2022) yaptıkları çalışmada, yığma yapıların düzlem içi hasar mekanizmalarının ve nihai taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde, yalnızca eksenel kuvvet taşıyan çubuk elemanlardan oluşan eşdeğer bir kafes model önerilmiştir. Yöntem, geleneksel ve ayrıntılı modelleme yaklaşımlarına kıyasla daha yalın bir çözüm sunmakta olup, doğrusal olmayan analizler aracılığıyla dış yüklemeler altında oluşabilecek hasar bölgeleri ve maksimum taşıma kapasiteleri tahmin edilebilmektedir. Modelin doğruluğu, daha önce literatürde incelenmiş yığma yapılar üzerinde yapılan uygulamalarla sınanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapının süneklik davranışını tam olarak yansıtamamakla birlikte, hasar dağılımı ve taşıma kapasitesi açısından yeterli bir doğruluk seviyesi sunduğu gözlemlenmiştir. Bu yönüyle, önerilen eşdeğer kafes model yaklaşımı, mevcut karmaşık modelleme tekniklerine alternatif olarak değerlendirilebilecek, pratik ve uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Kömürcü (2017) yaptığı çalışmada, yığma duvarların önemi ve araştırmanın hedefleri belirtilmiştir. İkinci bölümde, yığma duvarların tarihi, yapı bileşenleri, malzeme özellikleri ve mekanik davranışları ele alınmıştır. Ayrıca, yığma duvarların sınıflandırılması yapılmış ve elastisite modülünün belirlenmesine yönelik çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, yığma duvarların modellemesinde kullanılan heterojen ve homojen teknikler araştırılmış; mikro ve makro modelleme yöntemlerinin yanı sıra malzeme modelleri ve kırılma varsayımları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, ANSYS yazılımı kullanılarak yığma duvarların analizi yapılmış, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde, boşluk içeren bir yığma duvarın modeli oluşturulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Boşluklu yığma duvarın geometrik ve malzeme özellikleri ile düzlem içi yükler altındaki davranışı incelenmiş, elde edilen sonuçların deneysel bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür.

Majid ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, uzunluk ve yükseklikleri farklı 4 yığma duvar, Abaqus (Dassault Systèmes, 2015) sonlu elemanlar programı ile model edilerek düşey çelik donatılarla güçlendirilen modellerde çatlak gözlemi, kopma kuvvetleri ve göçme durumu incelenmiş, duvar boy/yükseklik oranının 1'den küçük, büyük veya eşit olduğu durumlarda çeşitli hasarlar gözlemlenirken, düşey çelik donatı kullanımının yanal yüklere karşı olumlu etkileri belirlenmiştir.

Shariq ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, farklı en-boy oranlarına sahip ve çeşitli duvarlarında değişik konumlarda açıklıklara sahip olan, yön değiştiren sismik kuvvetlere maruz kalan tek katlı, tek odalı bir yığma yapı için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik analizde tepki spektrumu yöntemi uygulanmıştır. Yığma duvarların performansını değerlendirmek amacıyla, en kritik iki parametre olan maksimum ana çekme gerilmesi ve maksimum kesme gerilmesinin değişim dinamikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, açıklıkları olan bir odanın duvarlarında maksimum gerilmelerin gelişimi için sismik kuvvetin kritik yönünün odanın kısa duvarı boyunca olduğunu ve kesme duvarlarında meydana gelen maksimum çekme gerilmesi ile maksimum kesme gerilmesinin genellikle yapının en-boy oranı arttıkça yükseldiğini, ayrıca açıklıkların konumunun bu gerilmelere önemli derecede etki ettiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, maksimum ana çekme gerilmesinin kısa duvarda, maksimum kesme gerilmesinin ise uzun duvarda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Xie, ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, antik Çin pagodalarını temsil eden tuğla ölçekli duvar numunelerinin düzlem içi döngüsel yüklemeye tabi tutularak sismik davranışları incelenmiştir. Farklı kemerli açıklık boyutlarına sahip beş adet ½ ölçekli duvar numunesi, yıkılmış bir binadan toplanan yaşlı yanmış kil tuğlaları ve yapışkan pirinç harcı kullanılarak geleneksel olarak inşa edilmiştir. Duvar numunelerinin mukavemeti, sertliği, sünekliği ve enerji dağıtma kapasitesi analiz edilmiştir.

2.3. Deneysel ve Sayısal Çalışmalar

Choudhury ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, Hindistan'da inşa edilen donatısız yığma (URM) yapıların sismik davranışını değerlendirmek amacıyla hem deneysel hem de sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Üç farklı açıklık konfigürasyonuna sahip tam ölçekli yığma duvarlar ve bunların birleştirilmesiyle oluşturulan tek odalı bina, yavaş çevrimli yatay yükler altında test edilmiştir. Sayısal analizlerde iki farklı sonlu eleman modeli kullanılmış; biri izotropik hasar plastikliği yaklaşımına, diğeri ise iki aşamalı

homojenleştirme tekniğine dayanmaktadır. Sonuçlar, önerilen homojenleştirme yaklaşımının hem taşıma kapasitesini hem de çatlak desenlerini yüksek doğrulukla tahmin ettiğini ve URM yapıların güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesinde etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

Doran ve diğ. (2025) yaptıkları çalışmada, çift cidarlı traverten taş yığma duvarların, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmesi durumunda sergilediği yapısal davranışlar incelenmiştir. Bu kapsamda, İngiliz bağı (English bond) olarak adlandırılan, baş ve yan taş sıralarının dönüşümlü yerleştirildiği bir örüntüyle inşa edilen iki adet traverten taş yığma duvar numunesi üretilmiş ve bu numuneler, düzlem içi monoton yatay yük ile sabit eksenel yük altında test edilmiştir. Deneysel süreçte elde edilen yatay yük-yer değiştirme ilişkileri ve hasar mekanizmaları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, taş, harç, enjeksiyon harcı ve taş-harç kompozitlerine ait üç eksenli basınç testleri gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri belirlenmiştir. Sayısal modelleme kapsamında, güçlendirilmemiş ve sırasıyla enjeksiyon harcı ve CFRP ile güçlendirilmiş duvarlar için, üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yapılmış, analizlerde Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelleme yaklaşımının hem güçlendirilmiş hem de güçlendirilmemiş duvarların düzlem içi yatay yük-altında gösterdiği davranışları ve çatlak oluşum düzenlerini başarılı bir şekilde simüle edebildiğini ortaya koymuştur.

Huang ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, püskürtme harçla güçlendirilmiş URM duvarlara uygulanan çevrimsel tek eksenli basınç deneyleri ile sonlu elemanlar (FEA) analizlerini bir arada değerlendirerek bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır. Elde edilen deneysel veriler, sayısal modellerin kalibrasyonunda kullanılmış; bu modeller aracılığıyla farklı parametreler değerlendirilerek daha geniş kapsamlı sonuçlara ulaşılmıştır. Oluşturulan hasarlanabilir sonlu eleman modeli, yapının elastik olmayan davranış evresinin incelenmesi açısından da önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır. Çalışma bulgularına göre, püskürtme harçla güçlendirilmiş birleşik duvarların basınç dayanımı, genellikle püskürtme katmanının kalınlığı arttıkça yükselmekte ve yığma duvarlardaki yapım kusurlarını kısmen telafi edebilmektedir. Ancak, çok ince harç tabakalarının kullanımı, birleşik duvarın elastik davranış aralığını daraltmakta ve bu durum kalınlık arttıkça dengelenmektedir. Püskürtme kalınlığındaki artış genellikle nihai taşıma kapasitesine olumlu katkı sunarken, katmanın aşırı incilmesi durumunda bu katkı negatif yönde olabilmektedir. Ayrıca, çift taraflı püskürtme uygulamasının nihai dayanım

üzerindeki etkisi sınırlı kalmakla birlikte, duvarın elastik modülünde belirgin bir iyileşme sağlamaktadır.

Hwang ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, açıklıkların varlığını dikkate alarak donatısız yığma duvarların düzlem içi yatay yük taşıma kapasitesini tahmin eden matematiksel modeller geliştirmektedir. Kaya gibi devrilme, taban ezilmesi, kayma ve diyagonal kesme çatlağı gibi farklı göçme mekanizmaları temel alınarak, betonun elastisite ve plastiklik kuramlarına dayalı olarak denklemler türetilmiştir. Geliştirilen modeller, özellikle kapı ve pencere açıklıklarının göçme mekanizmaları üzerindeki etkilerini dikkate alarak mevcut FEMA 273 (FEMA, 1997) ve NZSEE (NZSEE, 2017) yönetmeliklerinden daha doğru sonuçlar vermiştir. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar, önerilen modellerin açıklık bulunan ve bulunmayan duvarlar için yatay yük kapasitesini yüksek doğrulukla öngördüğünü göstermektedir.

Kayırğa (2017) yaptığı çalışmada, yığma yapıların deprem performansını anlamak amacıyla hem deneysel hem de analitik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmalar, malzeme özelliklerinin ve yapı davranışlarının incelenmesi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Malzeme analizlerine, yığma duvarı oluşturan harç, blok ve duvar parçaları üzerinde yapılan testlerle başlanmıştır. Yapı davranışı analizi için ise 3m x 3m x 3m ölçülerinde, 1/1 ölçekli, çeşitli boşluklara sahip üç model üretilmiştir. Bu modeller, tersinir yatay yük uygulamasına maruz bırakılmış ve deney sürecinde yük ve deformasyon verileri sistematik olarak kaydedilmiştir. Analitik çalışmalar da malzeme özellikleri ve yapı davranışları üzerine iki aşamadan oluşmaktadır. Malzemelerle ilgili deneyler, daha önce belirtildiği gibi yığma duvarını oluşturan harç, blok ve duvar parçaları üzerinde yapılmıştır. Yapı davranışları üzerine yapılan analizler, SAP2000 ve ANSYS gibi sonlu elemanlar yöntemini kullanabilen yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen üç farklı yığma yapı planı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde makro modelleme tekniği benimsenmiştir. Sonuç olarak, deneyler, yapıların yük kapasitesinin %77'sine kadar lineer bir davranış sergilediğini, %88 oranında yükte hasarların başlamasıyla birlikte yapının lineer davranıştan sapmaya başladığını ve en yüksek yük altında oluşan çatlaklarla göçme öncesi duruma ulaştığını göstermiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda yığma yapıların deprem davranışları değerlendirilmiş ve çeşitli öneriler sunulmuştur.

Kıpçak ve Erdil (2023) yaptıkları çalışmalarında, tuğla yığma duvarların düzlem dışı davranışları deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmiştir. Düzlem dışı ana duvara dik destek duvarların ve bu duvarlardaki kapı-pencere açıklıklarının etkileri

araştırılmıştır. Harman tuğlasından üretilen $\frac{1}{2}$ ölçekli duvarlar, harç kullanılmadan tek yönlü eğilme masasında test edilmiştir. Toplamda 4 U ve 3 L geometrisinde 7 farklı model incelenmiş ve her model için 3 deneme yapılmıştır. Duvarlar, Abaqus (Dassault Systèmes, 2015) yazılımında sürtünme esaslı mikro modelleme ile modellenmiş ve itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yan duvarların ana duvarın rijitliğini ve yatay yük kapasitesini artırdığını, ancak açıklıkların her iki duvarın rijitliğini azalttığını göstermektedir.

Nikooravesh ve Soltani (2021) yaptığı çalışmada, tarihi tuğla yığma duvarların sismik performansını artırmak amacıyla geliştirilen "centercore" güçlendirme yöntemini deneysel ve analitik olarak incelemektedir. İran'daki geleneksel malzemelerle inşa edilen iki duvar örneği, tersinir çevrimsel yatay yükler altında test edilmiş ve centercore yönteminin taşıma kapasitesini %64, enerji sönümleme kapasitesini ise %113 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel verilere dayanarak, kaya gibi devrilme, taban ezilmesi ve diyagonal çatlak mekanizmaları için analitik modeller geliştirilmiş, bu modellerin doğruluğu mevcut deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, hem yüzey kaplaması gerektirmeyen hem de tarihi estetiği koruyan centercore yönteminin yığma yapıların deprem güvenliğini artırmada etkili bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Tripathy ve Singhal, (2024) yaptıkları çalışmada, açıklıkların yığma duvarların düzlem içi taşıma kapasitesi üzerindeki olumsuz etkilerini incelemek amacıyla dört adet yarı ölçekli yığma duvar numunesi üzerinde çevrimsel yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneysel sonuçlar, özellikle kapı açıklığı bulunan duvarlarda açıklık çevresindeki yığma elemanlarda ciddi hasarlar oluştuğunu ve taşıyıcı tamamen ayrıldığını, bunun da kapasitede %25'in üzerinde azalmaya yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, açıklık boyutu ve konumu ile malzeme ve geometrik özelliklerin etkisini değerlendirmek üzere parametrik doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yürütülmüştür. Analitik sonuçlara dayanarak, açıklık tipine bağlı kapasite azalımını öngören basitleştirilmiş bir denklem önerilmiş ve bu modelin, farklı açıklık tiplerine sahip duvarlar için güvenilir ve tutarlı tahminler sunduğu gösterilmiştir.

3. YIĞMA YAPILAR

Yığma birimler ve bu birimleri bir arada tutan harç, birlikte kompozit bir malzeme meydana getirir. Bu kompozit malzeme, genel olarak "yığma" terimiyle tanımlanmaktadır. Bu bölümde, yığma malzeme kullanılarak inşa edilen yığma duvarlar hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. Bu bağlamda, yığma duvarların kısa tarihçesi ele alınmış, yığma duvarları oluşturan malzemeler incelenmiş, kullanılan yığma duvar türleri tanıtılmış ve yığma duvarların mekanik davranışları açıklanmıştır.

3.1. Yığma Yapıların Tarihsel Gelişimi

Yığma duvarlar, tarih boyunca birçok yapının temel taşıyıcı elemanları olarak önemli bir rol oynamıştır. İlk olarak, insanoğlu barınma ihtiyacını karşılamak amacıyla ağaç ve saman gibi dayanıklı olmayan malzemeleri kullanmıştır; ancak zamanla taş ve mermer gibi daha dayanıklı malzemelere yönelmiştir. İnşa edilen ilk yapılar, büyük ve kaba taşların üst üste konulmasıyla, bağlayıcı bir malzeme kullanmadan oluşturulmuştur. Antik Roma ve Bizans dönemlerinde, taş işçiliği alanında belirgin bir ilerleme kaydedilmiştir. Şekil 3.1’de yer alan İstanbul surları, bu gelişimin güzel bir örneğini teşkil etmektedir. Ardından, Osmanlı döneminde ise mermer ve taş sanatında dikkate değer eserler ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.1 Yığma bina örneği

Taş blokların ağır ve hacimsel olarak yer kaplayan özellikleri, yapı inşasında alternatif malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini gündeme getirmiştir. Bu bağlamda, topraktan elde edilen kil malzemeleri, pişirilerek tuğla şekline dönüştürülmüştür. İlk dönemlerde, taşlar arasındaki bağlantı için çamur gibi bağlayıcı maddeler kullanılırken, daha sonraki dönemlerde taşların bir araya getirilmesinde harç kullanımı ile yığma yapılar inşa edilmiştir. İlerleyen zamanla birlikte çeşitli diğer malzemeler de yığma duvarların inşasında kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde ise kırsal bölgelerde genellikle tek katlı yapılar, şehir merkezlerinde ise sıklıkla çok katlı yığma yapılar gözlemlenmektedir. Çatı sistemleri açısından, köy yerleşimlerinde toprak dam, taşıyıcı ahşap makaslar üzerinde kiremit, şehir merkezlerinde ise genellikle beton plak uygulamaları tercih edilmektedir.

3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Yığma yapı elemanları, belirli boyutlardaki tuğla, kerpiç, taş, briket, gaz beton veya beton blokların harç ya da diğer bağlayıcı malzemeler ile bir araya getirilmesi sonucunda oluşan, tek bir bütün olarak işlev gören yapı bileşenleridir. Yığma duvarların inşasında, duvarı oluşturan bu yığma birimlerin yanı sıra, ahşap ve metal gibi diğer yardımcı elemanlar da kullanılmaktadır. Genellikle daha çok kullanılan malzemeler bu başlık altında incelenmiştir.

3.2.1. Tuğla

Tuğla, genellikle kil ya da diğer doğal hammaddelerin belirli bir sıcaklıkta pişirilmesiyle üretilen, yapı malzemesi olarak kullanılan düz, dikdörtgen prizma şeklindeki bir yığma birimdir. Tuğla, dayanıklılığı, mekanik özellikleri ve estetik görünümü nedeniyle inşaat sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Farklı türleri ve boyutları bulunan tuğlalar, yapıların duvar, zemin ve diğer elemanlarının inşasında kullanılmakta olup, çeşitli yapı sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Şekil 3.2).

Tuğlanın özellikleri, inşaat malzemesi olarak kullanılabilirliğini belirleyen önemli kriterlerdir. Tuğla, homojen bir yapıya sahip olmalı ve düşük porozite ile ince taneli olmalıdır. Üretim sürecinde düzgün bir şekilde kalıplanmış olması, kenar ve yüzeylerinin düzgünlüğü açısından kritik öneme sahiptir; ayrıca çatlak, yarık ve boşluklar içermemelidir. Yanık bir durumda olmamalıdır ve 1.50 metre yükseklikten sert bir

zemine bırakıldığında, iki parçadan fazla ayrılmamalıdır. Üzerine çekiçe vurulduğunda, tiz ve berrak bir ses çıkarması beklenmektedir. Ek olarak, su içerisinde 12 saat bekletildiğinde, tuğlanın ağırlığının %20'sinden fazla su emmemesi gerekmektedir(Türkçü, 1997).



Şekil 3.2 Tuğla örnekleri (Url-1, 2024)

3.2.2. Harman tuğlası

Harman tuğlası, genellikle toprak, çamur veya diğer doğal hammaddelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, el işçiliğiyle şekillendirilip kurutulduktan sonra pişirilen bir yapı malzemesidir. Bu tür tuğlalar, özellikle düşük maliyetli konut inşaatlarında ve çevre dostu yapılar inşa etme amaçlı projelerde tercih edilmektedir. Harman tuğlası, iyi ısı yalıtım özellikleri, nem dengeleme kapasitesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sunarken, aynı zamanda estetik bir görünüm de sağlar. Geleneksel yapım yöntemleri ve malzeme bileşimi, harman tuğlasının mekanik dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü etkileyen önemli faktörlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Harman tuğla örneği

3.2.3. Doğal taş

Doğal yığma taşı, doğada bulunan ve genellikle granit, bazalt, kireçtaşı veya diğer sert mineral bileşenlerden oluşan, yapısal ve dekoratif amaçlar için kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu taşlar, doğal süreçler sonucu oluşan, yerel kaynaklardan elde edilen ve

genellikle işlenmeden veya minimum işleme ile inşaat projelerinde kullanılan malzemelerdir. Doğal yığma taşları, yüksek basınç dayanıklılığı, uzun ömürlülük ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajlar sunar. Ayrıca, estetik çeşitliliği sayesinde mimari tasarımda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından da tercih edilen bir malzeme olan doğal yığma taşı, enerji verimliliği ve doğal kaynakların korunması açısından önemli bir rol oynamaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Doğal taş örneği

3.2.4. Kerpiç

Kerpiç yapıların tarihi, insanlık tarihindeki ilk yerleşimlere kadar uzanır. İlk kerpiç binalar, Mezopotamya, Mısır ve Anadolu gibi bölgelerde ortaya çıkmıştır. Bu coğrafyalarda kil, saman ve su gibi yerel malzemelerden yapılan kerpiç, kolay bulunabilirliği ve işlenebilirliği nedeniyle tercih edilmiştir.

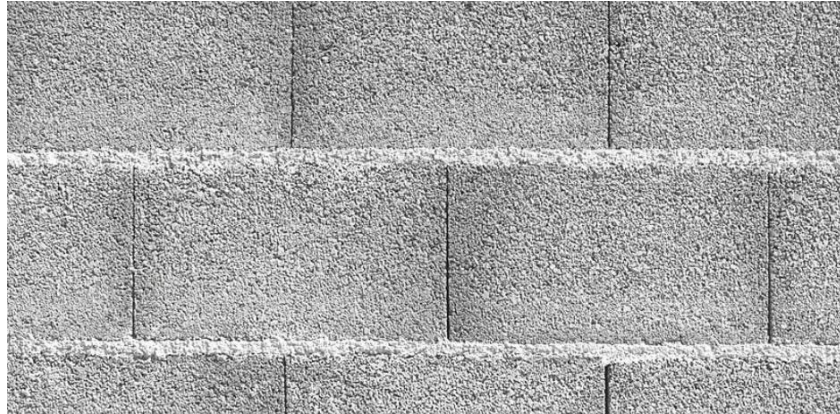
Kerpiç, genellikle toprağın, suyun ve organik materyallerin (örneğin saman veya ot) karıştırılmasıyla elde edilen, el ile şekillendirilip güneşte kurutularak oluşturulan bir yapı malzemesidir (Şekil 3.5). Geleneksel inşaat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan kerpiç, iyi ısı yalıtım özellikleri, nem dengeleme kapasitesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlar sunar. Kerpiç yapılar, düşük maliyetli konut inşaatında ve yerel kaynakların kullanımıyla çevre dostu projelerde sıkça tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kerpiç yapılar, suya dayanıklılık gibi bazı sınırlamalara sahip olabileceğinden, iklim koşullarına ve yerel uygulamalara göre dikkatli bir şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 3.5 Kerpiç örneği

3.2.5. Beton briket

Beton briket, duvar inşasında kullanılmak üzere doğal ve/veya yapay agregalar, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddeleri kullanılarak üretilen bir yapı malzemesidir (Şekil 3.6). Anma yüksekliği en fazla 135 mm olan bu briketler, dolu veya boşluklu formlarda çeşitli basınç dayanımlarına sahip olarak imal edilmektedir (Çöğürçü, 2007).

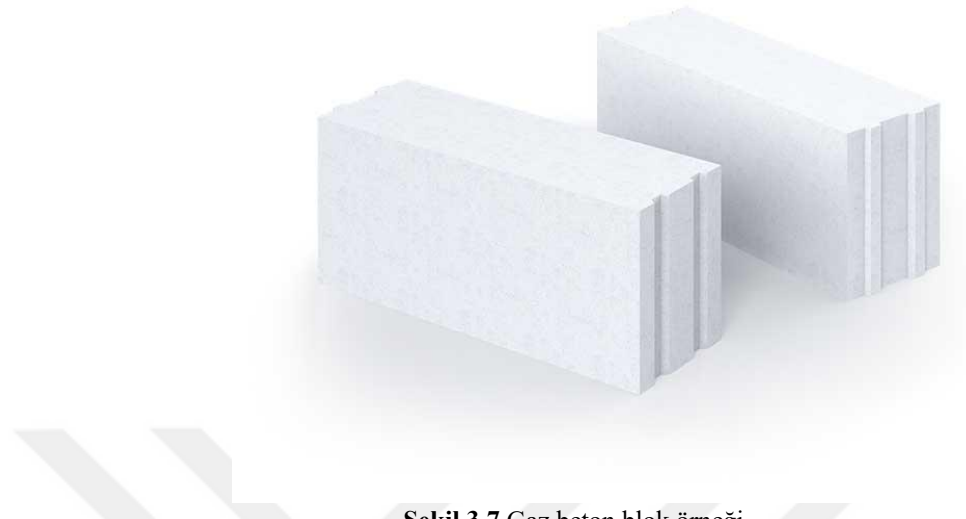


Şekil 3.6 Beton briket örneği

3.2.6. Gaz beton

Gaz beton, ince öğütülmüş silisli agrega ve inorganik bağlayıcı maddeler (kireç ve/veya çimento) ile hazırlanan karışıma, gözenek oluşturu bir maddenin eklenmesi ve

buhar kürü uygulanmasıyla elde edilen hafif, gözenekli bir betondur (Büyükcın, 2018). Gaz beton blok örneği Şekil 3.7’te gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Gaz beton blok örneği

3.2.7. Harç

Harç, yığma blokların birbirleriyle bağlantısını sağlamak amacıyla kullanılan bir yapı malzemesidir. Harç karışımı, kum, çimento veya kireç ile suyun bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. Tarihsel olarak, ilk tuğla yığma birimlerinin topraktan yapılmış olması nedeniyle, bu yapıların inşasında kullanılan harç da çamur ve ağaç parçalarının bir araya getirilmesiyle geliştirilmiştir. Daha sonra, Bizans döneminde, kireç, kum ve su karışımının kullanılmasıyla daha dayanıklı bir harç türü elde edilmiştir. Tarihi yığma duvarlarda "horasan harcı" olarak bilinen yapı, tuğla ve kiremit gibi malzemelerin kireç ile karıştırılmasıyla oluşturulan harç ile inşa edilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Harç örneği

3.2.8. Diğer malzemeler

Yığma duvarlarda kullanılan ahşap, metal ve nervürlü inşaat demirleri, yapının dayanıklılığını ve stabilitesini artıran önemli bileşenlerdir. Ahşap, genellikle döşeme ve duvar sistemlerinde, çatı yapılarında veya duvarların destek elemanları olarak kullanılır; hafifliği ve esnekliği sayesinde deprem gibi yatay yüklere karşı dayanıklılık sağlar. Metal elemanlar ise, yığma duvarların güçlendirilmesi ve bağlantı noktalarının sağlamlaştırılması amacıyla kullanılır. Metal çubuklar veya plakalar, yapının taşıyıcı sistemine entegre edilerek çatlama ve yıkılma riskini azaltır. Ayrıca, nervürlü inşaat demirleri, yığma yapının taşıyıcı özelliklerini artırmak ve çekme kuvvetlerine karşı dayanıklılığı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu üç malzeme, yığma yapının genel yapısal bütünlüğünü destekleyerek, uzun ömürlü ve güvenli yapılar oluşturulmasına katkıda bulunur.

3.3. TBDY 2018’de Belirtilen Yığma Bina Çeşitleri

Yığma duvarlar, çeşitli kriterlere göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilmektedir. Bu bağlamda TBDY 2018’de, yığma bina türleri ve kullanılacak malzemelerin teknik özellikleri tanımlanmıştır. Yığma binaların inşasının teşvik edilmesi amacıyla, TBDY-2018 çerçevesinde toplam 4 tip olarak belirlenmiş olup, donatısız yığma binalar, donatılı yığma binalar, kuşatılmış yığma binalar ile donatılı panel sistemine sahip yığma binalar olarak gösterilmektedir.

3.3.1. Donatısız yığma binalar

Donatısız yığma bina, taşıyıcı duvarların yalnızca kargir birimler ve harç kullanılarak inşa edildiği, dolayısıyla donatı kullanılmadan oluşturulan, süneklik düzeyi sınırlı bir bina türü olarak tanımlanmaktadır (TBDY, 2018).

Donatısız yığma binaların, taşıyıcı duvarlarında kullanılan malzemelerin özellikleri nedeniyle yüksek rijitlik sergilediği ve bu durumun deprem anında gevrek davranış göstermelerine yol açtığı ifade edilebilir (Priestley ve ;Paulay, 2003). Bu tür binalarda tercih edilen kargir birimlerin, yüksek basınç mukavemetine sahip olmaları, uygulama kolaylığı sunmaları ve bağlayıcı harçla uyumlu bir şekilde çalışabilme özelliklerine sahip olmaları beklenmektedir. Ülkemizin kırsal bölgelerinde, bu tip

binaların genellikle mühendislik hizmetleri alınmadan inşa edildiği bilinmektedir. Donatısız yığma yapılar, kullanılan kargir birimlerin türüne bağlı olarak farklı inşa yöntemleriyle oluşturulabilmektedir.

Bu tür yapıların inşasında kullanılan kargir elemanların, basınç dayanımının yüksek olması önemlidir. Ayrıca uygulanabilirliğin kolay olması ve bağlayıcı harçla iyi bir uyum göstermesi temel beklentiler arasındadır. Donatısız yığma yapılar, kullanılan kargir malzemenin türüne bağlı olarak farklı tekniklerle inşa edilebilmektedir.

3.3.1.1. Taş yığma binalar

Taş yığma binalar, taşların sistematik bir şekilde bir araya getirilmesiyle inşa edilen ve genellikle harç ile bağlanan yapılardır. Bu yapı türü, tarihsel olarak pek çok farklı kültürde yaygın bir şekilde kullanılmış olup, özellikle uzun ömürlülüğü, doğal ısı izolasyonu sağlama kapasitesi, dayanıklılığı ve estetik görünümü dolayısıyla tercih edilmiştir (Şekil 3.9).

Taş, doğal bir malzeme olması sebebiyle çevre dostu bir yapı malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Yerel taşların kullanımı, inşaat süreçlerinin çevresel etkilerini azaltma potansiyeline sahiptir.

Taş yığma yapılar, tarihi eserler, kırsal konutlar, kiliseler, kaleler ve çeşitli kamu binaları gibi birçok alanda sıklıkla gözlemlenmektedir. Bu yapılar, özellikle tarihi ve kültürel mirasın korunmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bununla birlikte, taş yığma yapılar inşa edilme sürecinde önemli miktarda iş gücü ve dikkat gerektirdiği için maliyet açısından yüksek olabilir. Ayrıca, bu yapıların tasarımında ve inşasında mühendislik bilgisine ihtiyaç duyulması, genellikle mühendislik hizmetleri alınmaksızın inşa edilmelerini engellemektedir.



Şekil 3.9 Taş yığma bina örneği (Tellioglu ve Satıcı, 2023)

3.3.1.2. Kerpiç yığma binalar

Kerpiç yığma binalar, kil içeren kum oranı yüksek topraklar, saman gibi lifli katkıları eklenerek doğal malzemelerden oluşan ve toprak ile su karışımının şekillendirilip kurutulmasıyla elde edilen kerpiç blokların bir araya getirilmesiyle inşa edilen yapı türleridir. Geleneksel mimaride yaygın olarak kullanılan bu yapı tarzı, özellikle kırsal alanlarda ve gelişmekte olan bölgelerde tercih edilmekte olup, çevre dostu özellikleri ile dikkat çekmektedir. Kerpiç, yerel kaynakların kullanımını teşvik eden bir yapı malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Ülkemizde, kırsal bölgelerde kerpiç binalara rastlanabilmektedir (Şekil 3.10). Kerpiç yapıların inşasına ilişkin düzenlemeler, 1998 ve 2007 Bina Deprem Yönetmelikleri kapsamında yer almış olmasına rağmen, TBDY 2018'de kerpiç, yapı malzemesi olarak kullanımı yasaklanmıştır (TDY 1998, TDY 2007 ve TBDY 2018).



Şekil 3.10 Kerpiç bina örneği (Url-2, 2023)

3.3.1.3. Tuğla yığma binalar

Tuğla, pişmiş toprak esaslı bir yapı malzemesi olup, genellikle inşaat sektöründe taşıyıcı ya da bölme duvar malzemesi olarak kullanılır. Kil, kum, su ve diğer katkı maddelerinin karıştırılarak şekillendirilmesi ve ardından yüksek sıcaklıklarda (800°C-1200°C arası) fırınlanmasıyla elde edilen bir üründür. Yığma tuğla binalar, yapı taşı olarak genellikle pişmiş kil tuğlaların harç kullanılarak bir araya getirildiği, taşıyıcı duvarların aynı zamanda yapının statik yüklerini taşıdığı geleneksel bir inşaat tekniğidir. Bu tür binalar, malzeme kolaylığı, düşük maliyet ve yerel iş gücünden yararlanma avantajları nedeniyle tarih boyunca yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak yığma yapıların, özellikle de sismik bölgelerde, yatay yükler altındaki dayanımları sınırlı olduğundan, mühendislik müdahaleleri ve standartlar açısından detaylı değerlendirmeye ihtiyaç duyar. Modern inşaatla, yığma tuğla binalar genellikle yerel mimari kimliği koruma amacıyla veya ekonomik çözümler üretmek için tercih edilir. Bu yapı türü, tasarım ve malzeme seçimi sırasında uygun yapısal analizlerin yapılmasını gerektirir.

Geçmiş dönemlerde yaygın olarak kullanılan harman tuğlası, yerel ocaklarda düşük sıcaklıklarda ve kontrolsüz koşullarda üretilmekteydi. Harman tuğlasının basınç dayanımı düşük ve su emme oranı yüksektir. Ancak, deliksiz yapısı ve harç ceplerinin bulunması, kesme dayanımının görece yüksek olmasını sağlamıştır. Bu tuğla türünün boyutları yaklaşık olarak 5.5 cm x 11 cm x 23 cm'dir. Artan talep ve teknolojik gelişmelerle birlikte harman tuğlalarının yerini fabrika tuğlaları almıştır. Delikli ve blok formatında üretilen fabrika tuğlaları, taşıma ve yerleştirme kolaylığı açısından harman tuğlalarına göre daha avantajlıdır. Taşıyıcı blok tuğlaların boyutları 8.5 cm x 19 cm x 38-40 cm arasında değişmekte olup, delik oranı en fazla %35 olmalıdır (Bayülke, 2011).

Günümüzde tuğla, yığma yapı sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Bu yapı türlerinde işçilik kalitesine özen göstermek önemlidir. Tuğla birimlerini bağlayan harç dayanımı, ilgili standartlara uygun olmalı ve duvarın dayanımını artıracak şekilde uygulanmalıdır. Ayrıca, tuğlaların örülme şekilleri de duvarın mukavemetini önemli ölçüde etkiler. Düz örgü, kilit örgü ve şaşırtma örgü gibi yöntemler, tuğla duvarlarda yaygın olarak kullanılan örgü teknikleridir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Tuğla yığma bina örneği (Url-3, 2022)

Yığma binalarda yük taşıma sistemi, yatay ve düşey yüklerin tamamen duvarlar tarafından karşılanmasına dayanmaktadır. Bu nedenle, taşıyıcı duvarların uzunluğu, yerleşim planı, duvar boşluklarının oranı, kullanılan tuğlanın kalitesi ve işçilik gibi faktörler, yığma yapıların deprem davranışını belirleyen temel unsurlardır. Bu unsurlar, ilgili deprem yönetmeliklerinde belirtilmiş ve uyulması zorunlu hale getirilmiştir.

3.2.2. Donatılı yığma binalar

Kargir birim ve harç kullanılarak inşa edilen taşıyıcı duvarlarda, TBDY 2018’de belirtilen kurallara uygun şekilde donatıların yerleştirilmesiyle, süneklik düzeyi yüksek yapılar elde edilmektedir (Şekil 3.12). Bu yöntem, yapıların özellikle yatay yüklere karşı dayanıklılığını artırarak, deprem gibi dinamik etkiler altında daha güvenli performans sergilemesini sağlar (TBDY, 2018).



Şekil 3.12 Donatılı yığma bina örneği

3.2.3. Kuşatılmış yığma binalar

Kuşatılmış yığma binalar, taşıyıcı duvarların örülmesinin ardından, bu duvarların kalıp olarak kullanılmasıyla betonarme yatay ve düşey hatılların oluşturulması sonucunda inşa edilen yapılardır (Şekil 3.13). Bu tür binalar, taşıyıcı elemanların döşemeye ve birbirlerine betonarme bağlantılarla entegre edilmesiyle meydana gelir ve süneklik düzeyi sınırlı yapı sınıfına girer. Bu yapıların teşkili, TBDY 2018 hükümlerine uygun şekilde gerçekleştirilmelidir.



Şekil 3.13 Kuşatılmış bina örneği (Url-4, 2021)

3.2.4. Donatılı panel sistemli yığma binalar

Donatılı panel sistemli binalar, ön üretimli donatılı gaz beton panellerin yatay ve düşey donatı sistemleriyle entegre edildiği, taşıyıcı duvarların oluşturulmasında düşey gazbeton panellerin yan yana yerleştirilerek bir yapı sistemi teşkil ettiği yapılardır. Bu binalarda, paneller arasındaki yivlerde bulunan donatılar, temel ve kat seviyelerindeki betonarme hatıllarla bağlantılıdır. Ayrıca, donatılı gaz beton panellerin betonarme hatıllara bağlanmasıyla döşemeler oluşturulmaktadır. Bu sistem, süneklik düzeyi yüksek binalar kategorisinde değerlendirilir (Şekil 3.14).

Bu sistemlerin avantajları ve diğer yapı sistemlerine göre tercih edilme nedenleri şu şekilde sıralanabilir: Montaja hazır olarak teslim edilen bu yapılar, A1 sınıfı yanmazlık özelliği ile güvenli bir yapı malzemesi sunmaktadır. Uygulamada sağladığı işçilik ve

zaman tasarrufunun yanı sıra, yüksek ısı yalıtım performansı sayesinde düşük ısıtma maliyetleri sağlamaktadır. Milimetrik ölçülerdeki düzgün yüzey özellikleri ile öne çıkan bu sistemler, yoğuşma ve küf oluşumunun önlenmesine de katkıda bulunmaktadır. Panellerin duvar kalınlıkları 20 cm, 22.5 cm, 25 cm, 27.5 cm veya 30 cm; genişlikleri 60 cm; yükseklikleri ise maksimum 4.5 metre olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca, düzlem dışı yükler karşısında çift sıra çelik donatı ile güçlendirilmiş bir yapıya sahiptir (Gaz Beton Url, 2023).



Şekil 3.14 Ytong taşıyıcı düşey paneli

3.4. Yığma Yapıların Deprem Karşısındaki Davranışı

Deprem etkisi altında, yığma yapılar; malzeme heterojenliği, düşük süneklik kapasitesi ve yapısal bütünlük açısından sınırlı performansları nedeniyle, betonarme yapılara kıyasla daha karmaşık ve öngörülmesi zor bir davranış sergilemektedir. Bu yapıların deprem dayanımları, kullanılan malzemelerin türü ve kalitesi, duvarların kalınlığı, harç özellikleri ve inşaat teknikleri gibi unsurlara bağlıdır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), yığma yapıların deprem güvenliğini artırmak amacıyla yeni kriterler getirmiştir. Bu yönetmelik kapsamında, yığma yapıların tasarım ve analiz süreçlerinde dikkate alınması gereken performans hedefleri ve hesap yöntemleri detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

Yapı elemanları arasında yeterli bağ dayanımı mevcutsa ve bu elemanlar yapı sistemini bütünlüğünü koruyacak şekilde bir arada tutabiliyorsa, yapı çatlamadan stabilitesini sürdürebilir. Ancak, bağlantı elemanlarının dayanımı yetersiz ise yapıda ilk çatlaklar oluşur. Deprem devam etmesiyle bu çatlaklar genişler ve yapı elemanlarının bütünlüğü bozulabilir. Bu durum, duvarların, kolonların veya diğer taşıyıcı elemanların

parçalanmasına ve katların birbirinin üzerine çökmesine neden olabilir. Bu tür yapısal zayıflıklar, deprem sırasında ciddi hasarlar ve yıkımlarla sonuçlanabilir (Bayülke, 1978).

Ülkemizde yakın zamanda 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde meydana gelen 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremler, başta Kahramanmaraş ve Hatay-Antakya olmak üzere 11 ilde büyük yıkıma ve elli bini aşkın can kaybına yol açmıştır. Bölgedeki yapıların önemli bir kısmı yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Bu depremler yığma yapıların deprem performansını değerlendirmek açısından önemli veriler sunmuştur. Yapılan saha araştırmalarında, özellikle mühendislik hizmeti almamış yığma yapıların ciddi hasar gördüğü gözlemlenmiştir. Deprem sırasında oluşan yer ivmesinin büyüklüğü, hasarın boyutunu artıran başlıca etken olmuştur. Yığma duvarların tasarım kriterlerindeki eksikler ve işçiliklerden kaynaklı hatalı uygulamalar yıkımlara neden olmuştur. Kahramanmaraş'ta depremde hasar alan yığma bina görseli Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Kahramanmaraş'ta depremde hasar alan yığma bina (Yetkin, 2024)

Sonuç olarak, yığma yapıların deprem karşısındaki davranışı, malzeme özellikleri, inşaat teknikleri ve yönetmeliklere uygunluk gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, yığma yapıların tasarım ve inşasında, güncel deprem yönetmeliklerine uygun hareket edilmesi ve gerekli güçlendirme yöntemlerinin uygulanması, deprem güvenliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

3.5. Yığma Yapılarda Oluşan Hasar Biçimleri ve Deprem Hasar Düzeyleri

Yığma yapılarda oluşan hasar biçimleri çeşitlilik gösterebilir. Bu hasarlar genellikle temel hasarlarını, taşıyıcı sistem hasarlarını ve cephe ile duvar hasarlarını içerir. Deprem sırasında, temel hasarları genellikle zemindeki yer değiştirmeler veya çöküntüler olarak ortaya çıkar. Taşıyıcı sistem hasarları ise, binanın taşıyıcı yapı elemanlarının kırılması veya kaymasıyla görülür. Cephe ve duvar hasarları ise bina dışındaki cephede çatlaklar, sıva dökülmeleri veya duvarların yerinden oynaması şeklinde ortaya çıkabilir.

Deprem etkisiyle yığma bina duvarlarında meydana gelen çatlakların şekli, konumu ve boyutu, yapının güvenliği açısından hem kritik hem de önemsiz olabilecek nitelikte değerlendirilir. Çatlakların oluşum biçimi, yerleşimi ve büyüklüğü, yapıya uygulanması gereken müdahale yöntem ve tekniklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Çizelge 3.1’de yığma duvarlarda çatlak genişliklerine bağlı olarak oluşabilecek hasar durumlarına ilişkin detaylı açıklamalara yer verilmiştir (Bayülke, 1992).

Çizelge 3.1 Yığma binalardaki çatlak düzeyleri (Bayülke, 1992)

Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
0.1 mm'den az	Önemsiz	Yapıya ve kullanıma etkisi yoktur.
0.1 - 0.3 mm	Önemsiz / Az	Taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına bir etkisi yoktur.
0.3 - 1.0 mm	Az	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır.
1.0 - 2.0 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır. Bu düzeydeki çatlaklar pencere ve kapı lentolarını çatlatabilir. Birkaç metre uzaktan fark edilebilirler. Bu düzeyden ileri düzeydeki çatlaklar yapıda oturanları önlem alınması için harekete geçirir.
2.0 - 5.0 mm	Orta	Taşıyıcı sistemi etkilemeye başlar. Dış duvarlardan içeriye hava akımları hissedilir. Pencere, kapılar sıkışır ve kapanmamaya başlar. Yapının kullanımını etkilemeye başlar.
5.0 - 15.0 mm	Orta / Ağır	Kapı ve pencereler sıkışabilir. Su ve kanal bağlantıları kırılabilir. Binaya su ve soğuk hava girer. Pencere camları çatlayabilir ve kırılabilir. Sıvalar dökülmeye başlar. Tuğla duvarlar parçalanır. Yığma kemerler çökebilir. Bu boyuttaki çatlaklar kabul edilemez.
15.0 - 25.0 mm	Ağır	Ciddi onarım ve güçlendirme gerektirir. Yapının stabilitesi çok büyük tehlike altındadır.
25.0 mm'den çok	Çok ağır / Çok tehlikeli	Yapıda ağır hasar oluşur. Ciddi onarım ya da yeniden yapım gerekir.

3.5.1. Yığma binalarda oluşan hasar biçimleri

Depremeler sırasında yığma binalarda gözlemlenen hasar türleri genellikle aşağıdaki şekilde sınıflandırılır:

a) Duvar çatlakları ve yıkılmaları:

Düşey/Eğilme Çatlaklar : Duvarların oturma farklılıkları veya malzeme bozulmaları nedeniyle oluşur (Çırak, 2011).

b) Diyagonal (Çapraz/Kesme) çatlaklar:

Deprem sırasında oluşan yatay kuvvetler nedeniyle meydana gelir ve genellikle duvarların köşelerinde veya pencere gibi açıklıkların köşelerinde görülür (Çırak, 2011).

c) Yığma duvarların kısmi veya tamamen yıkılması:

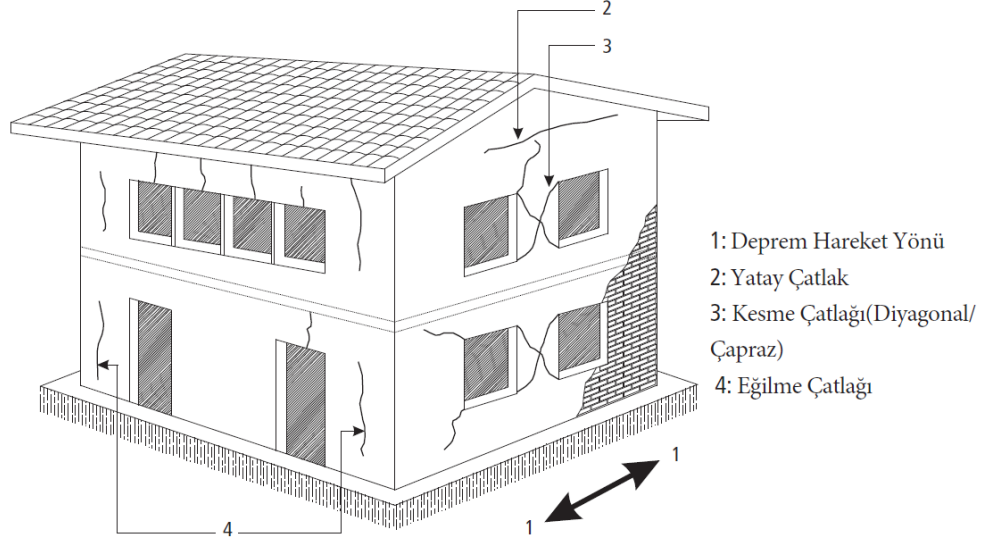
Şiddetli depremler sonucunda, özellikle zayıf harç veya yetersiz bağlantılar nedeniyle duvarların kısmen veya tamamen yıkılması mümkündür (Çırak, 2011).

d) Temel oturmaları:

Zemin özelliklerinin heterojenliği veya yetersiz temel tasarımı nedeniyle, temellerde farklı oturmalar meydana gelebilir. Bu durum, duvarlarda çatlaklara ve yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açar (Çırak, 2011).

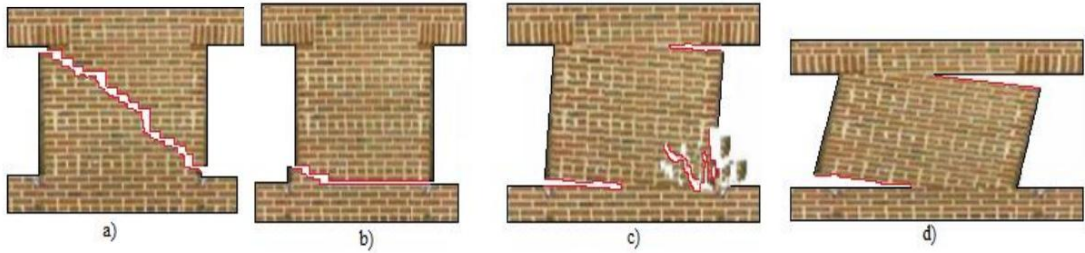
e) Malzeme bozulmaları:

Zamanla veya deprem etkisiyle, yığma yapı malzemelerinde bozulmalar veya şekil değişiklikleri oluşabilir. Bu durum, yapının genel dayanıklılığını azaltır . Bu hasar türleri, yığma yapıların deprem performansını doğrudan etkiler ve yapısal güvenliği tehlikeye atabilir. Deprem sonrasında yığma yapılarda meydana gelebilecek çatlak türleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



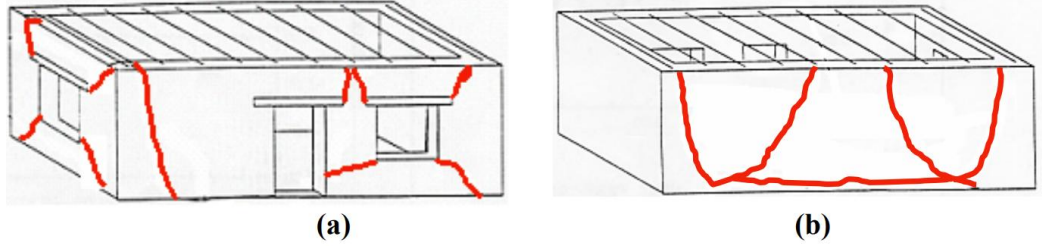
Şekil 3.16 Deprem sonrasında yığma yapılarda meydana gelebilecek çatlak türleri (Arya, Boen ve Ishiyama, 2014)

Şekil 3.17’de, yatay derzlere paralel yüklerin etkisi altında yığma duvarlarda meydana gelen kırılma türleri detaylandırılmıştır. Bu türler arasında; harç dayanımı tuğla dayanımından yüksek olduğunda tuğla boyunca oluşan çatlaklar (Şekil 3.17 a), harç dayanımı tuğla dayanımından düşük olduğunda derzlerden geçen kayma çatlakları (Şekil 3.17b), duvar topuklarında meydana gelen ezilmeler (Şekil 3.17 c) ve taşıyıcı duvarların döşemelerden ayrılarak sallanması (Şekil 3.17 d) yer almaktadır (Moon, 2003).



Şekil 3.17 Yığma duvarlarda, yatay derzlere paralel yüklerin etkisi altında meydana gelen kırılma biçimleri (Moon, 2003)

Çatlaklar, gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Kapı ve pencere kenarlarında meydana gelen çatlaklar, genellikle duvar düzlemine dik yönlü eğilme gerilmeleri veya düzlem doğrultusunda ortaya çıkan kayma gerilmeleri nedeniyle oluşur. Duvarların birleşim noktalarında görülen düşey ya da diyagonal çatlaklar, duvar düzlemine dik ve düzlem doğrultusundaki kuvvetlerin birleşik etkisi sonucunda meydana gelir (Şekil 3.18 a) (Arun, 2005).



Şekil 3.18 Duvarların birleşim noktalarında görülen düşey ya da diyagonal çatlaklar (Arun, 2005)

Kapı ve pencere açıklığı bulunmayan uzun duvarlarda, duvar düzlemine dik etkiler alt bölgelerde yatay çatlakların, duvar birleşim noktalarında ise düşey veya diyagonal çatlakların oluşmasına neden olur (Şekil 3.18 b). Yığma yapıların yıkılmasına yol açabilecek en ciddi risklerden biri, duvarın düzlemi dışına doğru gerçekleşen yer değiştirmelerdir. Çatlamış duvarların düzlemine dik kuvvetlere karşı stabilitesi, duvar kalınlığı ve narinlik oranı (yükseklik/kalınlık) gibi parametrelere bağlıdır (Arun, 2005).

3.6. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemelerin Dayanımı

Yığma yapılarda kullanılan kargir birimler, malzeme türüne ve delik oranlarına göre iki ana gruba ayrılmaktadır (Çizelge 3.2). Donatı yerleştirilmesi ve harçla tamamen doldurulması öngörülen birimlerdeki boşluklar, delik oranı hesaplamalarına dahil edilmemektedir. Ancak, bu boşlukların oranı, hesaplama dışında tutulsa dahi, yüzde 15'in altına düşmemesi gerekmektedir.

Çizelge 3.2 Kargir Birimlerin Delik Oranlarına Göre Gruplandırılması (TBDY, 2018)

Kargir Birim Cinsi	Grup I	Grup II
Tuğla	$\alpha \leq \%35$	$\%35 < \alpha \leq \%50$
Beton	$\alpha \leq \%35$	$\%35 < \alpha \leq \%50$

TS EN 1015-11 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2002) standardına göre belirlenecek harcın en düşük küp basınç dayanımı, donatısız ve kuşatılmış yığma yapılar için $f_{m,min} = 5.0 \text{ MPa}$, donatılı yığma yapılar için ise $f_{m,min} = 10.0 \text{ MPa}$ 'dan az olmamalıdır. Ayrıca, donatılı panel sistemlerde paneller arasındaki yivlere doldurulan çimento şerbetinin basınç dayanımı da 10.0 MPa 'dan daha düşük olmamalıdır.

Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı (f_k) iki farklı yöntemle tespit edilebilir:

- a) TS EN 1052-1 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2000) standardına uygun olarak duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilecek deneyler yoluyla,
- b) Kargir birim ve harç malzemeleri üzerinde TS EN 772-1 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2011) ve TS EN 1015-11 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2002) standartlarına göre yapılan deneylerden elde edilen basınç dayanımı değerlerinin kullanılmasıyla belirlenmektedir.

Çizelge 3.3'te, farklı duvar türlerine ait karakteristik basınç dayanımı değerlerine ilişkin bilgiler sunulmaktadır.

Çizelge 3.3 Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k , (MPa)

Birim-Birim Sınıfı	Harç Sınıfı	Harç Basınç Dayanımı, f_m (MPa)	Kargir birim basınç dayanımı, f_b (MPa)					
			5	10	15	20	25	30
Grup I	Genel amaçlı harç	M10-M20	3.4-4.2	5.5-6.8	7.3-9.0	8.9-11.0	10.4-12.9	11.9-14.6
		M2.5-M9	2.2-3.3	3.6-5.3	4.8-7.1	5.9-8.7	6.9-10.1	7.8-11.5
		M1-M2	1.7-2.1	2.8-3.4	3.7-4.5	4.5-5.5	5.2-6.4	5.9-7.3
Grup II ve Kesme Taş		M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0
Tuğla (Grup I)	İnce tabakalı harç		2.9	5.3	7.5	9.6	11.6	13.5
Tuğla (Grup II)			2.2	3.5	4.7	5.7	6.7	7.6
Beton (Grup I), Gazbeton			3.1	5.7	8.0	10.2	12.3	14.4
Beton (Grup II)			2.6	4.6	6.5	8.3	10.0	11.7

Donatısız yığma binalar, donatılı yığma binalar, kuşatılmış yığma binalar ve donatılı panel sistemli binalarda kullanılan betonarme bileşenlerin beton sınıfı en az C25 olmak zorundadır.

Taşıyıcı duvarların elastisite modülü (E_{duv}), TS EN 1052-1 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2000) standardına uygun olarak gerçekleştirilecek deneylerle belirlenebilir. Ancak, deneylerin gerçekleştirilmediği durumlarda, (E_{duv}) değeri yapısal analizlerde $750f_k$ olarak kabul edilecektir. Donatılı paneller ile inşa edilen duvarlarda ise elastisite modülü $450f_k$ olarak alınacaktır. Ayrıca, duvarların kayma modülü G_{duv} elastisite modülünün %40'ı olarak hesaplanacaktır.

3.7. Yığma Yapılarda Deprem Hesabı

Bina taşıyıcı sistemi, düşey ve yatay yüklerin birleşik etkileri dikkate alınarak modellenmeli ve bu etkiler altında yapısal analiz gerçekleştirilmelidir. Yapısal analiz, sonlu elemanlar yöntemi veya eşdeğer çubuk yöntemlerinden biri kullanılarak yapılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde, taşıyıcı duvarlar ayrıntılı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme veya makro modelleme teknikleri kullanılarak modellenmelidir. Ayrıntılı mikro modellemede, kargir birimler ve harç derzleri ayrı ayrı ele alınırken, basitleştirilmiş mikro modellemede harç derzleri göz ardı edilerek kargir birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle ayrılmaktadır. Makro modelleme tekniğinde ise yığma duvar, homojen bir kompozit malzeme olarak değerlendirilmektedir. Eşdeğer çubuk yöntemi ile yapılan analizlerde ise yığma duvarın rijitliği, kayma ve eğilme deformasyonları dikkate alınarak belirlenmektedir.

Donatısız, donatılı ve kuşatılmış yığma binalar ile donatılı panellerden oluşan binalarda taşıyıcı duvarların etkin rijitlikleri, brüt rijitliklerinin %50'sine indirgenerek hesaplanacaktır. Bu etkin rijitliklere göre yapılan hesaplamalarda, görelî kat öteleme oranının R/I katsayısı ile çarpımı 0.007'yi aşmamalıdır (TBDY, 2018).

Taşıyıcı duvarlarda kesme kuvvetindeki değişim, %25'ten daha fazla azalmamalı ve %33'ten daha fazla artmamalıdır (TBDY, 2018).

Donatısız, donatılı ve kuşatılmış yığma binalarda, rijit diyafram etkisi sağlamak için en az 10 cm kalınlığında betonarme döşemeler yapılmalıdır. Bu döşemeler, en az 30 cm yüksekliğinde, 6Ø12 boyuna ve Ø8/150 mm enine donatılı yatay hatıllara oturtulacaktır. Yatay hatıllar duvar kalınlığı kadar genişlikte olmalı ve düşey aralıkları 4 m'yi geçmemelidir (TBDY, 2018).

Donatılı panellerden oluşan döşemeler, her iki doğrultuda rijit diyafram olarak çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Kuşatılmış yığma binalarda betonarme yatay ve düşey hatıllar, yapısal modellemede dikkate alınmayacaktır.

Duvar uzunluğu, kalınlığının iki katından küçük olan duvarlar taşıyıcı olarak değerlendirilmemelidir.

3.8. Taşıma Gücü Yöntemine Göre Hesap

TBDY 2018, yığma yapıların taşıma gücü yöntemine göre analizinde temel olarak yapı elemanlarının taşıyıcı kapasitesinin, yapı üzerindeki tasarım yüklerinden büyük

olmasını esas alır. Bu yöntem, yapı güvenliğini sağlamak için eleman dayanımlarını ve yük etkilerini karşılaştırır. Aşağıda yöntemin ana prensipleri açıklanmıştır:

Düşey Yük Dayanımı ($N_{Ed} \leq N_{Rd}$): Taşıyıcı duvarlara etki eden düşey tasarım kuvveti (N_{Ed}), duvarların düşey yük tasarım dayanımı (N_{Rd}) değerini aşamaz. N_{Rd} değeri, duvarın malzeme özellikleri ve kesit geometrisine bağlı olarak denklem ($N_{Rd} = \lambda A f_d$) ile hesaplanır.

Duvar Basınç Dayanımı (f_d): Yığma duvarların tasarım basınç dayanımı f_d denklem ($f_d = f_k / \gamma_m$) ile belirlenir. Bu hesaplama, kargir birimlerin basınç dayanımı, harç dayanımı ve birim-harç etkileşimi dikkate alınarak yapılır.

Narinliğe bağlı kapasite azaltma katsayısı (λ), narinlik oranı (h_{ef} / t_{ef}) değerine göre belirlenir. Eğer narinlik oranı 6'dan küçükse, λ değeri 1.0 olarak alınır. Narinlik oranının 6 ile 10 arasında olması durumunda λ 0.8, 10 ile 15 arasında olması durumunda ise 0.7 olarak kabul edilir. Ancak, narinlik oranının 15'i aşmasına izin verilmez. Yığma duvarların dayanım azaltma katsayısı (h_{ef}), TBDY 2018'in 11.2.11 maddesine göre hesaplanmalıdır.

TBDY-2018'e göre, donatısız yığma duvarların tasarım kesme kuvveti dayanımının (V_{Rd}), duvarın kesme kuvveti dayanımından (V_{Ed}) daha yüksek olması gerekmektedir. Aynı yönetmelik altında, panel sistemli ve donatılı yığma duvarların çekme dayanımları göz ardı edilmektedir; zira bu dayanım, yapının donatısına aktarılmaktadır. Bu durum, betonarme kesit hesaplamalarına benzer bir yaklaşım sergilemektedir. Tasarım momenti (M_{Ed}), tasarım dayanım momentinden (M_{Rd}) küçük olmalıdır.

TBDY-2018'de, donatılı yığma duvarlar için belirlenen hesaplama yöntemlerine göre, kuşatılmış yığma binalarda düşey yükler veya eğilme etkisi altında kalan elemanların hesapları yapılmaktadır. Duvarın basınca maruz kalan bölümünde, yalnızca yığma dayanımı dikkate alınmakta ve donatının yanı sıra beton katkısı hesaba katılmamaktadır. Düşey hatıllar deprem hesaplamalarında göz önünde bulundurulmazken, çekme yönünde çalışan donatılar dikkate alınmaktadır. Analiz sürecinde göz ardı edilen hatılların kesme kuvveti dayanımları toplanarak, duvarın toplam kesme dayanımına eklenmektedir. Donatısız yığma binalar için kesme kuvveti hesabında ise yalnızca beton katkısı dikkate alınmakta ve eksenel kuvvet ihmal edilmektedir (TBDY, 2018).

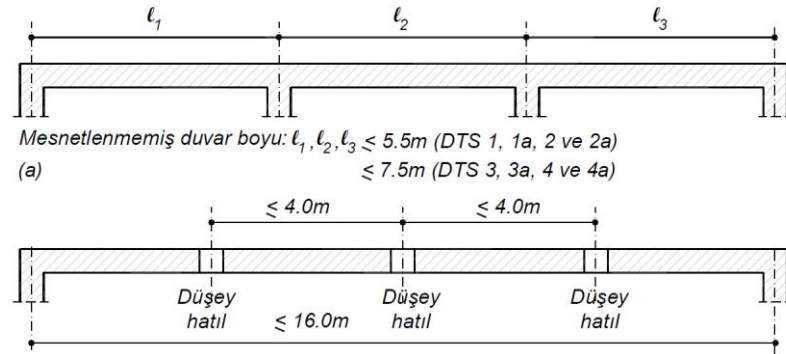
3.9. Diğer Tasarım İlkeleri

Taşıyıcı eleman olarak değerlendirilecek duvarlar, Çizelge 3.4'te belirtilen kriterleri karşılamak zorundadır. Belirtilen şartları yerine getiremeyen duvarlar, yapı tasarımında taşıyıcı eleman olarak dikkate alınmayacaktır (TBDY,2018).

Çizelge 3.4 Kesme kuvvetinin maksimum ve minimum değerlerine sahip duvarlarda uygulanması gereken şartlar (TBDY,2018)

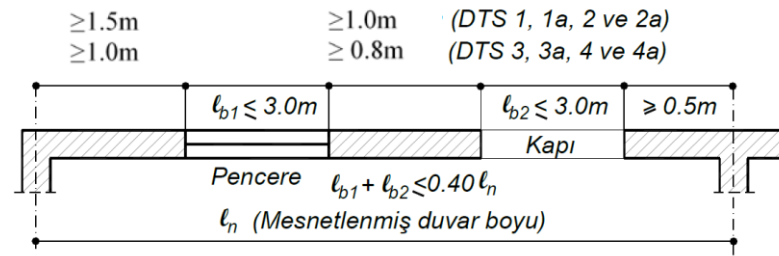
Yığma Tipi	$(t_{ef})_{min}$ (mm)	$(h_{ef} / t_{ef})_{max}$
Donatısız yığma, doğal veya yapay kesme taş ile	350	9
Donatısız yığma, diğer kargir birimler ile	240	12
Kuşatılmış yığma	240	15
Donatılı yığma	240	15
Donatılı panel sistemler	200	15

Donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda, taşıyıcı duvarların desteklenmeyen maksimum uzunlukları ile düşey hatıllar arasındaki mesafeler, kriterlere uygun olarak tasarlanmalıdır. Donatılı yığma ve donatılı panel sistemli binalarda ise, Şekil 3.19'teki boyut sınırları %20 oranında artırılabilir. Bu şartlara uygun olmayan duvar elemanlarının düzleme dik yöndeki stabilite kontrolleri, TS EN 1996-1-1 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2005) standardında belirtilen esaslara göre yapılmalıdır.



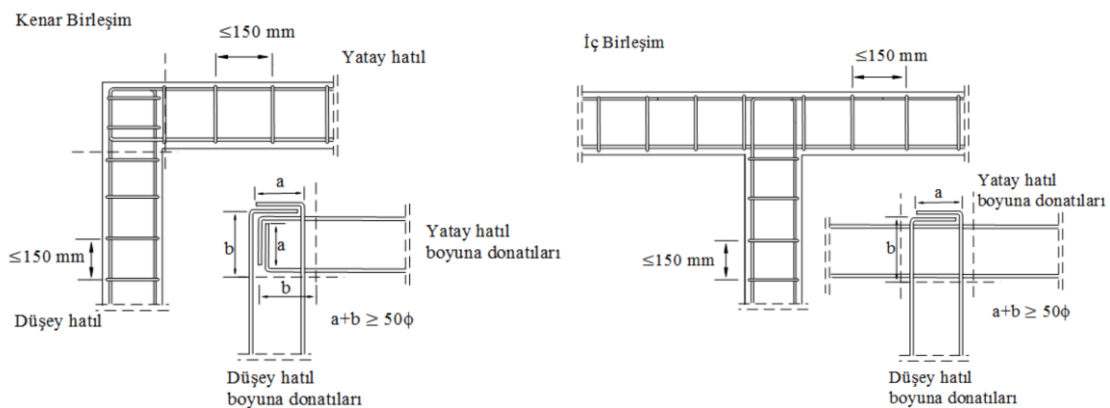
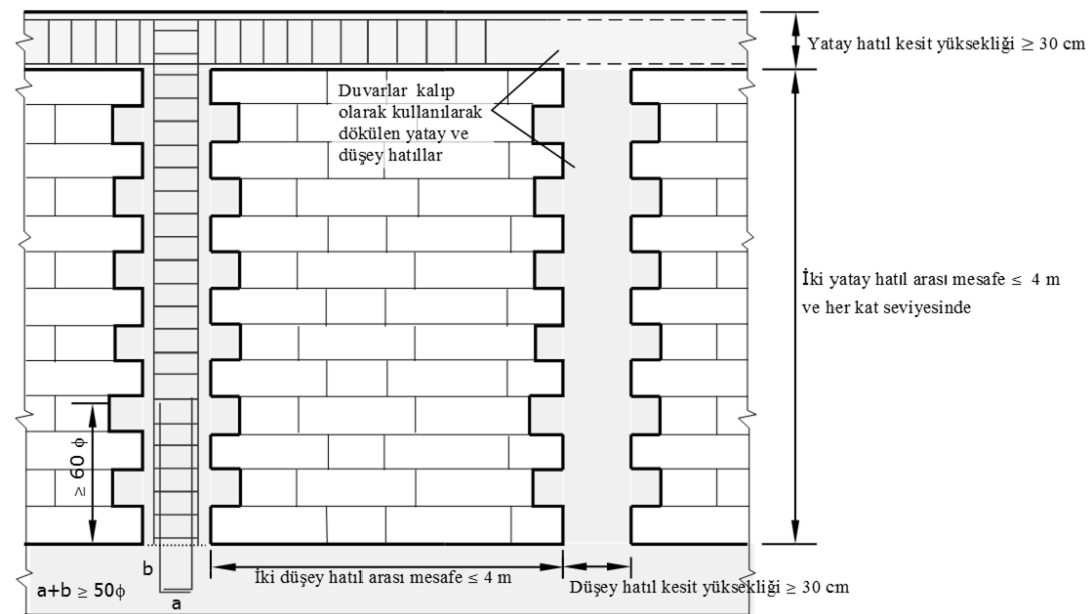
Şekil 3.19 Donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda, taşıyıcı duvarların desteklenmeden bırakılabilecek maksimum uzunlukları ile düşey hatıllar arasındaki mesafeler belirli sınırlar (TBDY,2018)

Kapı ve pencere açıklıklarının üzerinde betonarme lentolar oluşturulmalıdır. Lentoların duvarla temas eden bölümlerinin uzunluğu en az 200 mm, lento yüksekliği ise en az 150 mm olmalıdır. Taşıyıcı duvarlarda bırakılan kapı ve pencere açıklıkları, Şekil 3.20'te belirtilen kurallara uygun şekilde tasarlanmalıdır (TBDY, 2018).

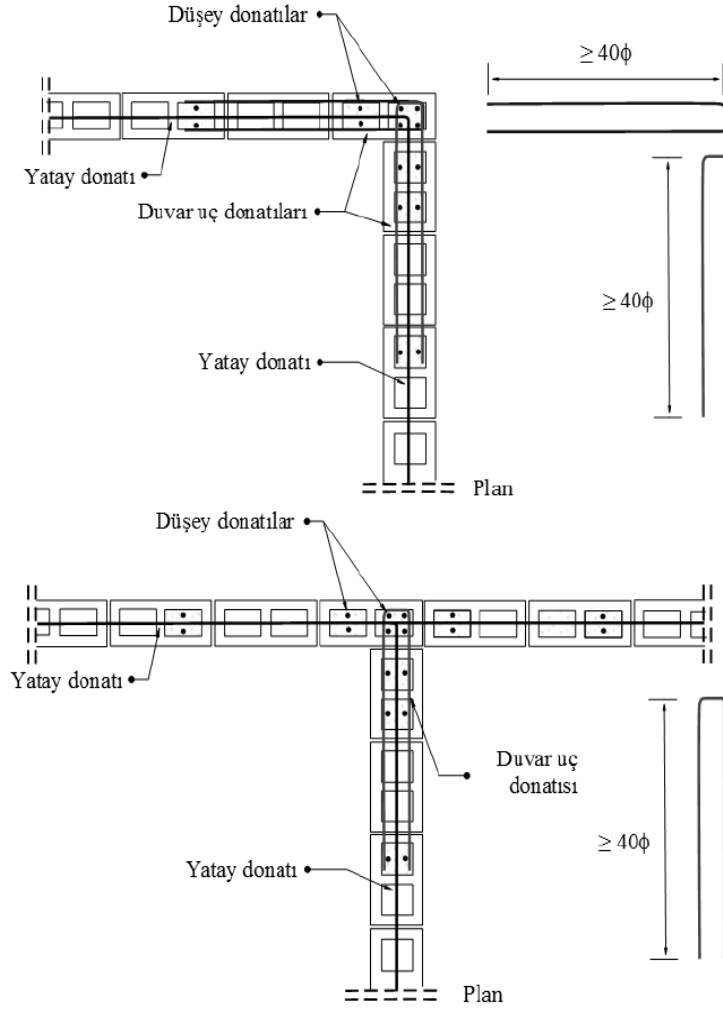


Şekil 3.20 Taşıyıcı yığma duvarlarda oluşturulacak kapı ve pencere açıklıklarına ilişkin uygulanması gereken tasarım kuralları (TBDY, 2018)

Kuşatılmış yığma binalarda, yatay ve düşey hatıllar, yığma duvarların örülmesinin ardından ve duvarlar kalıp olarak kullanılarak beton dökülmesi suretiyle oluşturulmalıdır (Şekil 3.21 ve Şekil 3.22) (TBDY, 2018).



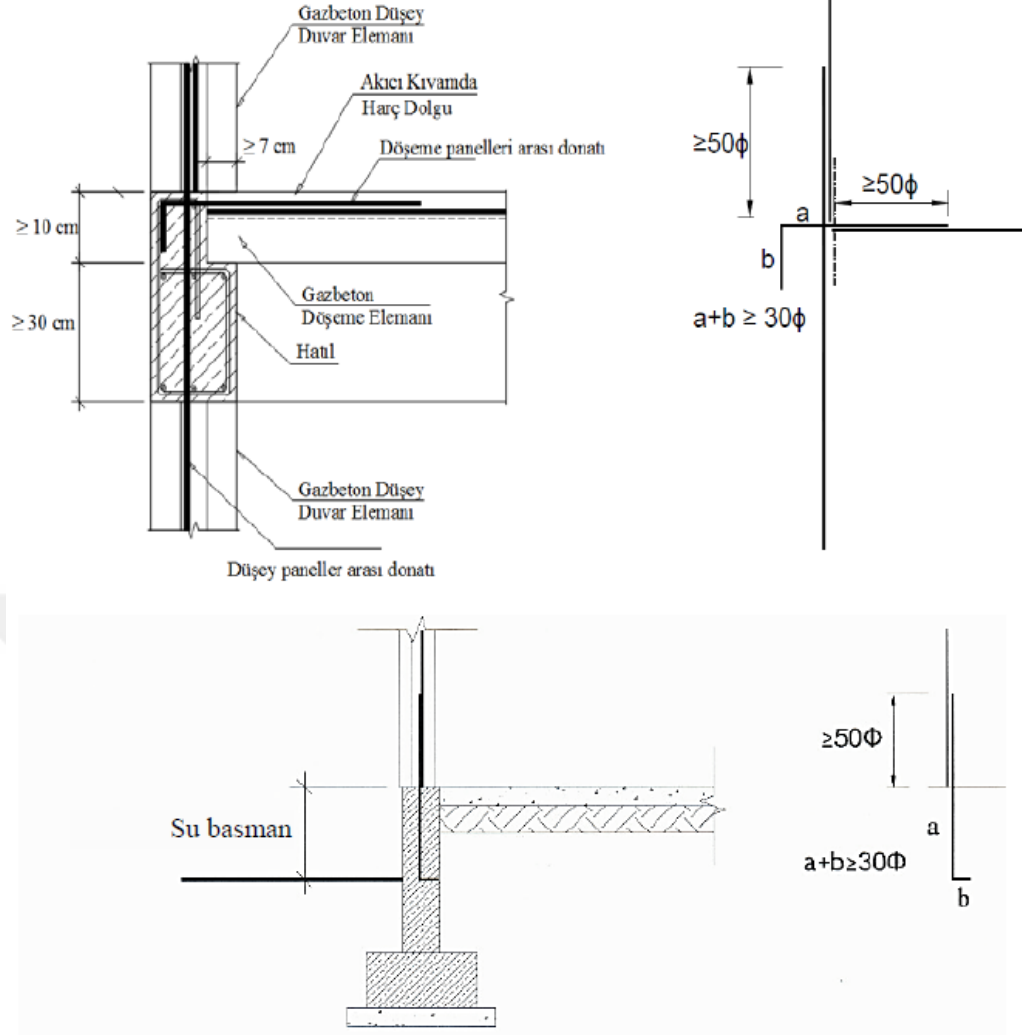
Şekil 3.21 Kuşatılmış yığma binalarda yatay ve düşey hatıllar (TBDY, 2018)



Şekil 3.24 Donatılı yığma binalarda yatay ve düşey hatıllar (TBDY, 2018)

Donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda, en üst kat parapet duvarlarının desteklenmeyen maksimum uzunlukları ve düşey hatıllar arasındaki mesafeler, Şekil 3.19’te verilen kurallara uygun olmalıdır. Donatılı yığma ve donatılı panel sistemli binalarda ise, Şekil 3.19’te belirtilen boyut sınırları %20 oranında artırılabilir. Eğer parapet duvarının yüksekliği 1.00 m’den fazla ise, parapet boyunca her 1.00 m’de bir yatay hatıl yapılmalıdır. Bu şartların sağlanamadığı durumlarda parapet yüksekliği, duvar kalınlığının dört katını aşmamalıdır (TBDY, 2018).

Donatılı paneller ile inşa edilen binalarda, döşeme panellerinin betonarme hatıllara ve temele bağlantı detayları, Şekil 3.25’de belirtilen şartlara uygun şekilde tasarlanmalıdır (TBDY, 2018).



Şekil 3.25 Donatılı panellerde betonarme hatıllara ve temele bağlantı detayları

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez kapsamında, yığma yapıların deprem etkisi altındaki yapısal davranışlarının sayısal modellemeler ve deneysel çalışmalarla değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada sayısal ve deneysel araştırmalar birlikte yürütülmüştür. Bu bölümde, sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, yöntemler ve izlenen süreçlere ilişkin ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir.

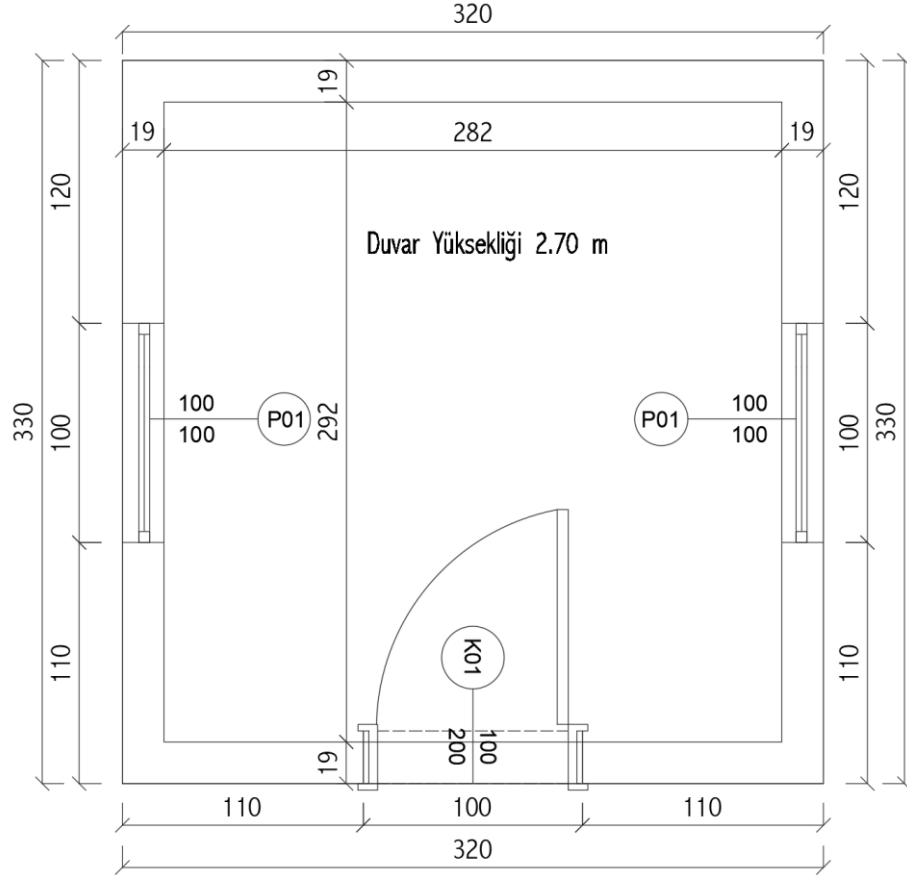
4.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada 3,2x3,3x3 m boyutlarında, tek katlı, tam (1/1) ölçekli, donatısız yığma bina ve donatılı yığma bina üretimi yapılmıştır. Donatısız yığma bina numunesi 'S1', donatılı yığma bina numunesi 'S2' kısaltması kullanılarak isimlendirilmiştir. Bu numuneler tersinir tekrarlanır yük etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. Tersinir tekrarlanan yük, yükleme duvarına monte edilen hidrolik yükleme düzeneği vasıtasıyla uygulanmış ve yük etkisi altında meydana gelen hasarlar yapı üzerine işaretlenmiştir. Deplasman değerleri deplasman ölçer ve veri kayıt sistemi ile kayıt altına alınmıştır.

Numunelerin üretimi ve testleri, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne ait Yapı ve Deprem Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Donatılı ve donatısız yığma bina numuneleri test edilmiştir.

4.1.1. Yığma bina olarak tasarlanan numunelerin genel özellikleri

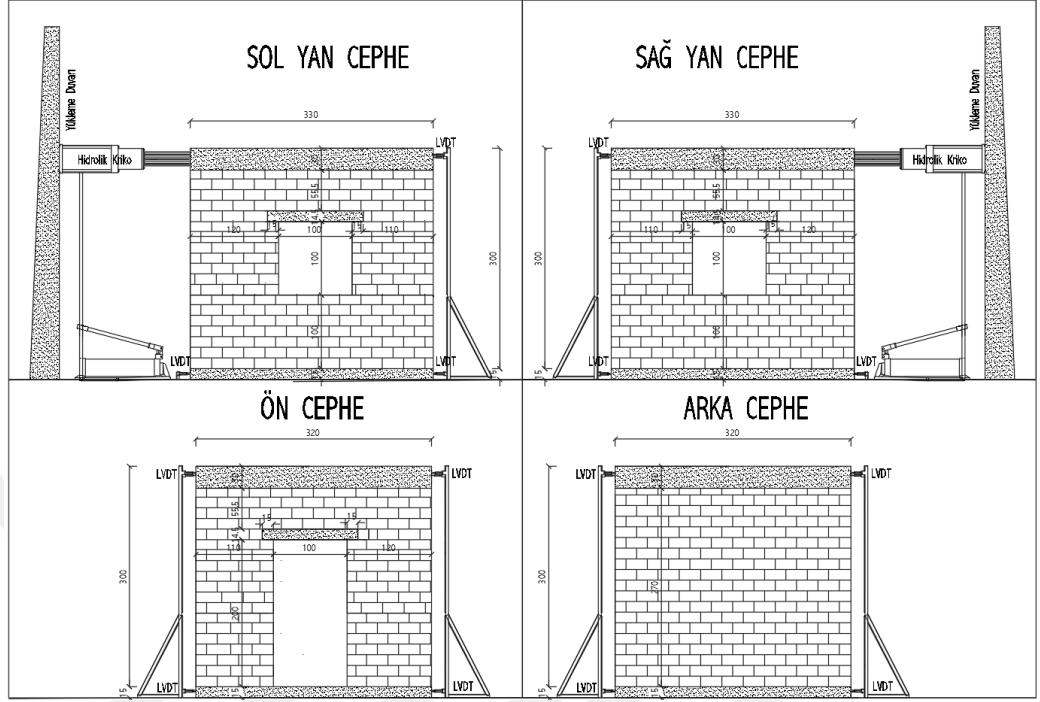
Yığma bina olarak, donatılı ve donatısız yığma olmak üzere iki adet numune üretilmiştir. Bu numuneler TBDY 2018'e göre verilen minimum şartlar doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu deney numunelerinin ortak özellikleri aşağıda sunulmuştur. Her iki binanın da mimari planı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Donatısız ve donatılı yığma binaların mimari planı

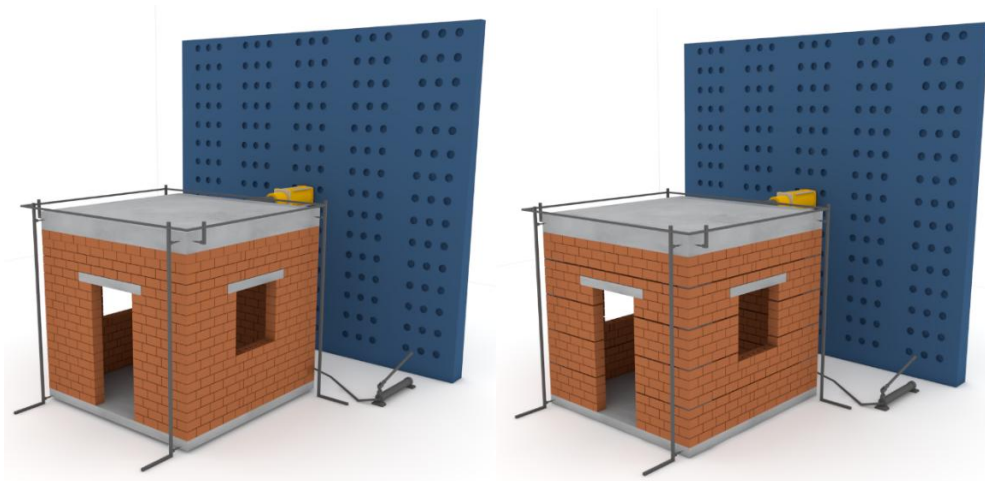
- Her iki deneyde de aynı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bağlayıcı harç ve taşıyıcı yığma tuğlalar kullanılmıştır.
- Numuneler için aynı geometrik özelliklere sahip temeller inşa edilmiştir.
- Numunelerde bırakılan kapı ve pencere boşluklarının konumu ve boyutları aynı yönlerde inşa edilmiştir.
- İki adet pencere 100 cm x 100 cm olup, bir adet de kapı boşluğu 100 cm eninde, 200 cm yüksekliğinde üretilmiştir.
- Kapılar, temel seviyesinden itibaren başlamaktadır. Pencereler ise temel seviyesinden 100 cm yükseklikte konumlandırılmıştır.
- Numunelerin köşelerine deplasman ölçerler ve arka cephe döşeme üst kotuna yükleme sistemi yerleştirilmiştir.

Şekil 4.2’de aynı boyutlarda olan iki yığma binanın sol yan, sağ yan, ön ve arka cephelerinden görünüşler ve deney numunelerinin geometrik ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Yığma bina deney numunelerinin cephelerinden görünüşler

Şekil 4.3’de aynı boyutlarda olan iki yığma binanın üç boyutlu görselleri gösterilmiştir. Şekil 4.3a’da donatısız yığma deney numunesi, Şekil 4.3b’de donatılı yığma deney numunesi gösterilmiştir.



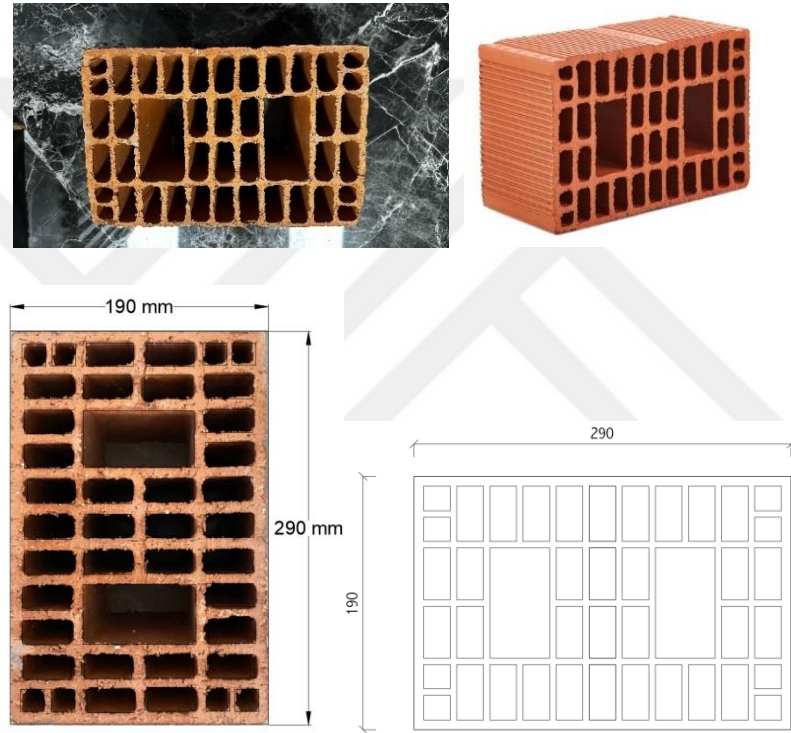
(a) (b)
Şekil 4.3 Deney düzeneğinin 3D görünümü

4.1.2. Yığma bina numunelerin üretilmesinde kullanılan malzemeler ve basınç dayanım testleri

Bu bölümde numunelerin üretilmesinde kullanılan yığma tuğla, harç, beton, çelik donatı malzemelerin özellikleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

4.1.2.1. Yığma tuğla

Yığma duvarların inşasında, ölçüleri 190x290x135 mm olan yığma tuğlalar tercih edilmiştir. Kullanılan tuğlanın görselleri Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Yığma tuğla numunesi

Bu çalışmada, TBDY 2018 standartları göz önünde bulundurularak kullanılan tuğlanın belirlenen minimum kalite gereksinimlerini karşılaması amaçlanmıştır. Binada kullanılan 190x290x135 mm boyutlarındaki taşıyıcı tuğlanın basınç dayanımını değerlendirmek için üç adet tuğla numune hazırlanmış ve test edilmiştir (Şekil 4.5). Tuğlaların basınç dayanımları, tuğlaların boşluk alanları hariç tutularak hesaplanmıştır. Tuğla boşluk oranı 0,52 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 Tuğla numunelerinin basınç dayanımı testi

Tuğla numunelerinin basınç dayanımları ve elastisite modülü Çizelge 4.1’te gösterilmiş olup ortalama basınç dayanım değeri esas alınmıştır.

Çizelge 4.1 Tuğla basınç deneyi test sonuçları

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
1	5.15	5.14	1542
2	5.32		
3	4.94		

Tuğla ve harç malzemelerinin elastik ve elastik olmayan özellikleri, Hemant ve arkadaşlarının çalışmasında önerilen formüller temel alınarak hesaplanmıştır (Hemant ve diğ. 2007). Araştırmada, tuğla malzemesinin elastisite modülü şu denklemle ifade edilmektedir:

$$E_b = 300 \cdot f_{b,c} \text{ (MPa)} \quad (1.1)$$

Tuğlanın tek eksenli basınç dayanımı $f_{b,c}$ ifade etmektedir.

Yığma binalar için (1.1) denklemleri yardımıyla hesaplanan tuğlanın Elastisite modülü $E_b = 300 \cdot 5,14 = 1542 \text{ (MPa)}$

Yığma tuğlanın yoğunluğu TS EN 771-1’den (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2015) 2000 kg/m^3 ve poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

4.1.2.2. Harç

Duvarların yapımında kullanılan harç, TS EN 1015-11 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2002) standardına uygun şekilde üretilmiştir. Harç, kum, çimento ve suyun homojen bir şekilde karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Üretilen harcın küp basınç dayanımının en az 10.0 MPa olacak şekilde tasarlanması sağlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Yığma tuğla harç malzemelerinin hazırlanışı

Deneylerde kullanılan harçların imalatında, Konya Çimento Sanayi A.Ş. tarafından TS 197-1 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2002) standardına uygun olarak üretilen Portland Kompoze Çimento (CEMIV/B 32.5 R) tercih edilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Kullanılan çimentonun özellikleri

Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Gereklilikler		
	Ocak-Haziran 2022	TS EN 197-1
Priz Başlangıcı - (dakika)	199	Min.75
Hacim Genleşmesi - (mm)	1,0	Maks.10
Erken Dayanım (2 gün) - (MPa)	18,8	Min.10,0
Son Dayanım (28 gün) - (MPa)	37,5	min. 32,5 / maks. 52,5

Duvar örgü işlemlerinde kullanılan harçların imalatında tercih edilen ince agregalar (kum), Konya yerel piyasasından temin edilmiştir. Temin edilen bu kum herhangi bir fiziksel ya da kimyasal işleme tabi tutulmaksızın doğrudan kullanılmıştır. Kullanılan kumun granülometrik özelliklerine ilişkin veriler Çizelge 4.3’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.3 Harç kumunun granülometrik değerleri

Elek Çapı	Elekten geçen %	Elek üstünde Kalan %
8	100	0
4	74	26
2	51	49
1	35	65
0.5	13	87
0.25	4	96

Çizelge 4.4’de donatılı ve donatısız yığma duvarlardaki harçların basınç dayanımı testinde kullanılan numuneler detaylı şekilde sunulmuş olup elastisite modülü gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Donatısız ve donatılı yığma duvarlardaki harçların basınç dayanımı

Donatısız Yığma Duvarlardaki Harçların Basınç Dayanımı			
Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
1	9.41	10.40	2080
2	10.19		
3	11.59		
Donatılı Yığma Duvarlardaki Harçların Basınç Dayanımı			
Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
1	11.12	10.59	2118
2	10.58		
3	10.07		

Harç malzemesinin elastisite modülü ise şu denklemle ifade edilmektedir:

$$E_b = 200 \cdot f_{m,c} \text{ (MPa)} \quad (1.2)$$

Yığma binalar için (1.2) denklemleri yardımıyla hesaplanan harcın donatısız yığma binada Elastisite modülü $E_b = 200 \cdot 10,40 = 2080 \text{ (MPa)}$ donatılı yığma binada ise $E_b = 200 \cdot 10,59 = 2118 \text{ (MPa)}$ olarak hesaplanmıştır.

Harcın yoğunluğu TS EN 998-2'den(Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2011) 2000 kg/m^3 ve poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

Hazırlanan harç numuneleri, standart prosedürlere uygun olarak belirli sürelerle su içinde kütleme işlemine tabi tutulmuştur. Kütleme işleminin ardından, malzemelerin basınç dayanımları Konya Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda test edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Harç numunelerinin basınç dayanımı testleri

4.1.2.3. Beton

Temeller, döşemeler ve yatay hatılarda kullanılan betonun mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla beton dökümü sırasında her biri $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ boyutlarında üçer adet küp numune alınmıştır. Benzer şekilde hem donatılı hem de donatısız yığma binaların inşasında kullanılan harcın dayanımını test etmek için de üçer adet $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ boyutlu beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numuneleri, standart prosedürlere uygun olarak belirli sürelerle su içinde kütleme işlemine tabi tutulmuştur. Kütleme

işleminin ardından, malzemelerin basınç dayanımları Konya Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda test edilmiştir. Şekil 4.8'te, betonların ve harçların basınç dayanımı testi aşamalarında kullanılan numuneler detaylı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Beton numunelerinin basınç dayanımı testleri

Çizelge 4.5’de, donatılı ve donatısız yığma duvarlardaki temel, döşeme ve yatay hatılların beton basınç dayanımı testinde kullanılan numuneler detaylı şekilde gösterilmiştir. Yığma binalarda kullanılan beton bileşenlerinin beton sınıfı en az C25 olmalıdır (TBDY, 2018).

Çizelge 4.5 Deneylerde kullanılan betonun basınç dayanımları

Donatısız-Donatılı Yığma Temel(Ortak) Basınç Dayanımı		
Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)
1	26.41	26.26
2	24.78	
3	27.58	
Donatısız Yığma Döşeme Hatıl Basınç Dayanımı		
Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)
1	25.15	25.51
2	23.98	
3	27.41	
Donatılı Yığma Döşeme Hatıl Basınç Dayanımı		
Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama(MPa)
1	27.11	26.26
2	24.59	
3	26.35	

Betonun yoğunluğu TS EN 206'den (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2014) 2400 kg/m^3 ve poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

4.1.2.4. Çelik donatı

Bu çalışmada üretilen numunelerde, boyuna ve enine donatı elemanları olarak TS 500-2 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2014) standardında belirtilen ve TS 708 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2010) standardına uygun şekilde üretilmiş nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Enine donatılar için 8 mm çapında, boyuna donatılar için ise 12 mm çapında B420C sınıfı çelik çubuklar tercih edilmiştir. Kullanılan 12 mm çapındaki donatı çubuklarından üçer adet numune alınarak, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi laboratuvarında TS 138 (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2016) standardına uygun şekilde çekme testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı biçimde Çizelge 4.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.6 B420C Nervürlü Çelik Donatı Mekanik Özellikleri

Donatı çapı (mm)	Donatı sınıfı	Akma Dayanımı f_{yk} (MPa)		Kopma Dayanımı f_{su} (Mpa)		Kopma Uzaması ϵ_{su}	
		Min.	Deneysel	Min.	Deneysel	Teorik	Deneysel
8	B420C	4200	4216	5000	5125	0.12	0.13
8	B420C	4200	4242	5000	5450	0.12	0.14
8	B420C	4200	4248	5000	5210	0.12	0.12
12	B420C	4200	4217	5000	5320	0.12	0.13
12	B420C	4200	4251	5000	5120	0.12	0.13
12	B420C	4200	4230	5000	5350	0.12	0.15

Deneylerde kullanılan $\emptyset 8$ ve $\emptyset 12$ donatılardan 3'er adet alınarak TS138'e (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2016) göre çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Çelik donatı B420C'nin yoğunluğu 7850 kg/m^3 , poisson oranı 0,3, elastisite modülü 20000 MPa ve akma dayanımı 420 MPa olarak alınmıştır (ANSYS, 2024).

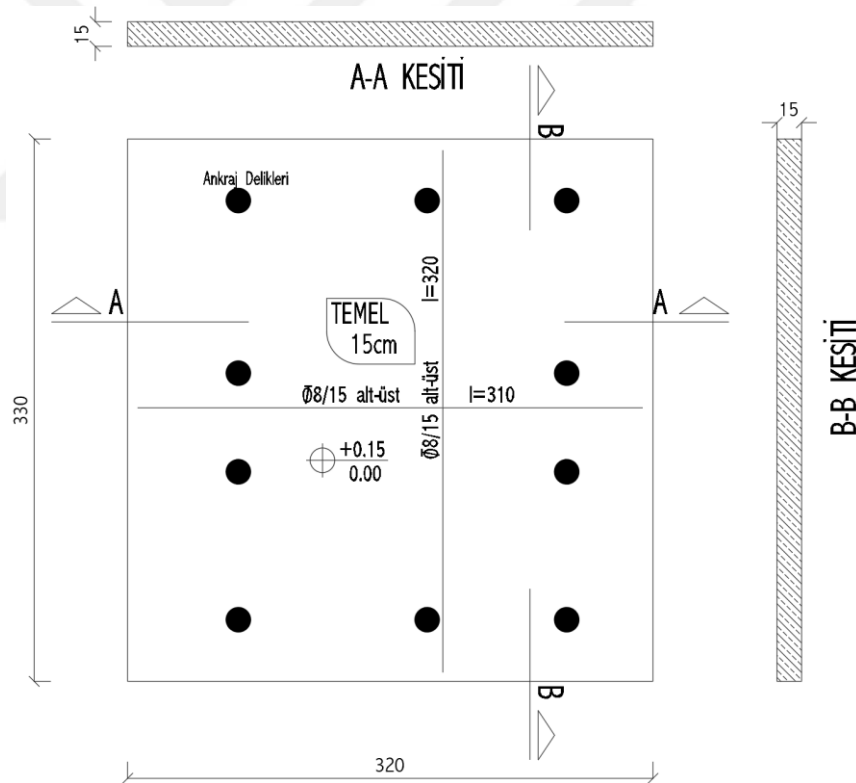
Malzemelerin ANSYS yazılımı analizlerinde kullanılan sayısal değerleri Çizelge 4.7'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Yığma binalardaki malzemelerin genel özellikleri

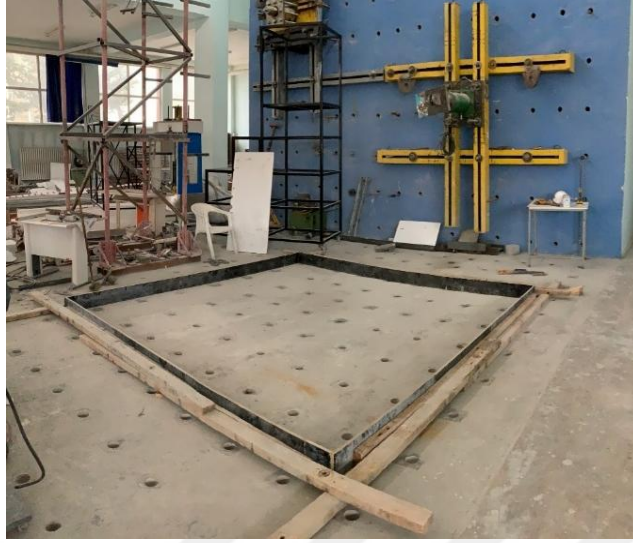
Malzeme No	Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (MPa)	Basınç Mukavemeti (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
1	Tuğla	2000	0,2	1542	5,14	-
2	Harç(S1)	2000	0,2	2080	10,4	-
	Harç(S2)	2000	0,2	2118	10,59	-
3	Beton(S1)	2400	0,2	30000	25,51	-
	Beton(S2)	2400	0,2	30000	26,26	-
4	Demir	7850	0,3	20000	-	420

4.1.3. Deney numunelerinin temel boyutları ve teknik özellikleri

Donatısız ve donatılı deney numunelerinde ortak kullanılan temelin boyutları 320 cm x 330 cm, yüksekliği 15 cm olarak belirlenerek rijit diyafram oluşturulmuştur (Şekil 4.9).

**Şekil 4.9** Deney numuneleri temel planı teknik çizimi

Deney elemanlarından temel kalıplarının hazırlanması Şekil 4.10’da verilmiştir.



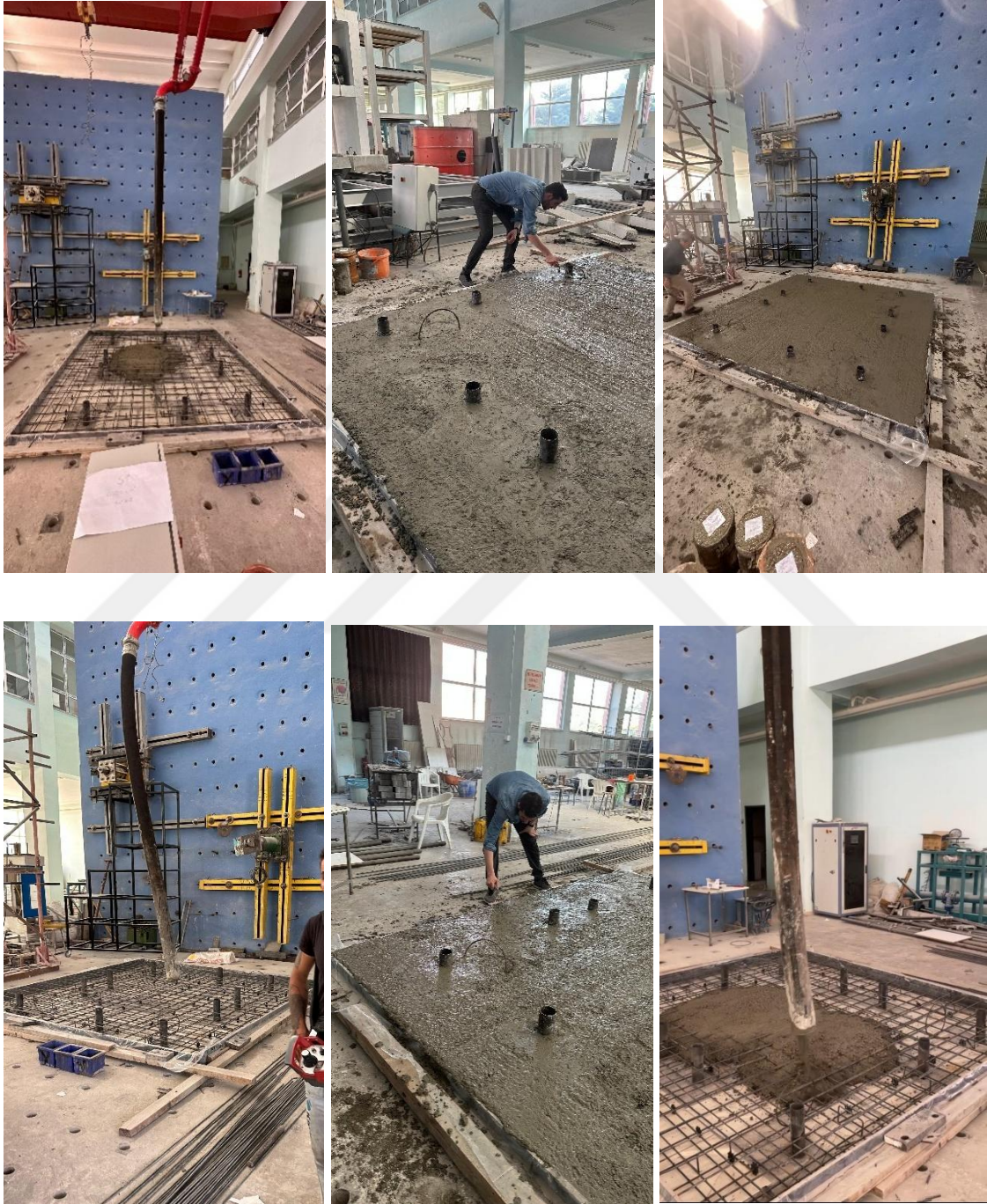
Şekil 4.10 Temel kalıbının hazırlanması

Kalıp hazırlandıktan sonra numuneyi yere sabitlemek için boru profillerden ankraj delikleri hazırlanmıştır. B420C çelik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Donatılar bağ teli ile bağlanmış olup temellerde Ø8/15 altta ve üstte olmak üzere donatılar kullanılmıştır (Şekil 4.9) . Kalıplar donatı işleminin ardından güçlendirilmiştir. Deney numunelerinin temellerinin beton dökümü yapılmadan öncesine ait görsel gösterilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Deney numuneleri temel planı fotoğrafı

Kalıp ve demir işleri tamamlandıktan sonra beton dökümü için hazır beton malzemesi kullanılmıştır. Hazır beton siparişinde C25/30 beton sipariş verilmiştir. Beton dökümü beton pompası vasıtasıyla yapılmıştır. Beton dökümü öncesi ve sonrasına ait görseller gösterilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Deney numuneleri temel beton dökümü

Temel betonu dökümü sonrası temelin hareketini engelleyebilmek için laboratuvar deliklerini kullanarak somunlar yardımıyla alttan ve üstten sıkılarak Şekil 4.13’de gösterilen tijlerle temel sabitlenmiştir.



Şekil 4.13 Temel sabitleme tijlerinin görüntüsü

4.1.4. Donatısız yığma bina numunenin üretilmesi

Donatısız yığma binanın inşasına, önceden hazırlanmış olan temel üzerine yığma tuğlaların harç kullanılarak örülmesiyle başlanmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Donatısız yığma bina duvar örülme işlemi

TBDY 2018’de yer alan koşullar dikkate alınarak, bina tasarımında gerekli kapı ve pencere boşlukları bırakılmıştır. Bu boşlukların üst kısımlarında, taşıyıcı sistemin dayanıklılığını ve stabilitesini sağlamak amacıyla, yönetmelikte belirtilen teknik gerekliliklere uygun olarak yerinde döküm yöntemiyle lento imalatı yapılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Donatısız yığma bina lento üretimi öncesi ve sonrası.

Duvar uygulaması yapıldıktan sonra lento üretimi aşamasına geçilmiştir. Kapı ve pencere açıklıklarının üst kısımlarında, taşıyıcı sistemin bütünlüğünü sağlamak amacıyla betonarme lentolar yerleştirilmiştir. Bu lentolar, her iki yönde 15 cm olacak şekilde duvar yüzeyine bindirilerek tasarlanmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.17 Hidrolik pistonu sabitleme plaka, somunları ve tijleri

Donatı montajı tamamlandıktan sonra beton döküm aşamasına geçilmiştir. C25/30 beton sınıfındaki malzeme beton pompası vasıtasıyla döşemeye dökülmüştür. Şekil 4.18’de beton döküm işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Beton dökümü işlemi

Kalıplar beton prizi alması için 15 gün beklendikten sonra sökülümüş olup analiz esnasında çatlaklar ve kırılmaları daha iyi görebilmek için beyaz renkli bir boya ile boyanmıştır (Şekil 4.21). Tuğla-harç arasındaki çatlakların daha iyi izlenebilmesi için numune üzerine sıva yapılmamıştır.



Şekil 4.21 Donatısız deney numunesinin beyaz renk ile boyanmış görünümü

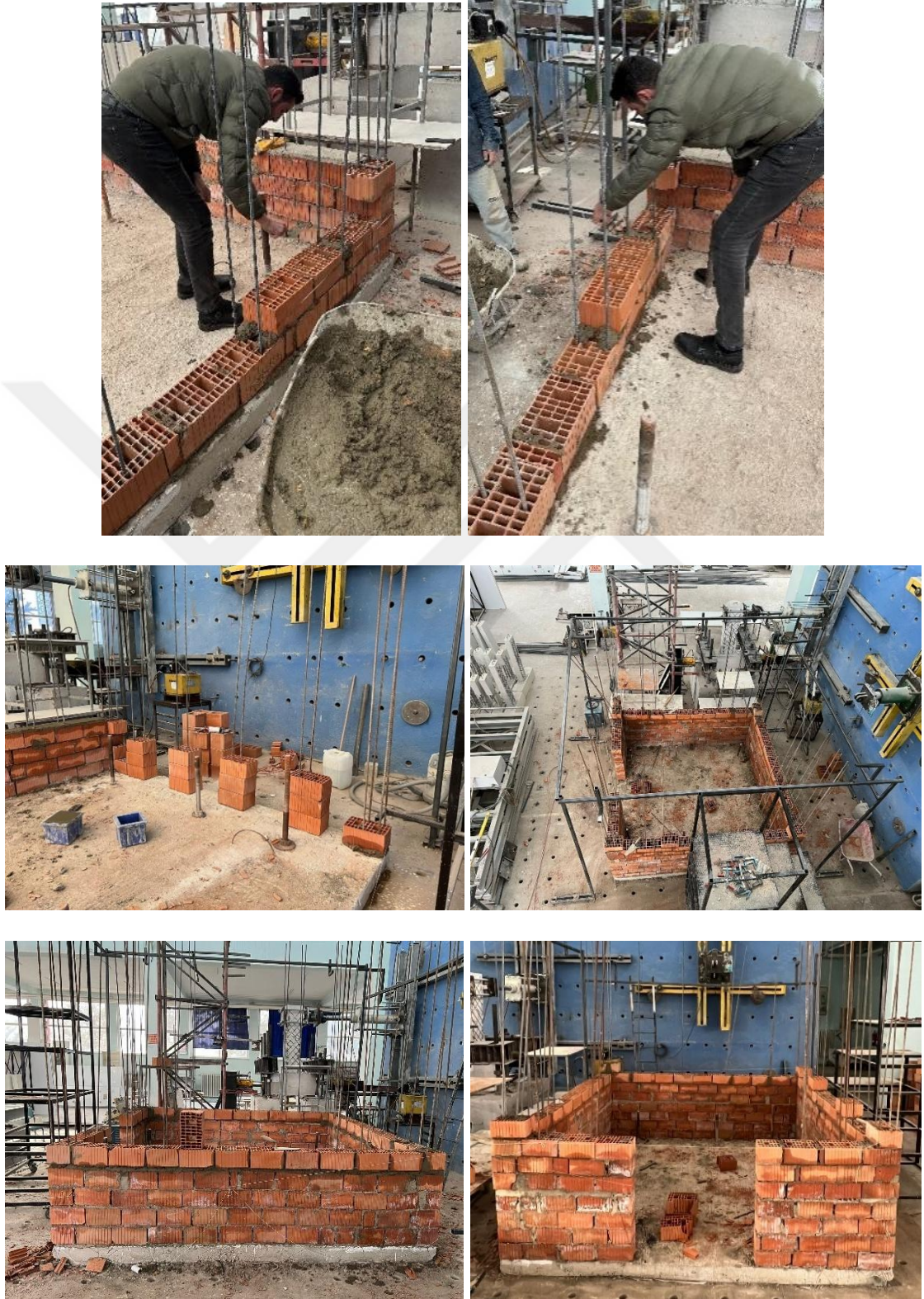
4.1.5. Donatılı numunenin teknik özellikleri

Donatılı yığma binanın inşasına, donatısız yığma bina numunelerinin yıkımı sonrası aynı temel kullanılarak devam edilmiştir. Donatılı numunelere ait B420C sınıfı nervürlü çelik donatılar, duvar örülmeden önce matkapla açılan delikler aracılığıyla temel içerisine yerleştirilmiş ve epoksi yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Donatılı yığma bina duvar örülme işlemi ve ekimi yapılmış donatılar

Donatılı yığma binada hem yatay hem de düşey donatılar TBDY 2018 standartlarına uygun olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4.23).



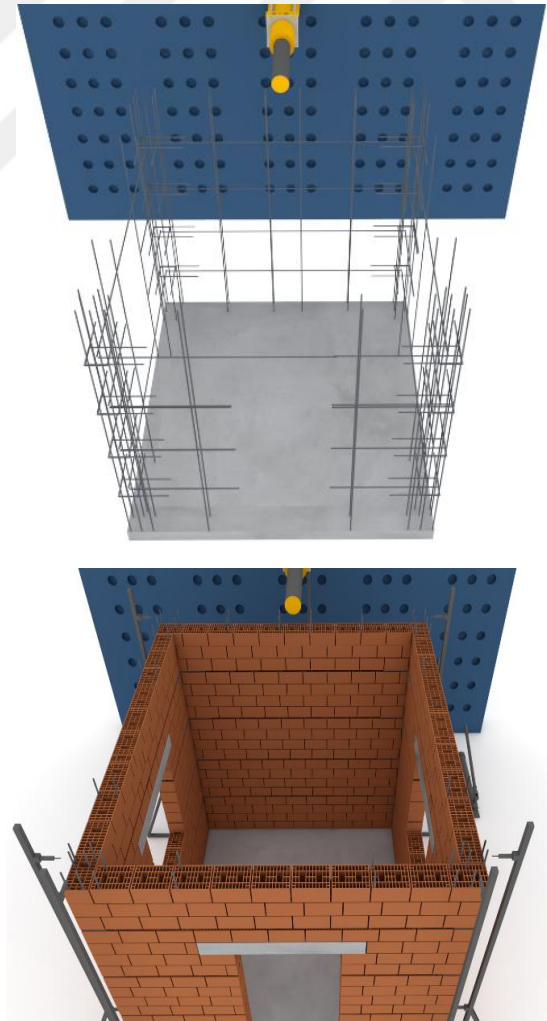
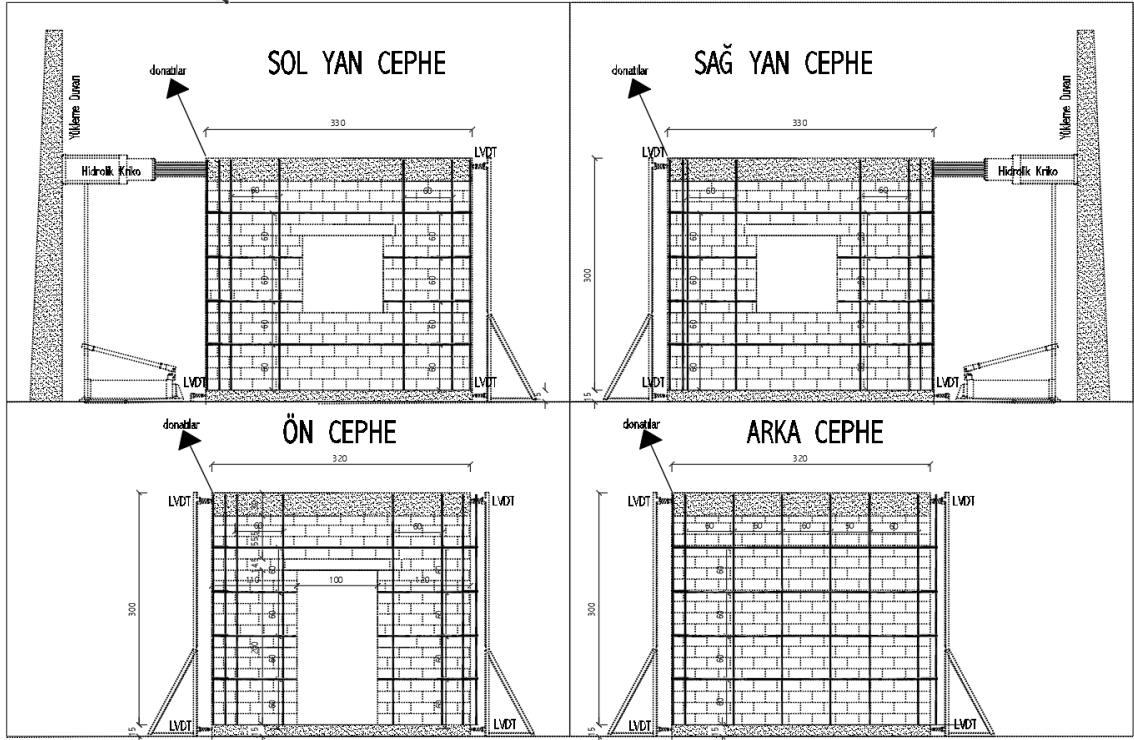
Şekil 4.23 Donatılı yığma bina duvar örülme işlemi ile yatay ve düşey donatıların montajı

Binanın köşelerinde 50Ø yani 60 cm uzunluğunda her iki tarafa da bakacak şekilde yatay ucu açık etriyeler yapılmıştır. (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Donatılı yığma bina köşe donatı planı görseli

Donatılı yığma binanın inşasında, yatay donatılar 55-60 cm aralıklarla Ø12 çapında çubuklar kullanılarak yerleştirilmiştir. Duvarların uç bölgelerinde ise Ø8 çapında açık etriyeler kullanılarak ek bir güçlendirme sağlanmıştır. Kapı ve pencere açıklıkları için ek bir önlem olarak, bu açıklıkların alt ve üst kısımlarına 2Ø12 çapında yatay donatı ilave edilmiştir. Duvar köşeleri, yapısal dayanımı artırmak amacıyla 4Ø12 çapında donatı çubukları ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, düşey donatılar duvar yüksekliği boyunca tuğla boşluklarından geçirilmiş ve bu donatılar 50-60 cm aralıklarla düzenlenmiştir. Donatılar, yapı elemanlarının dayanıklılığını artırmak ve deprem yüklerine karşı yönetmelik şartlarını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Donatılı yığma binaya ilişkin detaylı donatı planı Şekil 4.25'te ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



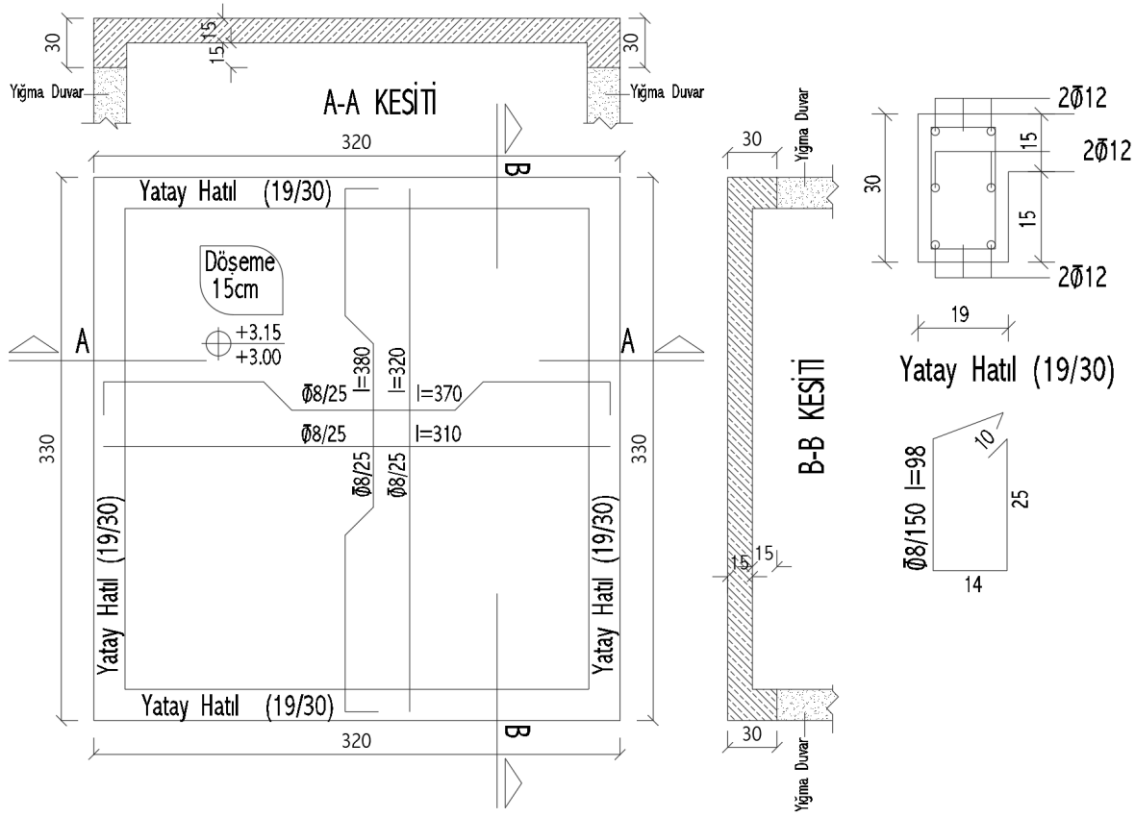
Şekil 4.25 Donatılı yığma bina donatı yerleşimi

Duvar ve donatı imalatı yapıldıktan sonra lento üretimi aşamasına geçilmiştir. Kapı ve pencere açıklıklarının üst kısımlarında, taşıyıcı sistemin bütünlüğünü sağlamak amacıyla betonarme lentolar yerleştirilmiştir. Bu lentolar, her iki yönde 15 cm olacak şekilde duvar yüzeyine bindirilerek tasarlanmıştır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Donatılı yığma bina lento üretimi

Yatay hatılların donatı ve kalıp planı Şekil 4.27’de gösterilmiştir. B420C çelik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Donatılar bağ teli ile bağlanmış olup yatay hatılarda boyuna 6Ø12 donatı ve Ø8/150(mm) etriye yerleştirilmiştir.



Şekil 4.27 Donatılı yığma bina döşeme ile yatay hatıl kalıp ve donatı planı

Donatı montajı tamamlandıktan sonra kalıp ve ankraj levhaları sabitlenmiş olup numune, beton dökümüne hazırlanmıştır. Beton siparişi donatısız numunede olduğu gibi yine C25/30 olarak verilmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 Beton dökümü öncesi hazırlanmış donatılı yığma deneyi numunesi

Donatı montajı tamamlandıktan sonra beton döküm aşamasına geçilmiştir. C25/30 beton sınıfındaki malzeme beton pompası vasıtasıyla döşemeye dökülmüştür. Şekil 4.29’da beton döküm işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.29 Beton dökümü işlemi

Döküm esnasında vibratör cihazı ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Beton basınç dayanımlarını incelemek için, dökülen betondan numuneler alınmıştır (Şekil 4.30).



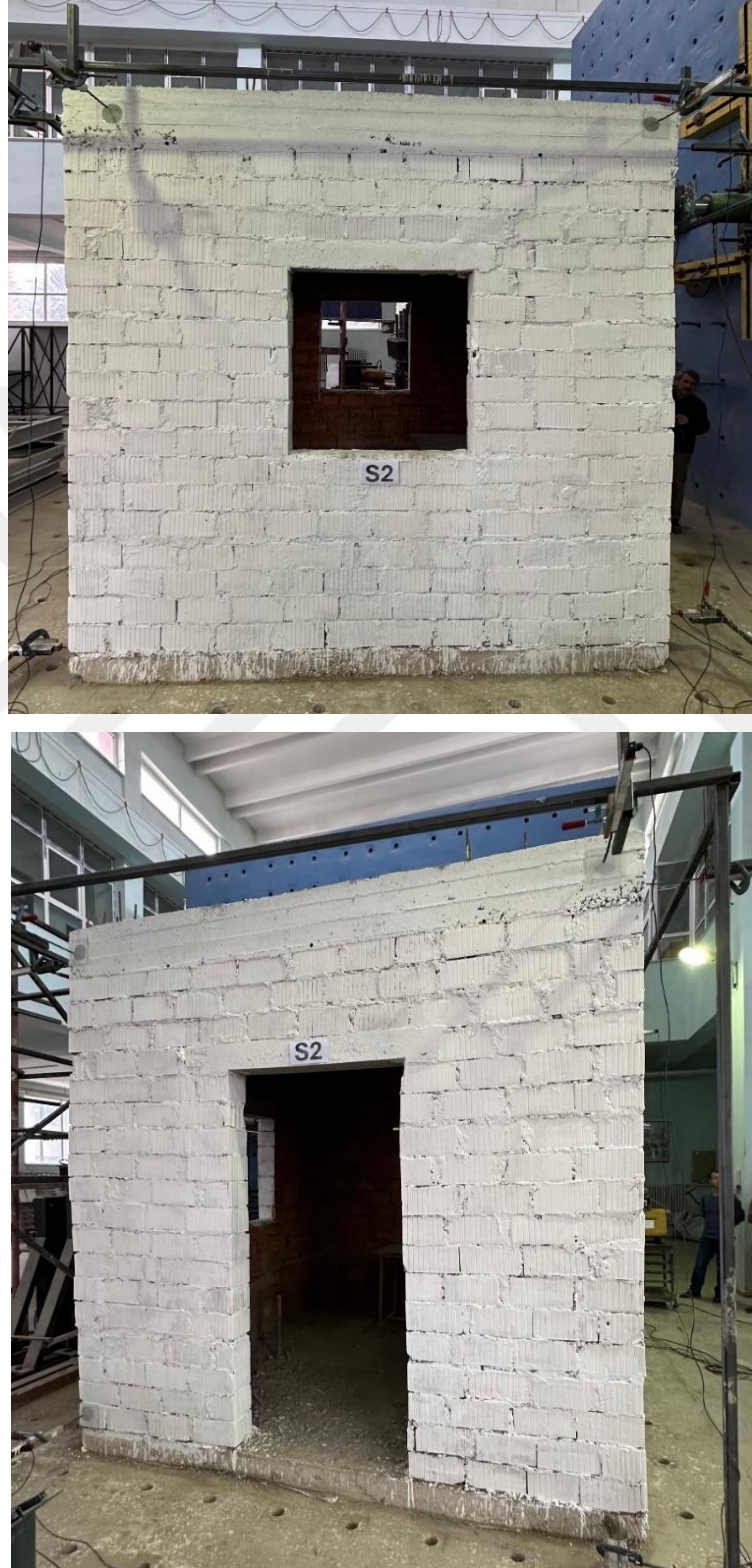
Şekil 4.30 Beton dökümü işlemi, numune alımı

Beton dökümü sonrasında gerekli kür şartlarını sağlamak amacıyla periyodik olarak beton sulama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 Beton dökümü sonrası sulama işlemi yapılmış numune

Kalıplar beton prizi alması için 15 gün beklendikten sonra sök÷lmüş olup analiz esnasında çatlaklar ve kırılmaları daha iyi görebilmek için beyaz renkli bir boya ile boyanmıştır (Şekil 4.32).



Şekil 4.32 Donatılı deney numunesi beyaz renk ile boyanmış görünümü

4.2. Donatısız ve Donatılı Yığma Deney Düzenekleri

4.2.1. Ölçüm tekniği

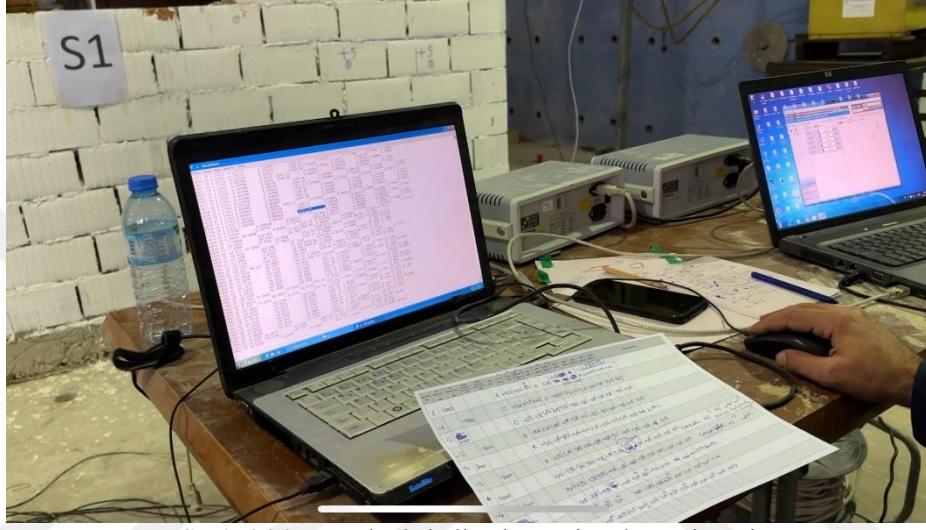
Deneylerde, yük ölçümleri bir adet yük hücresi ile gerçekleştirilirken, yer değiştirme ölçümleri için 12 adet potansiyometrik cetvel (LVDT) kullanılmıştır (Şekil 4.33). Bu LVDT'lerin daha hassas ölçüm yapabilmesi için numune üzerinde geldiği yerlere 15 cm eninde, 15 cm boyunda cam parçaları kestirilerek silikonla yerleştirilmiştir. Yük hücresi ve potansiyometrik cetvellere gelen veriler, kablolar aracılığıyla bir veri toplama sistemine aktarılmıştır.



Şekil 4.33 Deneylerde kullanılan potansiyometrik cetvel ve yük hücresi

Veri toplama sistemine kaydedilen ölçümler, aygıt geçidi adı verilen bir cihaz yardımıyla bilgisayara iletilmiştir. LVDT'lerin 4 tanesi temelde olup toplamda 12 adet LVDT ve 1 adet yük ölçümü için kullanılan kanal (8.Kanal) ile 13 kanallı bir veri toplama sistemi oluşturulmuştur.

Bilgisayara aktarılan veriler, özel bir yazılım aracılığıyla anlık olarak analiz edilmiş ve deney sırasında istenen grafiklerin eşzamanlı olarak oluşturulması sağlanmıştır (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi

Ayrıca, elde edilen veriler bilgisayarda bulunan bir hesaplama programına kaydedilmiştir. Bu kayıtlar, deney sonrası farklı analizlerin yapılabilmesi ve çeşitli grafiklerin oluşturulabilmesi için bir veri tabanı olarak kullanılmıştır. Böylelikle deneyden elde edilen tüm ölçümler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Deneylerde, hidrolik silindirin ucuna yerleştirilen yük hücresi, silindirin numune üzerine uyguladığı yükü ölçmek için kullanılmıştır. Bu yük hücresi, 2000 kN kapasiteye sahiptir ve deneylerde ortaya çıkabilecek maksimum yük değerlerinin çok üzerinde bir kapasite sunması nedeniyle tercih edilmiştir (Şekil 4.35).

Yük hücresinden elde edilen veriler, cihazın çıkış uçları aracılığıyla veri toplama sistemine aktarılmıştır. Bu sistem, ölçüm sonuçlarını dijital hale getirerek bilgisayara iletmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılan yük değerleri, deney sırasında anlık olarak izlenmiş ve gerekli analizlerin yapılabilmesi için kaydedilmiştir. Deney numunesine uygulanan yüklerin detaylı bir şekilde incelenmesine ve kayıt altına alınmasına olanak tanımıştır.



Şekil 4.35 Yükleme düzeneği

4.2.2. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Deneyler sırasında, numunelerin davranış özelliklerini analiz edebilmek amacıyla, LVDT'ler ve yük hücrelerinden elde edilen ölçüm verileri kullanılmıştır. Bu veriler, numunelerin yük-deformasyon ilişkileri ile mekanik performansını değerlendirmek için temel alınmıştır.

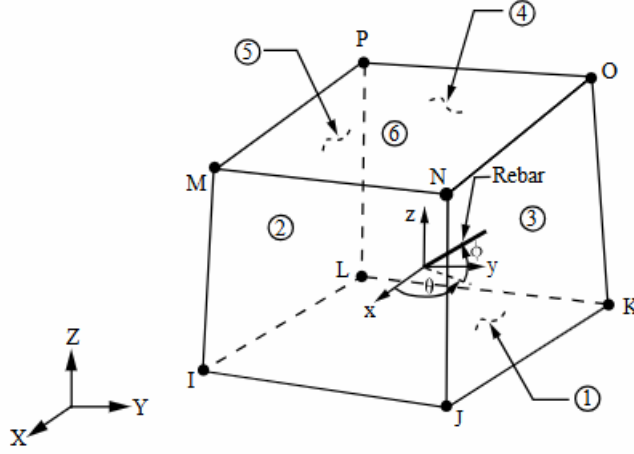
Deney sonuçlarının görselleştirilmesi amacıyla, her bir numune için grafikler hazırlanmıştır. Grafiklerin oluşturulma süreci, kullanılan veri işleme yöntemleri ve analiz adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu kapsamda, ölçüm verilerinin işlenmesi, grafiklere dönüştürülmesi ele alınmıştır.

4.3. Sayısal Çalışma

Donatısız yığma bina (S1) ve Donatılı yığma bina (S2), sonlu eleman modelleri ANSYS yazılımı ile mikro model tekniği kullanılarak oluşturulmuştur.

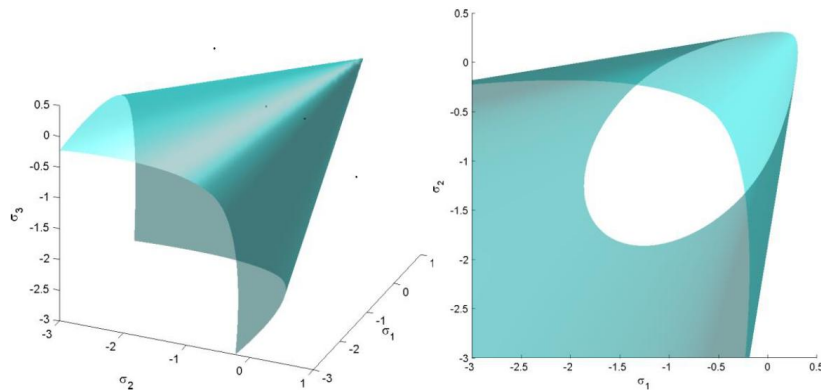
Betonun çatlama ve ezilme gibi doğrusal olmayan mekanik davranışlarını dikkate alabilen SOLID65 elemanı tercih edilmiş ve katı modelleme tekniği uygulanmıştır. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. SOLID65 elemanı, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşur (Şekil 4.36). Bu özellikleri sayesinde, betonarme yapıların doğrusal olmayan analizlerinde, özellikle

çatlama ve ezilme gibi hasar mekanizmalarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılır (ANSYS, 2024).



Şekil 4.36 SOLID65 elemanı geometrisi

ANSYS’de, doğrusal olmayan analizlerde betonun davranışını modellemek için 5 parametrelili Willam-Warnke modeli kullanılmaktadır. Bu model, betonun hem çekme dayanımı hem de basınç dayanımı davranışlarını tanımlamak amacıyla tasarlanmıştır. SOLID65 elemanında Willam-Warnke modeli tercih edilmekte ve betonun mekanik özellikleri (çekme ve basınç dayanımları) dikkate alınarak analizler yapılmaktadır. Çekme dayanımı düşük olan betonun çatlama mekanizması, yayılı çatlak (smeared crack) yaklaşımı ile modellenmektedir. Şekil 4.37’de, üç boyutlu asal gerilme uzayında Willam-Warnke kırılma yüzeyi ile iki boyutlu düzlemdeki yansıması sunulmaktadır. İki boyutlu gerilme yüzeyi, üç boyutlu kırılma yüzeyinin σ_1 ve σ_2 gerilmelerinin bulunduğu düzlemdeki kesitini oluşturmaktadır (Kömürcü, 2017).



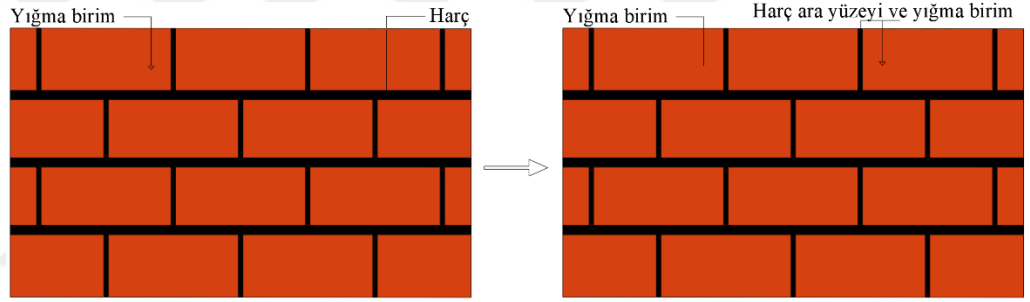
Şekil 4.37 Üç boyutlu uzayda Willam-Warnke kırılma yüzeyi ve düzlemde Willam-Warnke kırılma yüzeyi Kömürcü, (2017)

4.3.1. Yığma duvarların modellenme teknikleri

Yığma duvarların modellenmesinde, malzemelerin heterojen yapısı ve farklı mekanik özellikleri nedeniyle gerçekçi bir şekilde analiz hedeflenmektedir. Bu yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları, mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro ölçekli modelleme yöntemleriyle aşağıda incelenmiş olup kısaca açıklanmıştır (Paulo B. Lourenço, 2013).

a) Mikro modelleme tekniği;

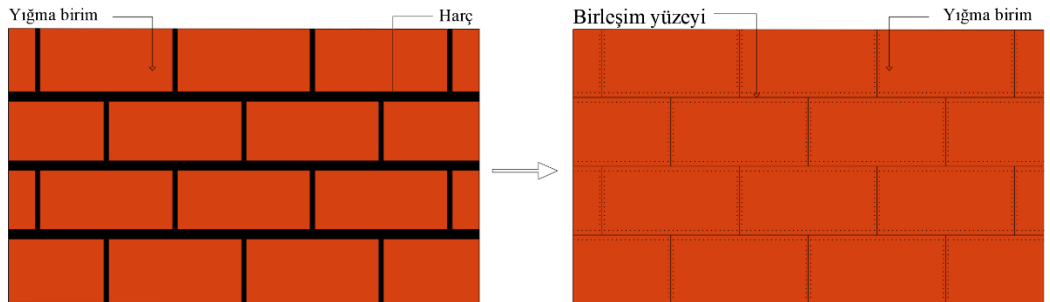
Bu yöntem, tuğla veya taş gibi yığma birimlerin, harcın ve birleşim ara yüzeylerinin ayrı ayrı modellenmesini içermektedir. Şekil 4.38’te, mikro modelleme yaklaşımıyla oluşturulan yığma birimler, harç ve ara yüzeyler gösterilmektedir.



Şekil 4.38 Mikro modelleme tekniği

b) Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği;

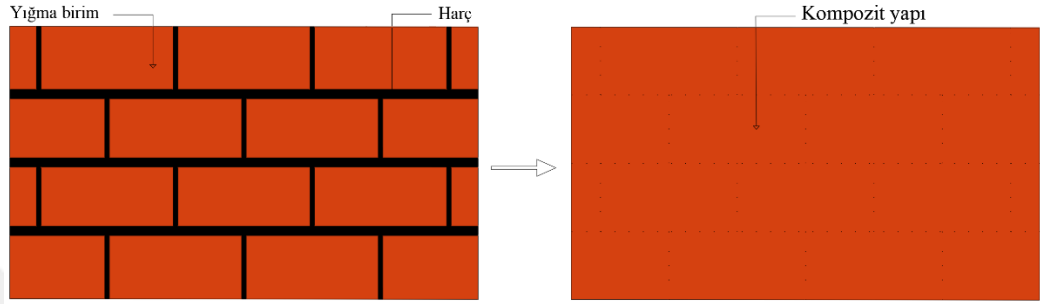
Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde, tuğla veya taş gibi yığma birimler ile bunların temas yüzeyleri modellenirken, harç ayrı bir eleman olarak tanımlanmamaktadır. Bu yöntem farklı yaklaşımlarla uygulanabilmektedir. Şekil 4.39’da yığma birimler ve birleşim yüzeyleri gösterilmektedir.



Şekil 4.39 Basitleştirilmiş mikro model tekniği.

c) Basitleştirilmiş makro modelleme tekniği;

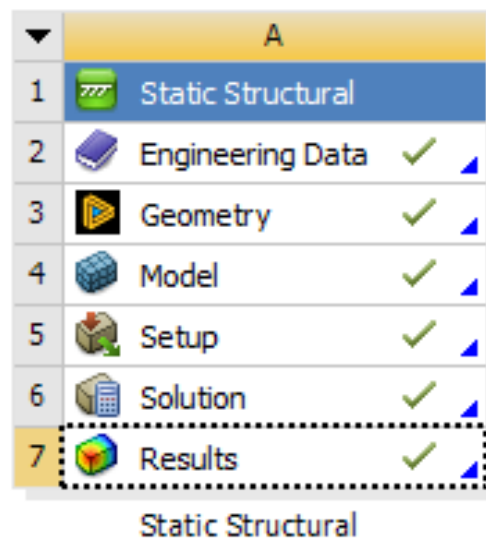
Homojen modeller, tuğla, taş ve harcın tek bir malzeme gibi kabul edildiği sürekli modellerdir. İleri tekniklerle homojenleştirilen yığma duvarlar, kompozit yapılar olarak modellenmektedir. Şekil 4.40’da makro modelleme ile elde edilen kompozit yapı sunulmaktadır.



Şekil 4.40 Basitleştirilmiş makro modelleme tekniği.

4.3.2. Sonlu eleman modelleri

Donatısız(S1) ve donatılı(S2) yığma binaların sonlu eleman modeli, ANSYS Static Structural analiz sistemi kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.41). S1 ve S2 yığma binalarına mikro modelleme ile doğrusal olmayan statik itme ve çekme analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.41 ANSYS Statik analiz sistemi görünümü

S1 ve S2 binaların yapımında kullanılan tuğla, harç, beton ve çelik donatıların (structural steel) malzeme özellikleri Çizelge 4.7'ten alınarak ANSYS yazılımına aktarılmıştır (Şekil 4.42 ve Şekil 4.43).

The figure displays three screenshots of the ANSYS Engineering Data: Material View interface, showing the material properties for three materials: 1_tugla, 1_harc, and harc.

1_tugla

Property	Value
Density	2e-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1542,0 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	856,67 MPa
Shear Modulus	642,50 MPa
Compressive Ultimate Strength	5,1400 MPa

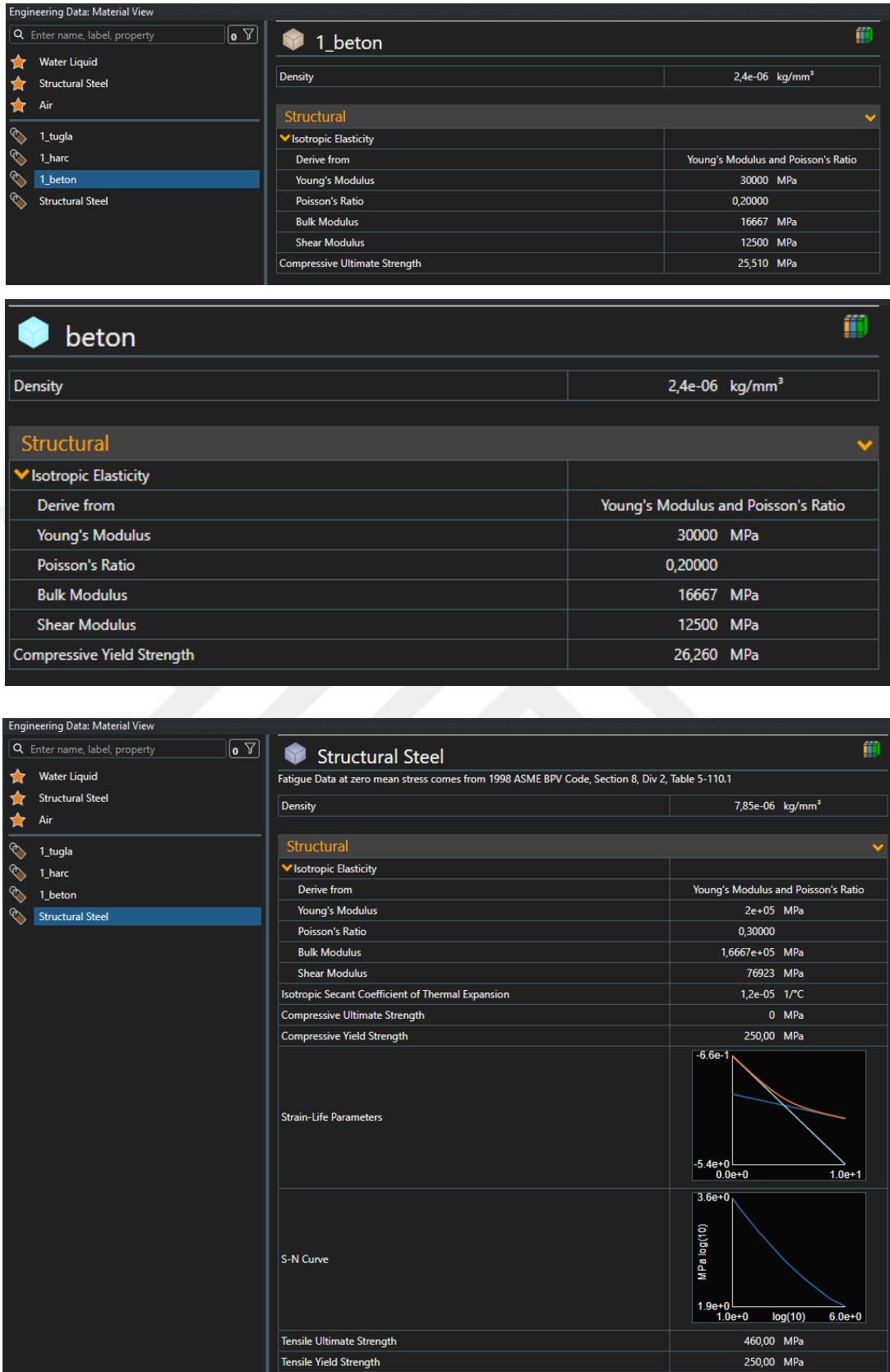
1_harc

Property	Value
Density	2e-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2080,0 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	1155,6 MPa
Shear Modulus	866,67 MPa
Compressive Ultimate Strength	10,400 MPa

harc

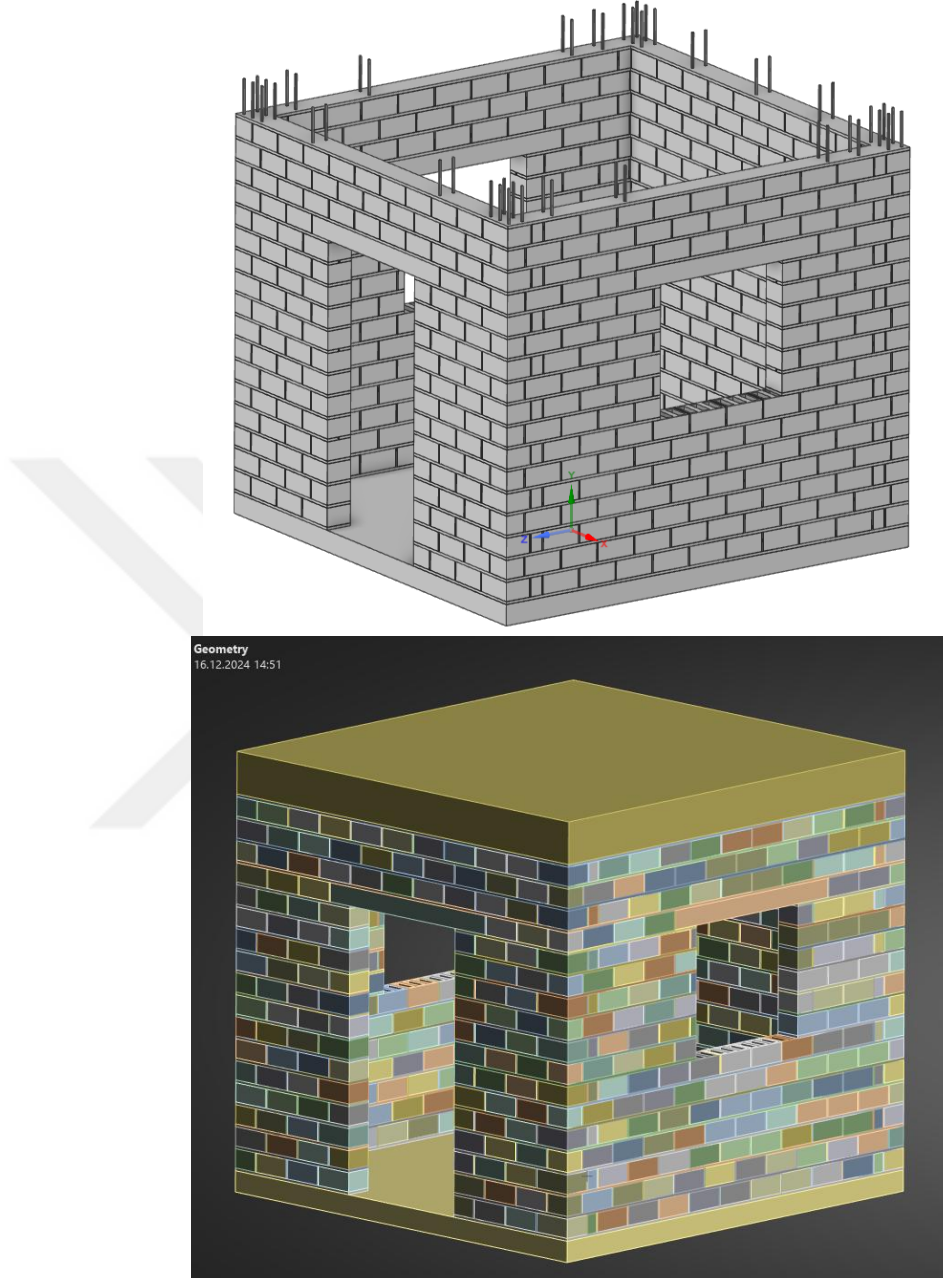
Property	Value
Density	2e-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2118,0 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	1176,7 MPa
Shear Modulus	882,50 MPa
Compressive Yield Strength	10,600 MPa

Şekil 4.42 ANSYS kullanılan malzeme verileri-1



Şekil 4.43 ANSYS kullanılan malzeme verileri-2

S1 ve S2 numuneleri mikro modelleme tekniği kullanılarak tuğla, harç, beton ve çelik donatılar için ayrı ayrı geometrileri ANSYS'te oluşturulmuştur (Şekil 4.44).



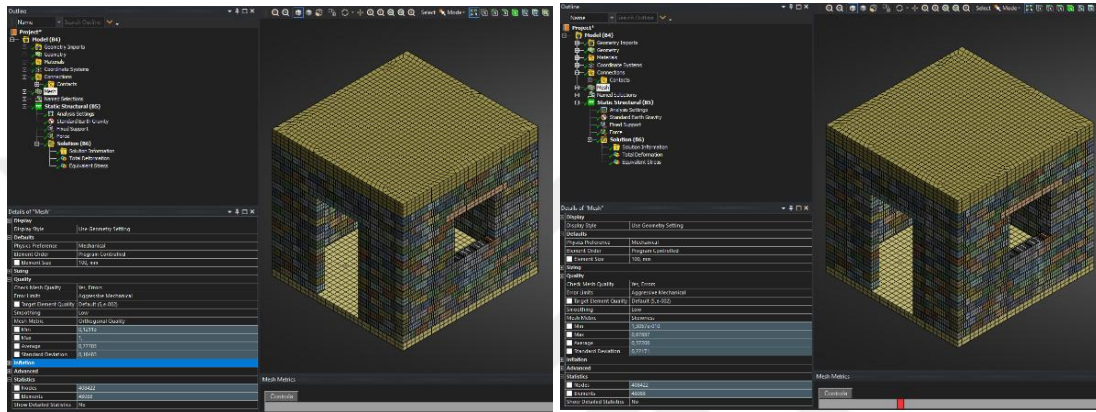
Şekil 4.44 Yığma binaların geometrisi (ANSYS)

Yapılan çözümlemede oluşturulan ağ yapısının S1 numunesinde toplam düğüm sayısı 408422, eleman sayısı ise 48088 olarak hesaplanmış olup S2 numunesinde toplam düğüm sayısı 1176940, eleman sayısı ise 274975 olarak hesaplanmıştır. Çözümün doğruluğunun sağlanması ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi amacıyla, S1 ve S2 için kullanılan ağ yapısına ilişkin kriterler Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Skewness ve orthogonal quality değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması, elde edilen

sonuçların doğruluğunu da kabul edilebilir seviyede olduğuna işaret etmektedir (Şekil 4.45).

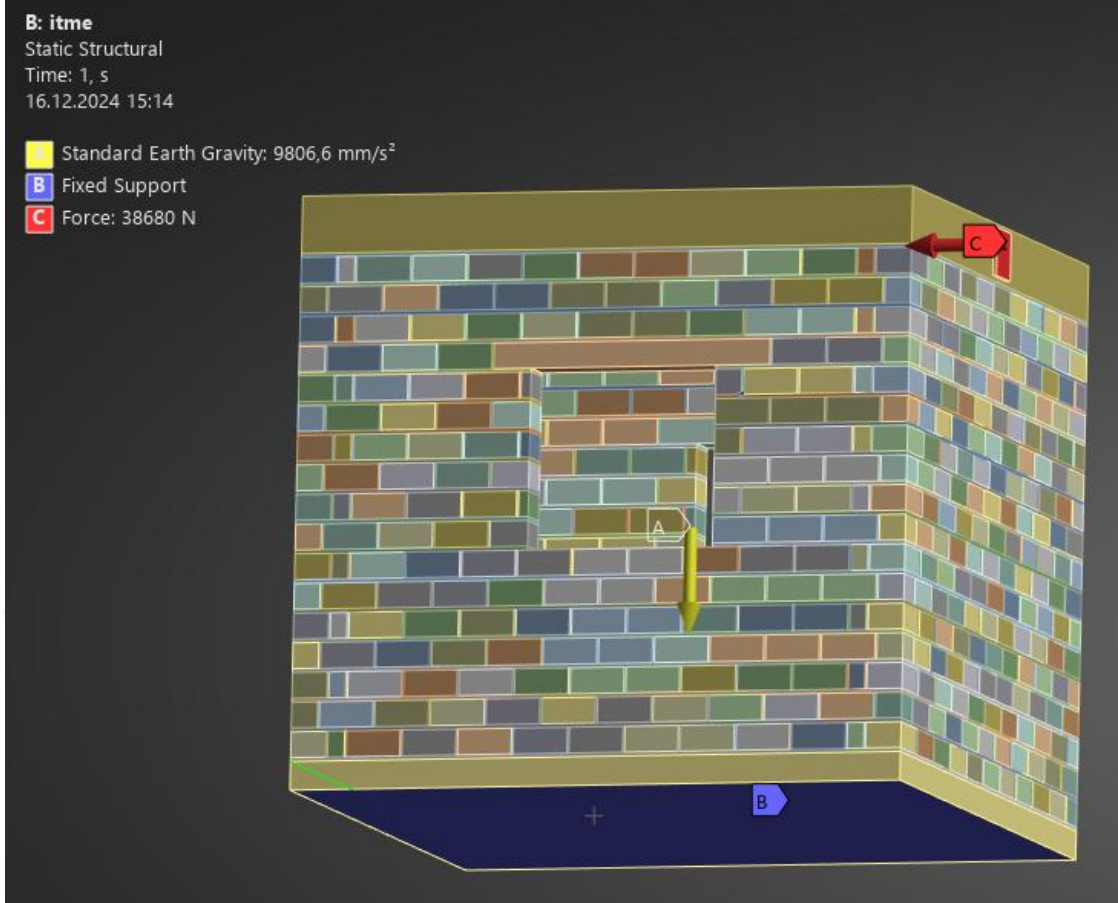
Çizelge 4.8 S1 ve S2 Numuneleri mesh kalite durumu

Mesh Kalite Kriterleri		
Grafik Türü	Skewness	Orthogonal
İstenilen Değer	(< 0.95)	(0.15 >)
S1 Numunesi Değerleri	0.87887	0.12113
S2 Numunesi Değerleri	0.93053	0.14976



Şekil 4.45 S1 Numuneleri mesh kalite durumu

Meshleme işlemi tamamlandıktan sonra, yer çekimi kuvveti “A”, binanın temelini sabitletmesi “B” ve binaya etkiyen yük ise “C” olarak adlandırılmış ve bu durum Şekil 4.46’da görselleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda hem negatif hem de pozitif yönlerde oluşan maksimum kuvvet değerleri sayısal çalışmada verilmiş olup, araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.46 Numunelerin statik analizi öncesi verilerin girilmesi

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde Donatısız yığma bina (S1) ve Donatılı yığma bina (S2) deney numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları incelenecektir.

5.1. Yük Geçmişi Grafiklerinin Oluşturulması

Deneylerde, numunelere uygulanan itme ve çekme yüklemeleri sırasında ölçülen maksimum yük ve tepe deplasman değerleri belirlenmiştir. Bu ölçümler, numunelerin yük-deplasman ilişkilerini analiz etmek için temel veri setini oluşturmuştur.

Elde edilen bu veriler kullanılarak, yükleme geçmişini detaylı bir şekilde gösteren grafikler hazırlanmıştır. Grafikler, deney sırasında numunelere uygulanan yükleme ve boşaltma döngülerini görselleştirmek ve numunelerin mekanik davranışlarını değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur.

5.2. Yatay Yük-Tepe Deplasmanı Grafiklerinin Oluşturulması

Yatay yük-tepe deplasmanı grafiklerinin hazırlanmasında, deney sırasında yük hücrelerinden ve LVDT'lerden elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasıyla oluşturulan verilerden yararlanılmıştır. Öncelikle, her bir numune için toplam yük-tepe deplasmanı histeresis eğrisi çizilmiştir.

Bu eğriler, numunelere uygulanan itme ve çekme çevrimleri sırasında kaydedilen veriler temel alınarak oluşturulmuştur. İtme ve çekme çevrimlerinde farklı yönlerde alınan değerler, histeresis eğrisinin üst ve alt bölgelerinde birbirini takip eden döngüsel bir şekil oluşturmuştur.

Her çevrimde elde edilen maksimum yük noktaları, numunenin taşıma kapasitesini temsil eden bir dayanım zarf eğrisi elde etmek için birleştirilmiştir. Bu zarf eğrileri, numunelerin yükleme altında sergilediği dayanım ve deformasyon özelliklerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

5.3. Rijitlik Azalımı Grafiklerinin Oluşturulması

Yapı elemanlarının yer değiştirme etkilerine karşı koyma kapasitesi, rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik, elemanın deformasyona uğrayabilmesi için gereken etki

kuvvetiyle doğrudan ilişkilidir; bu kuvvet, rijitlik arttıkça yükselmektedir. Deney numunelerinin rijitlik değerleri, her bir çevrim için elde edilen yük-deplasman eğrilerinin eğimlerinin $(Rijitlik(\varphi_i) = (|F_i(Yük)|/(|\delta_i(Deplasman)|))$ hesaplanması yoluyla belirlenmiştir.

Deneyssel çalışmalar sonucunda, numunelere ait rijitlik azalımı grafiklerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu grafiklerde, itme çevrimleri sağ tarafta, çekme çevrimleri ise sol tarafta temsil edilmiştir. Bu grafikler, her bir numunenin çevrimler boyunca sergilediği rijitlik kaybını ve mekanik davranışını ayrıntılı bir şekilde göstermektedir.

Her numune için başlangıç rijitliği, test sırasında ilk eğilme çatlağının oluştuğu yük seviyesine göre hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, maksimum yük düzeyindeki rijitlik değerleri de itme ve çekme çevrimleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler, deney sonuçları bölümünde hem grafiksel olarak hem de çizelgeler halinde sunulmuştur.

Bu analiz, numunelerin yük altındaki rijitlik değişimlerini ve deformasyon kapasitelerini değerlendirmede önemli bir temel sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan hesaplama yöntemleri, literatürdeki yaklaşımlarla uyumlu bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.4. Enerji Tüketimi Grafiklerinin Oluşturulması

Deney numunelerinin enerji tüketim kapasiteleri, yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanması yoluyla belirlenmiştir. Bu yöntem, her bir numunenin mekanik davranışını enerji bakış açısından değerlendirmek için temel bir analiz aracı olarak kullanılmıştır.

Her numuneye ait enerji tüketim kapasitesini daha iyi anlayabilmek için iki ayrı enerji grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikler, itme ve çekme çevrimleri sırasında numunelerin tükettiği enerjiyi görsel olarak sunmakta ve çevrimler arasındaki enerji farklarını değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Deney sonuçları bölümünde ayrıntılı olarak sunulan enerji grafikleri, numunelerin çevrimsel yükleme altındaki enerji tüketim karakteristiklerini ve bu süreçte gösterdikleri yükleme kapasitesi farklılıklarını kapsamlı bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu grafikler aracılığıyla elde edilen veriler, numunelerin yapısal performanslarının değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Özellikle, enerji tüketim davranışları ile yük taşıma kapasiteleri arasındaki ilişkiyi nicel olarak analiz etme imkânı sunmakta; bu da malzeme davranışının anlaşılması ve karşılaştırılması açısından değerli bilgiler sağlamaktadır.

5.5. Yığma Binaların Deneysel Sonuçları ve Karşılaştırmaları

Deney sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve numuneler arasındaki performans farklarının karşılaştırılabilmesi için her bir numuneye ait grafikler hazırlanmıştır. Bu grafikler, numunelerin mekanik davranışlarını, hasar gelişimini ve yük-deplasman ilişkilerini görsel olarak ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan grafikler, deneysel bulguların detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ve yorumlanması için önemli bir temel sağlamaktadır.

Hazırlanan grafikler aşağıda verilmiştir.

- a) Toplam yatay yük-tepe deplasmanı çevrimsel histeresis eğrileri ve zarf eğrileri,
- b) Rijitlik azalımı grafikleri,
- c) Tüketilen enerji-deplasman grafikleri,

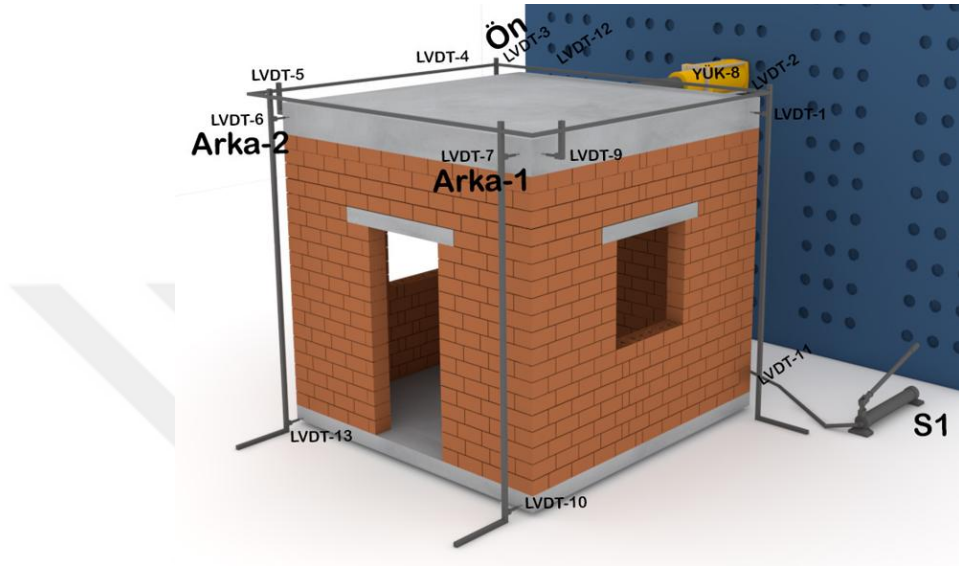
Deney sırasında, numune üzerine itme ve çekme olmak üzere toplamda 7 çevrimlik bir yükleme uygulanmıştır. Bu yükleme döngüleri, numunenin yük taşıma kapasitesini ve deformasyon davranışını değerlendirmek amacıyla planlanmış ve uygulanmıştır. Elde edilen veriler, deneyin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve diğer numune ile karşılaştırılabilmesi için temel oluşturmuştur.

Bu bölümde, deney numunelerinin tersinir ve tekrarlanır yükler altında test edilme süreci ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Deney programında, yükleme işlemi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yük kontrollü yükleme yapılmıştır. Daha sonra deplasman kontrollü yükleme aşamasına geçilmiş ve bu süreç, numunelerde ciddi hasarlar oluşana kadar devam ettirilmiştir.

Deney sırasında, numunelerde meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu sistematik bir şekilde kayıt altına alınmıştır. Her yükleme çevriminin ardından, numune üzerinde oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve numaralandırılmıştır. Ayrıca, deneylerin sonunda numunelerdeki hasar durumu deney fotoğrafları ile belgelenmiştir.

5.5.1. Donatısız yığma duvar deneyi ile ilgili bulgular

Donatısız Deney Numunesi “S1” kısaltması kullanılarak tersinir-tekrarlanır yük etkisi altındaki davranışları test edilmiştir. Deney numunesinin, deney düzeneği içerisindeki yerleşim durumu Şekil 5.1’te detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Donatısız deney numunesindeki (S1) elemanların isimlendirilmesi

S1 deney numunesinin deney başlamadan önceki görselleri Şekil 5.2’da gösterilmiştir.



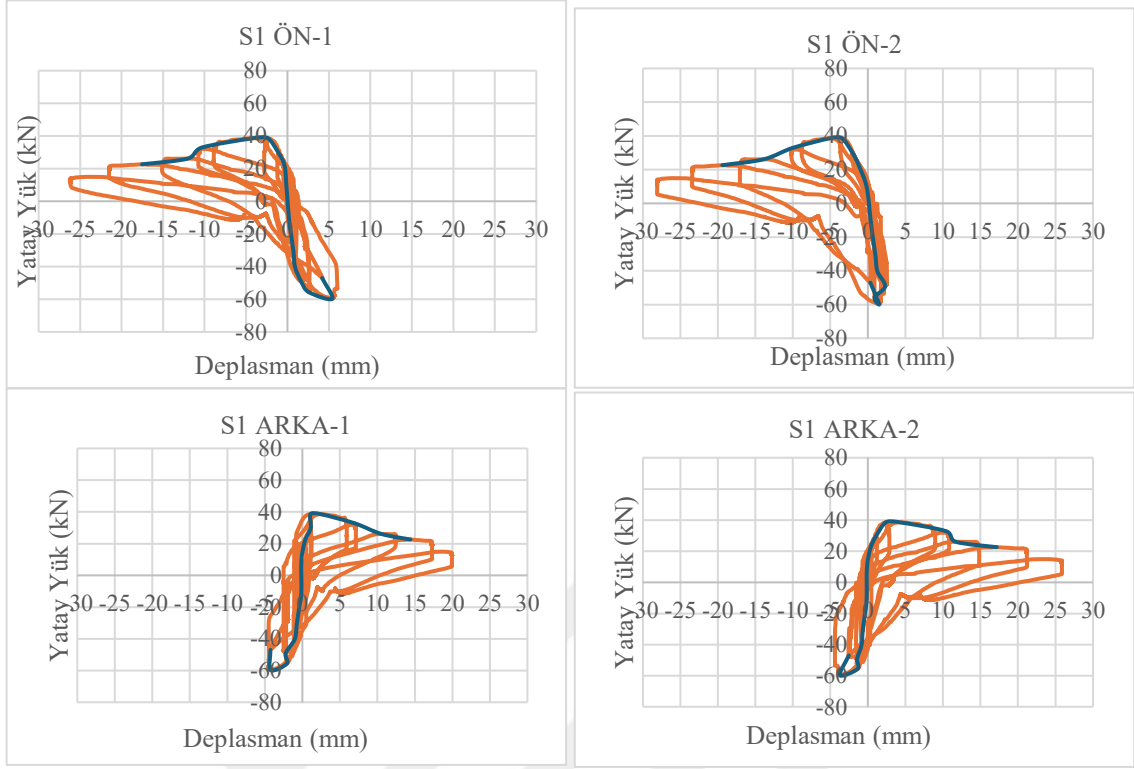
Şekil 5.2 S1 deney numunesinin deney öncesi görünümü

S1 numunesi üzerinde gerçekleştirilen testler sırasında uygulanan yükleme geçmişi ve yükten dolayı oluşan deplasman değerleri Çizelge 5.1’te verilmiştir.

Çizelge 5.1 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman verileri

S1 ÇEVİRİMLER	S1-ÖN 1	S1-ÖN 2	S1-ARKA 2	S1-ARKA 1	Yatay Yük (kN)
	LVDT-2-ÖN (mm)	LVDT-3-ÖN (mm)	LVDT-6-ARKA2 (mm)	LVDT-7-ARKA1 (mm)	
-8	4,18	0,33	-2,55	-4,26	-46,99
-7	5,40	1,51	-3,73	-4,23	-59,68
-6	2,59	0,89	-1,38	-2,07	-55,65
-5	1,66	2,29	-1,43	-2,23	-49,13
-4	0,92	1,26	-0,84	-1,01	-40,28
-3	0,74	1,02	-0,68	-0,76	-31,11
-2	0,46	0,69	-0,42	-0,44	-21,00
-1	0,18	0,38	-0,17	-0,14	-10,73
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-0,12	-0,15	0,12	0,13	9,46
2	-0,35	-1,15	0,33	0,36	21,90
3	-1,10	-2,03	1,11	1,11	29,82
4	-2,39	-3,48	2,43	1,09	38,68
5	-4,12	-5,04	4,24	2,45	38,61
6	-10,33	-10,04	10,45	6,98	32,83
7	-12,00	-13,88	11,66	10,53	26,14
8	-17,53	-19,40	17,18	14,40	22,62

S1 deney numunesine ait önyüz ve arka yüzlerinden elde edilen yatay yük-tepe deplasmanı histeresis eğrileri, deney sonuçları bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuş ve analiz edilmiştir. Bu grafikler, numunelerin mekanik davranışlarını ve yükleme altındaki performanslarını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 S1 deneyi yatay yük-deplasman çevrimsel histeresis eğrileri

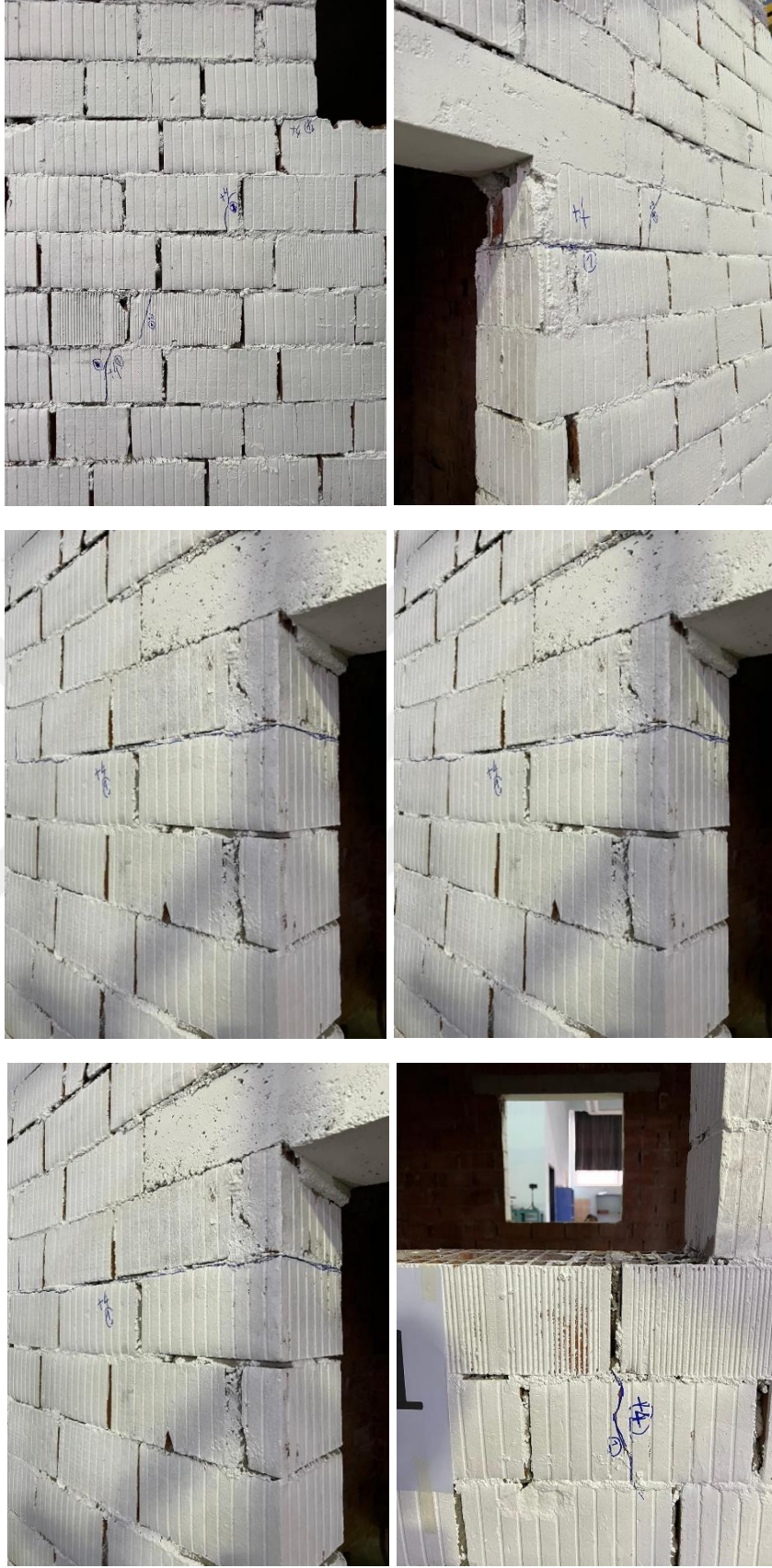
S1 numunesinin deneyi sırasında, temel düzleminde herhangi bir hareket gözlenmemiştir. Numuneye toplamda ± 8 çevrimden oluşan bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Yön kavramları yükün veriliş yönüne göre -(itme) veya +(çekme) olarak belirtilmiştir. Yük geçmişi çizelgelerinden de anlaşılabacağı üzere deneye, yük kontrollü yüklemenin sonunda deplasman kontrollü yükleme ile devam edilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi çekme yönünde yük hücresinden kaynaklanan bir problemten dolayı değerler itme yönündeki değerler ile aynı çıkmamıştır. Grafik çizimlerine hiçbir müdahale yapılmamış olup direk alınan verilere göre çizimler yapılmıştır.

İlk üç çevrimde çatlak oluşumu gözlenmemiştir. İlk çatlak +4.çevrimde oluşmuştur. +4. çevrimde numuneye uygulanan toplam yük maksimum düzeye ulaşmış ve bu çevrimden sonra itme yükünde azalma meydana gelmeye başlamıştır. S1 deney numunesinin +4. çevriminde maksimum 38.68 kN toplam yatay yüke dayandığı ve bu çevrimde ön deplasmanda (S1-Ön 1) 2.39 mm, (S1-Ön 2) 3.48 mm, arka deplasmanlardan (S1-Arka 1) 1.09 mm, (S1-Arka 2) 2.43 mm değerleri ölçülmüştür (Çizelge 5.1).

Çizelge 3.1'e göre, 4. çevrim sonunda oluşan 0.3–1 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanında az hasar düzeyinde bir performansa işaret etmektedir. Çatlaklar pencerelerin etrafında yaklaşık 45 derecelik eğimle kesme çatlakları ve yatayda pencere üstlerinde ve altlarında kayma çatlakları meydana gelmiştir. Sağ yan ve sol yan cephelerdeki pencere kenarlarında çatlaklar oluşmuştur (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5).



Şekil 5.4 4.çevrim sonrası genel görünümü



Şekil 5.5 4.çevrim döngüsü sonrası yakın görünüm

Çizelge 3.1'e göre, 5. çevrim sonunda gözlemlenen 2–5 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının orta hasar düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çevrimle birlikte taşıma kapasitesinde belirgin bir düşüş yaşanmış; oluşan çatlaklar ve deformasyonlar, numunenin yapısal bütünlüğünün orta düzeyde zarar gördüğünü ortaya koymuştur. Bu aşamada, yük taşıma yeteneği kısmen korunmakla birlikte, duvar yüzeylerinde yayılmaya başlayan çatlaklar ve malzeme bozulmaları yapının rijitliğinde kayıplara neden olmuş, ilerleyen çevrimlerde yapının daha ileri düzeyde hasar alacağını sinyallerini vermiştir (Şekil 5.76 ve Şekil 5.7).

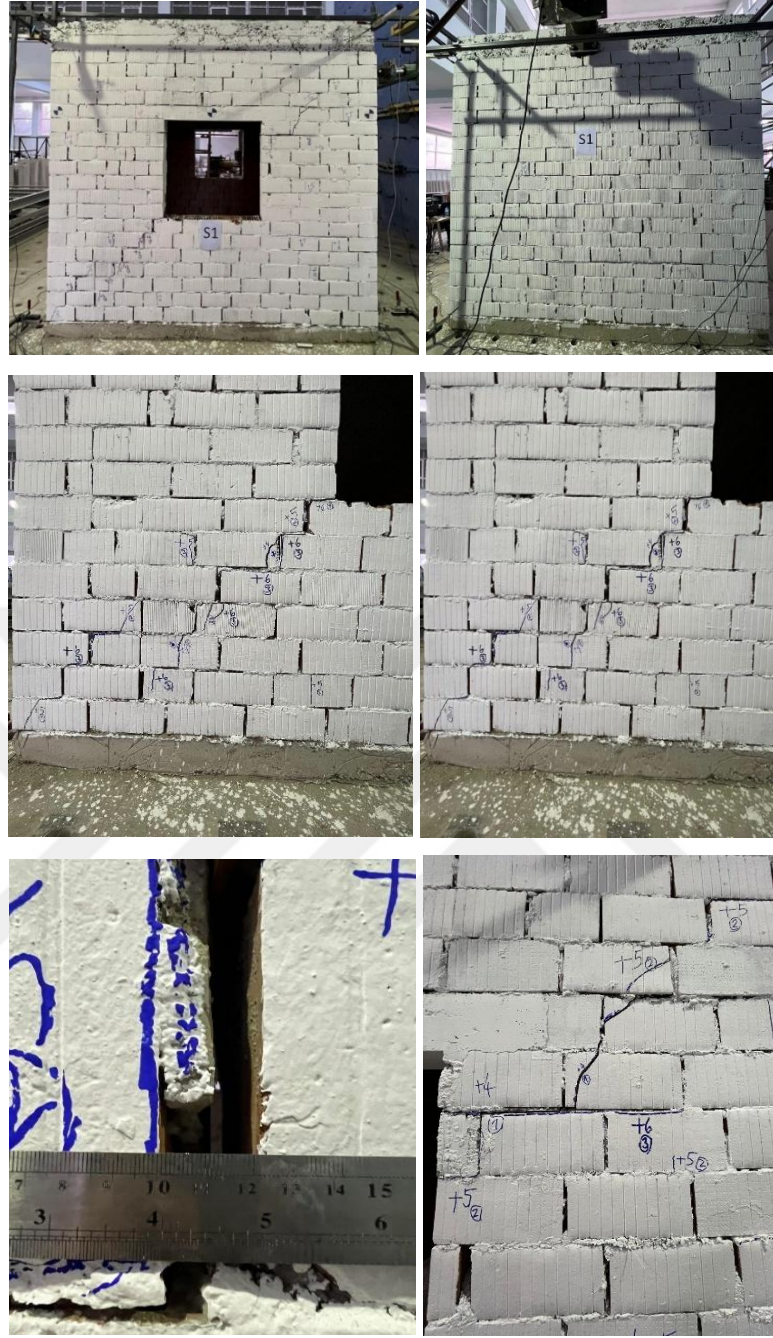


Şekil 5.6 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm-1



Şekil 5.7 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm-2

Çizelge 3.1'e göre, 6. çevrim sonunda gözlemlenen 20 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının ağır hasar düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çevrimde numunenin yük taşıma kapasitesi tamamen tükenmiş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.8). Bu aşamada, yapı elemanlarında belirgin deformasyonlar meydana gelmiş ve özellikle pencere çevresinde yaklaşık 20 mm genişliğinde çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Söz konusu çatlaklar, ağır hasar düzeyine işaret etmekte olup yapının yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde kaybettiğini göstermektedir.



Şekil 5.8 6.çevrim döngüsü sonrası görünüm

S1 deney numunesinin -7. çevriminde maksimum 59.68 kN toplam yatay yüke dayandığı ve bu çevrimde ön deplasmanlardan S1-Ön 1’de 5.40 mm, S1-Ön 2’de 1.51 mm, arka deplasmanlardan S1-Arka 1’de 4.23 mm, S1-Arka 2’de 3.73 mm değerleri ölçülmüştür (Çizelge 5.1). Yükleme protokolüne 7. döngüde de devam edilmiş ve numune, 30 mm çatlak açıklığına ulaşincaya kadar (çok ağır hasar seviyesi) yüklenmiştir (Çizelge 3.1). Bu aşama, numunenin taşıma kapasitesindeki kaybı ve hasar durumunu değerlendirmek amacıyla Şekil 5.9’de gösterildiği üzere ayrıntılı olarak izlenmiştir.



Şekil 5.9 7.çevrim döngüsü sonrası görünüm

7. döngüden sonrası, özellikle pencere kenarlarına yakın alanlarda ve köşelerde diyagonal (çapraz) çatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 8. çevrim bittikten sonra genel görünüm

S1 numunesinde çevrimler sonrası oluşan fiziksel özellikler, çevrimleri ile birlikte Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 S1 numunesinin çevrimleri ve gözlemlenen davranışlar

S1 NUMUNESİNDE ÇEVİRİMLER SONUCU GÖZLEMLENEN DAVRANIŞLAR	
-8	Kapı ve pencere kenarlarında çatlak oluşumu artmıştır. Kapı ve pencere olmayan duvarda çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
-7	Maksimum 59.68 kN toplam yatay yüke dayandığı gözlenmiştir.
-6	Ağır hasar durumu gözlemlenmiş olup 20 mm çatlak oluşmuştur.
-5	Yük taşıma kapasitesi azalmış olup ve orta hasar durumu gözlemlenmiştir. Pencere kenarlarında çapraz giden kesme çatlakları oluşumu gözlemlenmiştir.
-4	Çatlak genişlikleri +4.çevrime göre artmış, yeni çatlaklar oluşmuştur.
± 3	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
± 2	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
± 1	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
4	İlk çatlaklar, pencerelerin lento kenarları ile alt çapraz bölgelerinde meydana gelmiştir. +4. çevrimde numuneye uygulanan yatay yük maksimum değeri olan 38.68 kN’a ulaşmış; bu çevrim sonrasında ise yük taşıma kapasitesinde azalma gözlemlenmiştir.
5	5.çevrimde numunenin yük taşıma kapasitesi azalmış olup ve orta hasar durumu gözlemlenmiştir. Pencere kenarlarında çatlaklar artmaya başlamıştır.
6	Ağır hasar durumu gözlemlenmiş olup 15-20 mm çatlak oluşmuştur.
7	30 mm çatlak seviyesine kadar yükleme yapılmıştır.
8	Çatlaklar harç dolguların olduğu yerlerde yatay olarak ilerlemiş olup kayma çatlakları oluşmuştur.

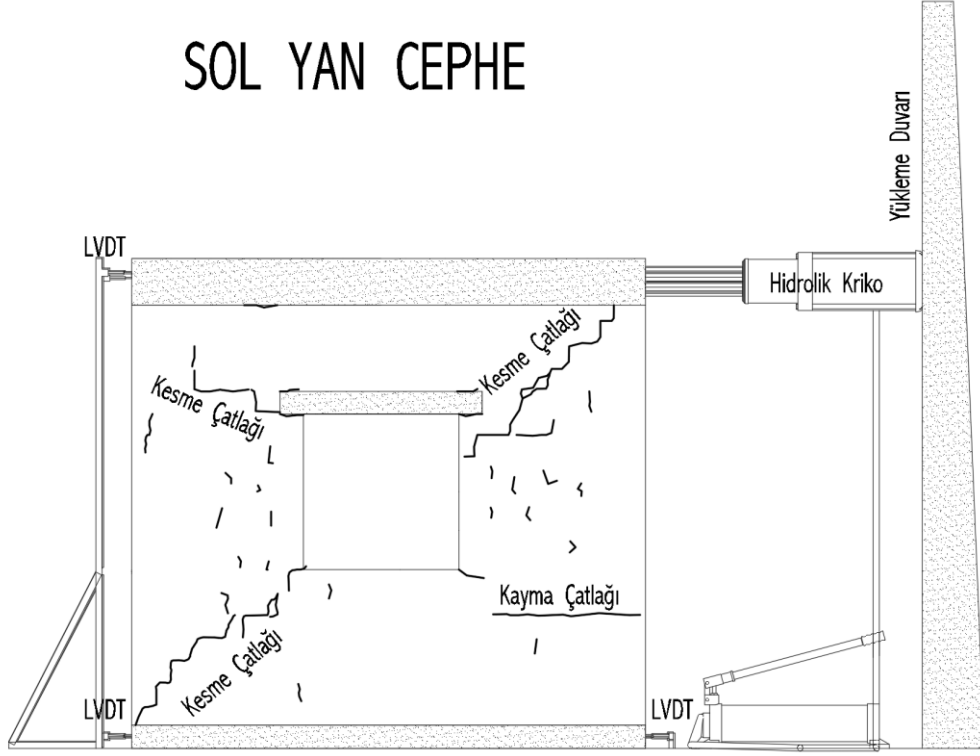
S1 numunesinde deney sonrası oluşan çatlaklar sol yan cephe üzerinden çizilmiştir. Deney numunesi üzerinde oluşan çapraz çatlaklar, pencere kenarlarından başlayarak 45 derece eğilimle yukarı ve aşağı doğru ilerlemiş olup kesme çatlaklarının meydana geldiği görülmektedir.

Çatlakların pencere ve kapı boşlukları çevresinde yoğunlaşması, bu alanların gerilme yoğunlaşması nedeniyle zayıf bölgeler olduğunu göstermektedir.

Çatlaklar harç dolguların olduğu yerlerde yatay olarak ilerlemiş olup, bu da yapının yatay yük altında sürtünme veya zayıf bağlantı nedeniyle hasar görmüş olabileceğine işaret etmektedir.

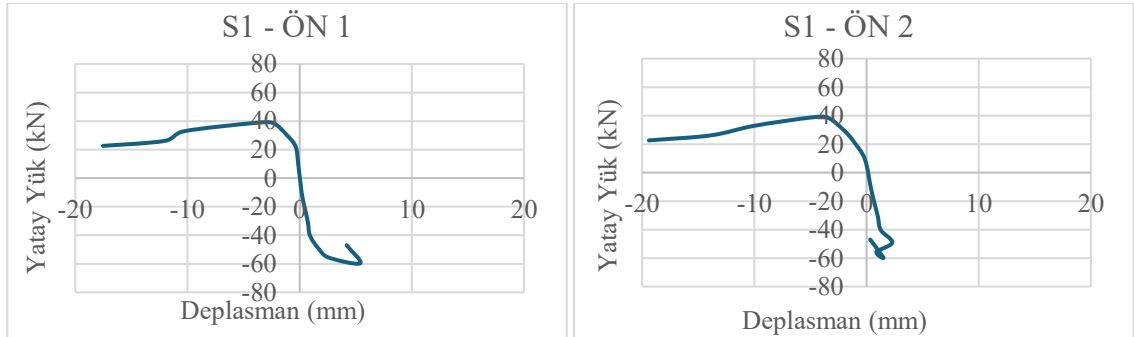
Yoğun çatlakların çoğunluğunun pencere çevresi ve duvarın alt bölgesinde yoğunlaşması, yükün bu bölgelerde daha fazla biriktiğini ve bu alanların kritik zayıf bölgeler olduğunu göstermektedir (Şekil 5.11).

SOL YAN CEPHE

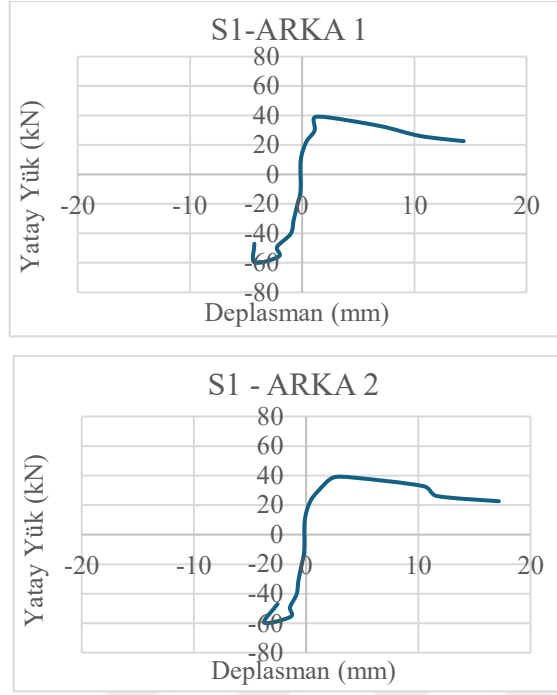


Şekil 5.11 S1 numunesinin sol yan cephesinde deney sonu oluşan çatlakların görünümü.

S1 numunesinin histeresis grafiğinden elde edilen değerlere göre, her çevrimden elde edilen maksimum yük değerleri ve o yük değerine ait deplasman değerlerinin oluşturmuş olduğu zarf eğrileri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir. Ön bölgelerde (S1-ÖN 1 ve S1-ÖN 2), ileri ve geri deplasmanlarda belirgin plastik deformasyonlar ve yük kayıpları izlenmektedir. Arka bölgelerde (S1-ARKA 1 ve S1-ARKA 2) ise daha simetrik ve stabil bir davranış gözlenmekte olup, görece daha düşük deformasyonlarla numune yatay yükleri karşılamaktadır.

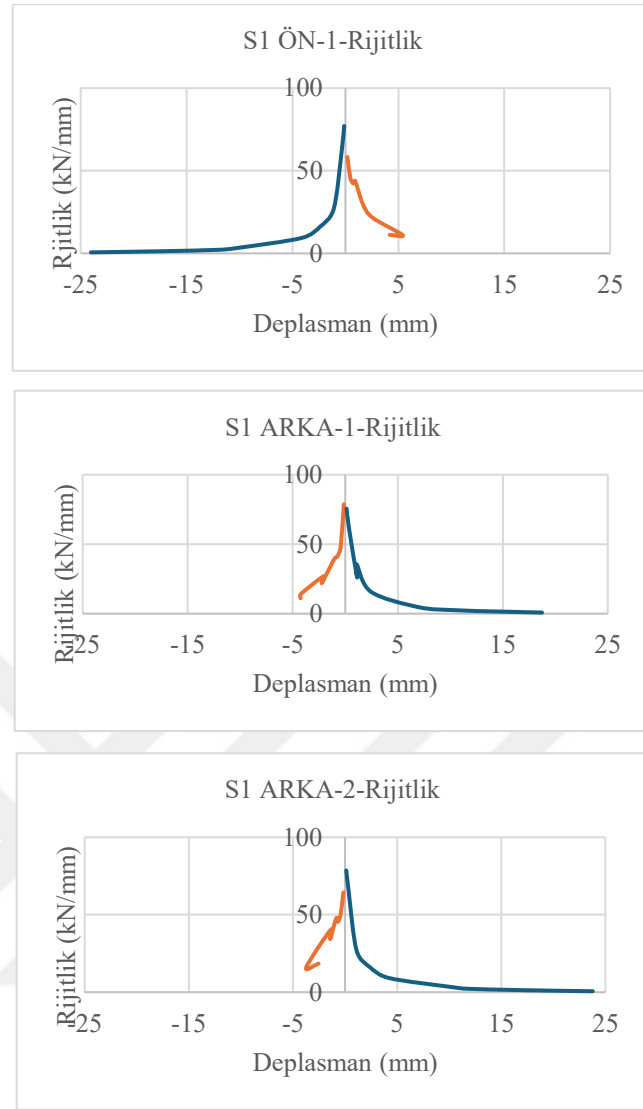


Şekil 5.12 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-1



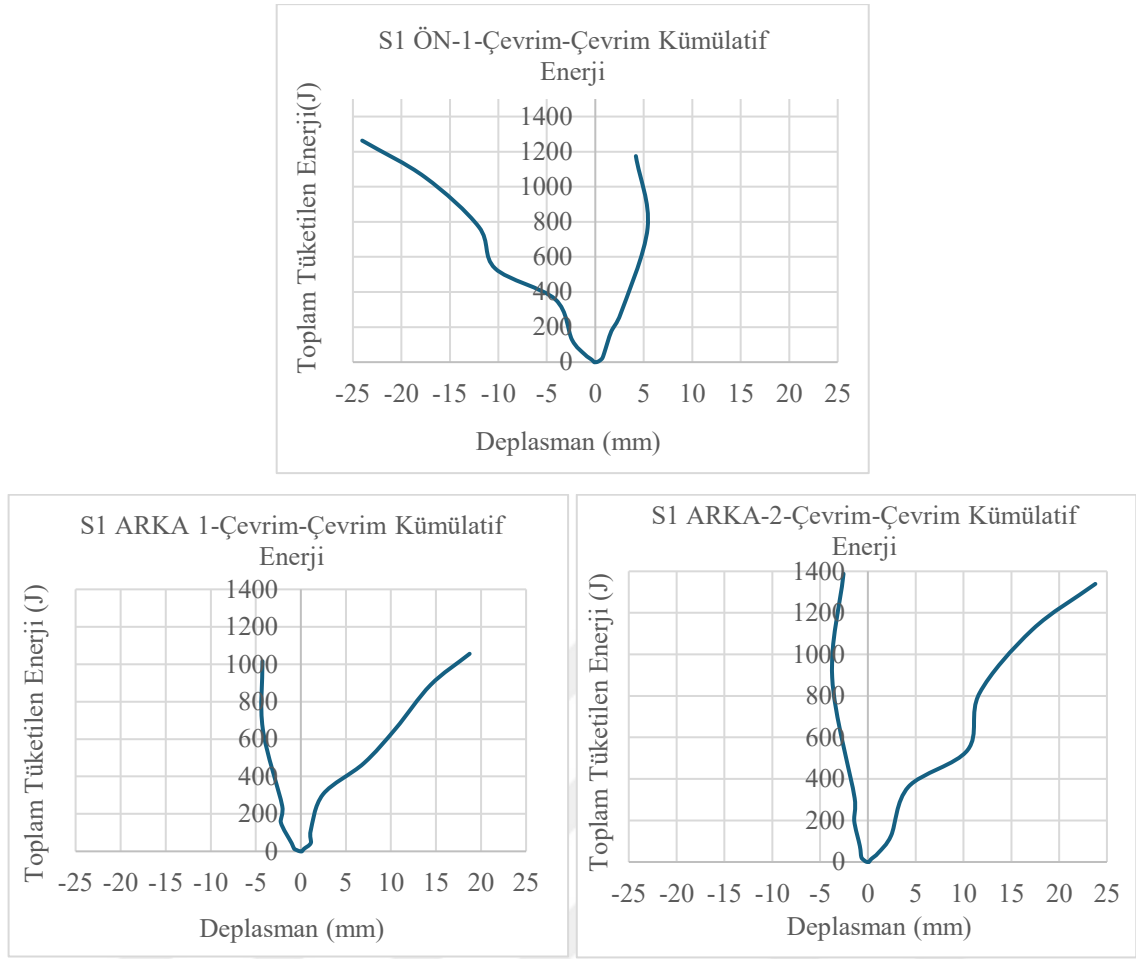
Şekil 5.13 S1 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-2

Her bir deney çevriminde, maksimum yatay yük değerlerinin karşılık gelen yatay deplasman değerlerine oranlanmasıyla çevrimsel rijitlik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5.14). Grafikte, itme çevrimlerinden elde edilen rijitlik değerleri sağ tarafta, çekme çevrimlerine ait değerler ise sol tarafta sunulmuştur. Bu hesaplamalar, numunenin her çevrimde sergilediği rijitlik değişimlerini değerlendirmek ve mekanik davranışını ayrıntılı bir şekilde analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Döngü ilerledikçe taşıma kapasitesinde azalma meydana geldiği ve artan deplasmanlarla birlikte rijitliğin önemli ölçüde düştüğü açıkça görülmektedir.



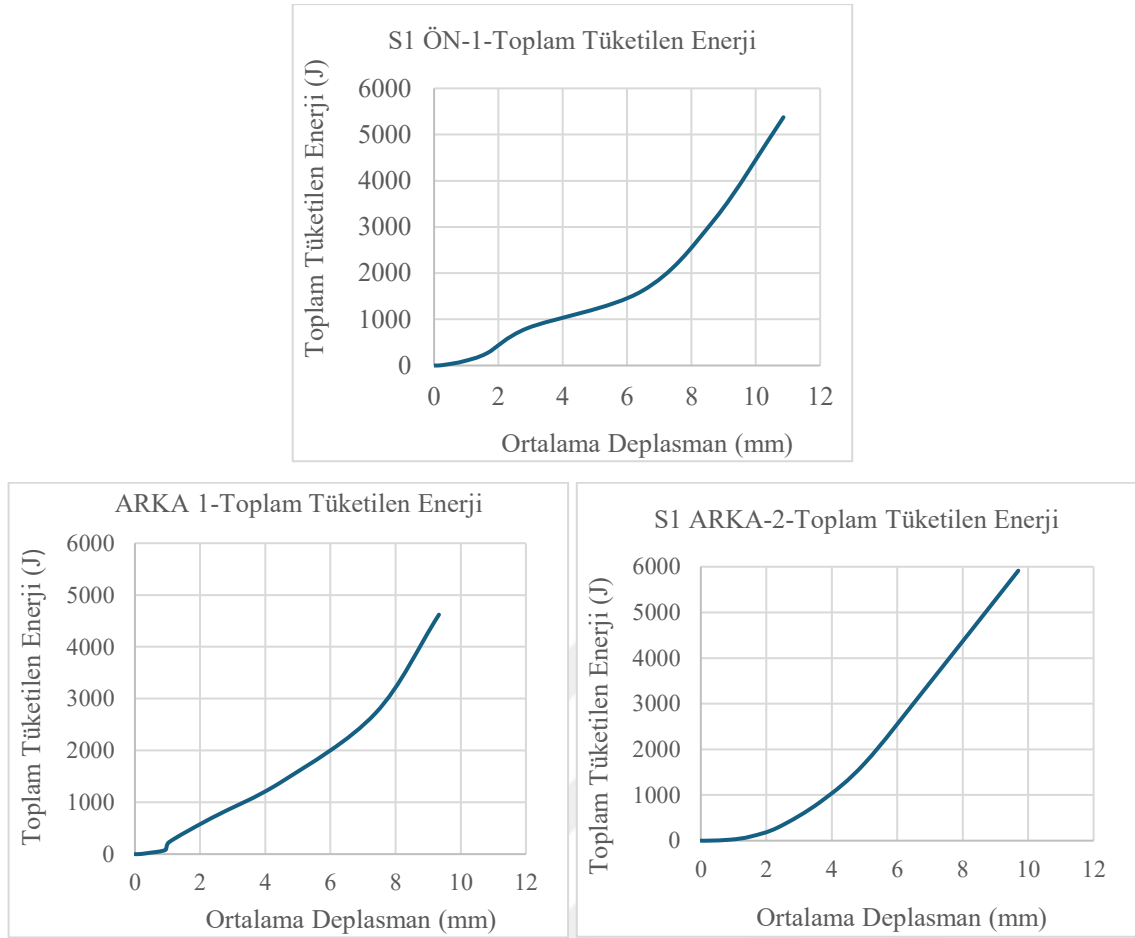
Şekil 5.14 S1 deneyi Rijitlik azalımı grafiği

Numunenin enerji tüketim kapasitesi, toplam yatay yük-tepe deplasmanı histeresis eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmiştir. S1 numunesinin, son üç çevriminde LVDT arızası ile elde edilen değerler gerçekçi olmamasından dolayı bu çevrimler hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Bu numunenin yükün veriliş yönüne göre, ÖN1, ARKA1 ve ARKA2 olarak adlandırılmış LVDT'lerden elde edilmiş her çevrim için elde edilmiş enerji tüketim grafikleri Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15 İtme ve çekme yönünde ayrı ayrı çevrimlerin kümülatif enerji tüketimi

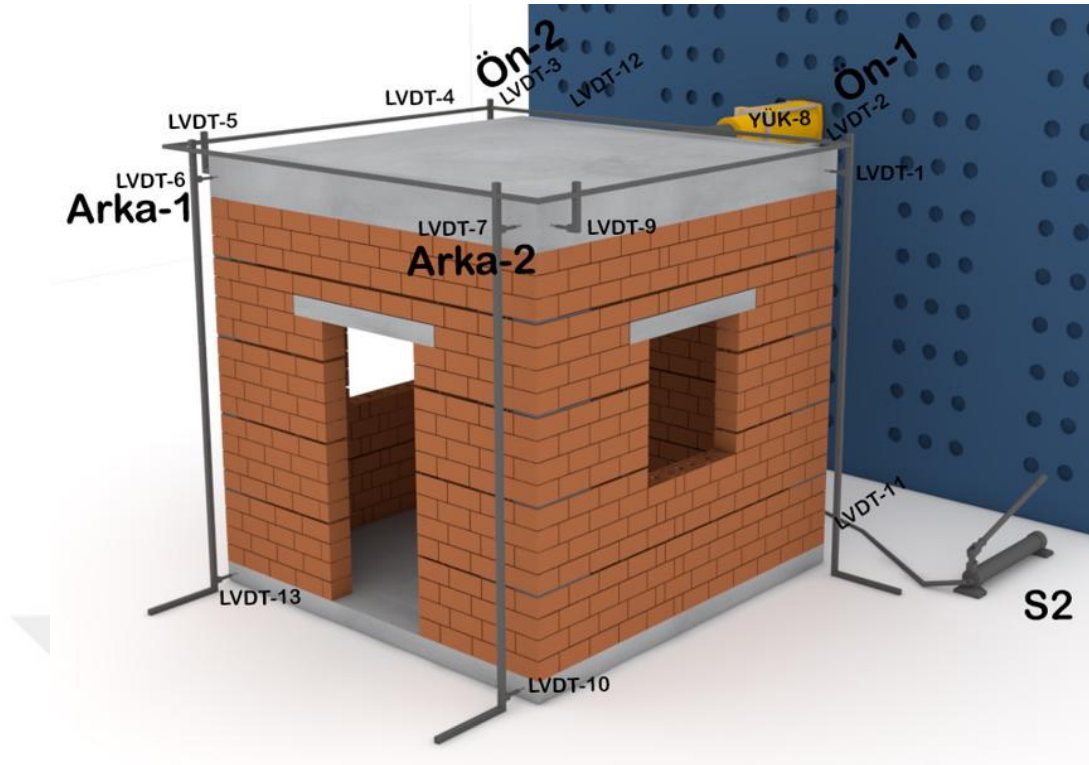
Bu numunede, her itme ve çekme çevrimlerinin mutlak değerce toplamalarının ve çevrimlerinin deplasman değerlerinin mutlak değerce toplamının ortalaması dikkate alınarak elde edilmiş kümülatif enerji tüketim grafikleri Şekil 5.16’te verilmiştir.



Şekil 5.16 S1 numunesinde tüketilen enerji-deplasman grafikleri

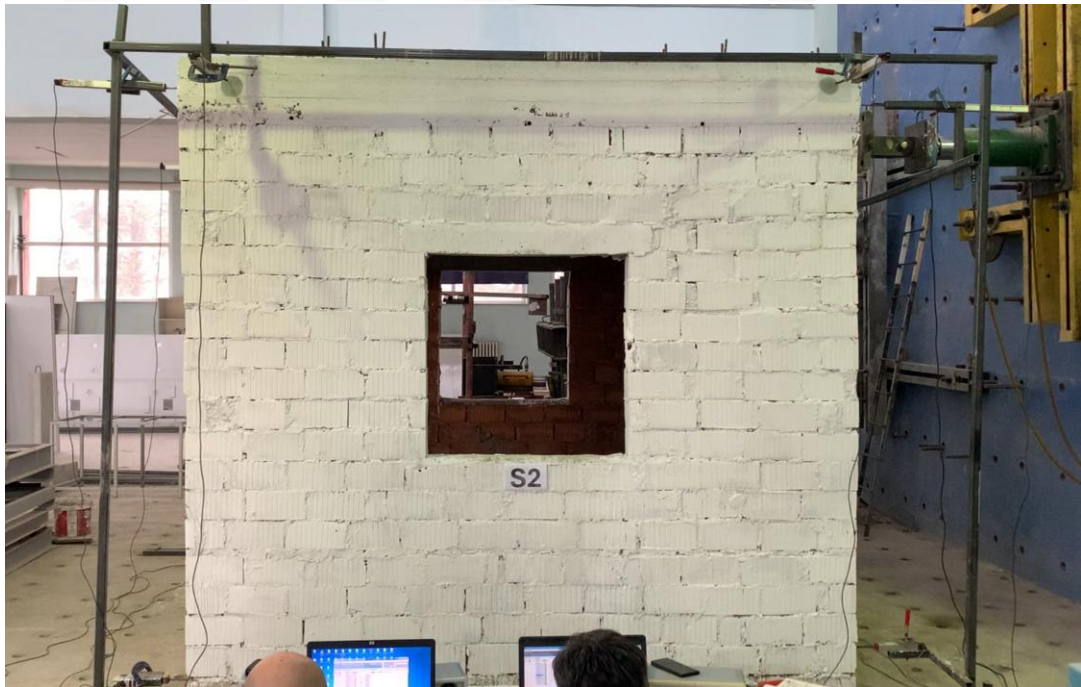
5.5.2. Donatılı yığma duvar deneyi ile ilgili bulgular

Donatılı Deney Numunesi “S2” kısaltması kullanılarak tersinir-tekrarlanır yük etkisi altındaki davranışları test edilmiştir. Deney numunesinin, deney düzeneği içerisindeki yerleşim durumu Şekil 5.17’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.17 Donatılı yığma yapı deney numunesindeki (S2) elemanların isimlendirilmesi

S2 deney numunesinin deney başlamadan önceki görselleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



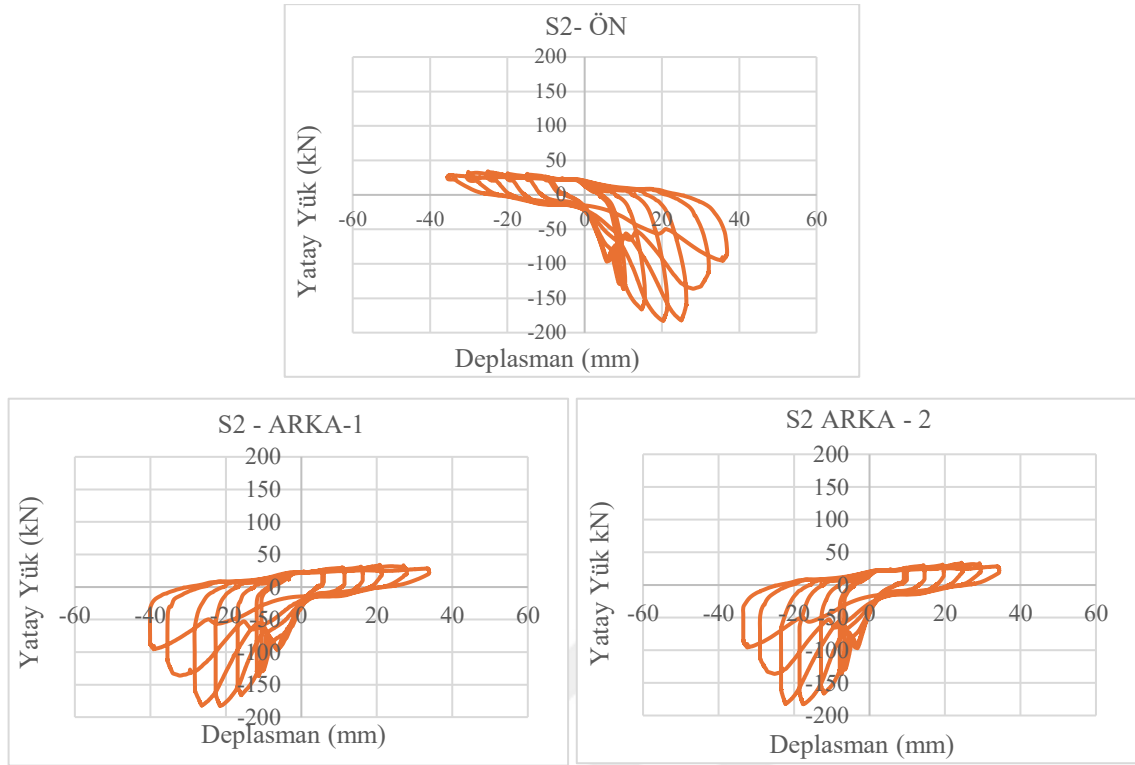
Şekil 5.18 S2 deney numunesin deney öncesi görünümü

S2 deney numunesi üzerinde gerçekleştirilen testler sırasında uygulanan yükleme geçmişi Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman verileri

S2 ÇEVİRİM	S2-ÖN		S2-ARKA 2		S2-ARKA 1	
	LVDT-3(mm)-ÖN	Yatay Yük(8) (kN)	LVDT-6 (mm)-ARKA2	Yatay Yük(8) (kN)	LVDT-7 (mm)-ARKA1	Yatay Yük(8) (kN)
-7	35,80	-95,53	-32,42	-95,53	-39,11	-95,53
-6	28,13	-136,05	-25,18	-136,05	-32,21	-136,05
-5	25,06	-181,98	-22,29	-181,98	-26,43	-181,98
-4	20,34	-182,56	-17,54	-182,56	-21,50	-182,56
-3	14,71	-166,04	-12,04	-166,04	-15,91	-166,04
-2	10,07	-136,56	-7,50	-136,56	-11,31	-136,56
-1	9,03	-129,37	-6,48	-129,37	-10,22	-129,37
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-9,45	24,18	9,04	24,18	5,46	24,18
2	-10,09	26,69	9,72	26,69	5,69	26,69
3	-14,84	30,54	14,27	30,54	10,83	30,54
4	-19,90	31,40	19,36	31,40	15,79	31,40
5	-25,01	34,19	24,35	34,19	20,79	34,19
6	-30,11	33,42	29,14	33,42	27,05	33,42
7	-35,03	28,98	33,90	28,98	33,43	28,98

S2 deney numunesine ait önyüz ve arka yüzlerinden elde edilen yatay yük-tepe deplasmanı histeresis eğrileri, deney sonuçları bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuş ve analiz edilmiştir. Bu grafikler, numunelerin mekanik davranışlarını ve yükleme altındaki performanslarını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 S2 deneyi yatay yük-deplasman çevrimsel histeresis eğrileri

S2 deney sırasında, temel düzleminde herhangi bir hareket gözlenmemiştir. Numuneye toplamda ± 7 çevrimden oluşan bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Yön kavramları yükün verilmiş yönüne göre -(itme) veya +(çekme) olarak belirtilmiştir. Deney yük kontrollü yüklenmiştir.

İlk çatlak -4. çevrimde oluşmuştur. S2 deney numunesinin -4. çevriminde maksimum 182.56 kN toplam yatay yüke dayandığı ve bu çevrimde ön deplasmanda (S2-Ön) 20.34 mm, arka deplasmanlardan S2-Arka 1’de 21.50 mm, S2-Arka 2’de 17.54 mm değerleri ölçülmüştür (Şekil 5.20). Çizelge 3.1’e göre, 4. çevrim sonunda gözlemlenen 0.1-0.3 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının önemsiz/az hasar düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 5.20 4.çevrim döngüsü sonrası yakın görünüm

+5. çevrimde çatlak oluşumu devam etmiş, yapı elemanlarında daha önce oluşmaya başlayan hasarların ilerlediği gözlemlenmiştir. Çizelge 3.1'e göre, +5. çevrim sonunda gözlemlenen 0.3-1.0 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının az hasar düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çevrimde, numune yaklaşık 34,19 kN'luk bir yük altında bulunmaktayken çatlakların daha belirgin hâle geldiği tespit edilmiştir. Özellikle pencere kenarlarında ve lento bölgelerinde oluşan çatlakların, yaklaşık 45 derecelik açıyla yönlenmiş kesme çatlakları şeklinde geliştiği görülmüştür. Bu çatlaklar, yapının kesme kuvvetlerine karşı zayıflayan bölgelerinde yoğunlaşarak, yapının yatay yükler altındaki süneklik kapasitesinin sınırlarına yaklaştığını göstermiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 5.çevrim sonrası genel görünüm

Çizelge 3.1'e göre, -5. çevrim sonunda gözlemlenen 0.3-1.0 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının az hasar düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. Arka cephede herhangi bir çatlama gözlemlenmemiştir (Şekil 5.22).



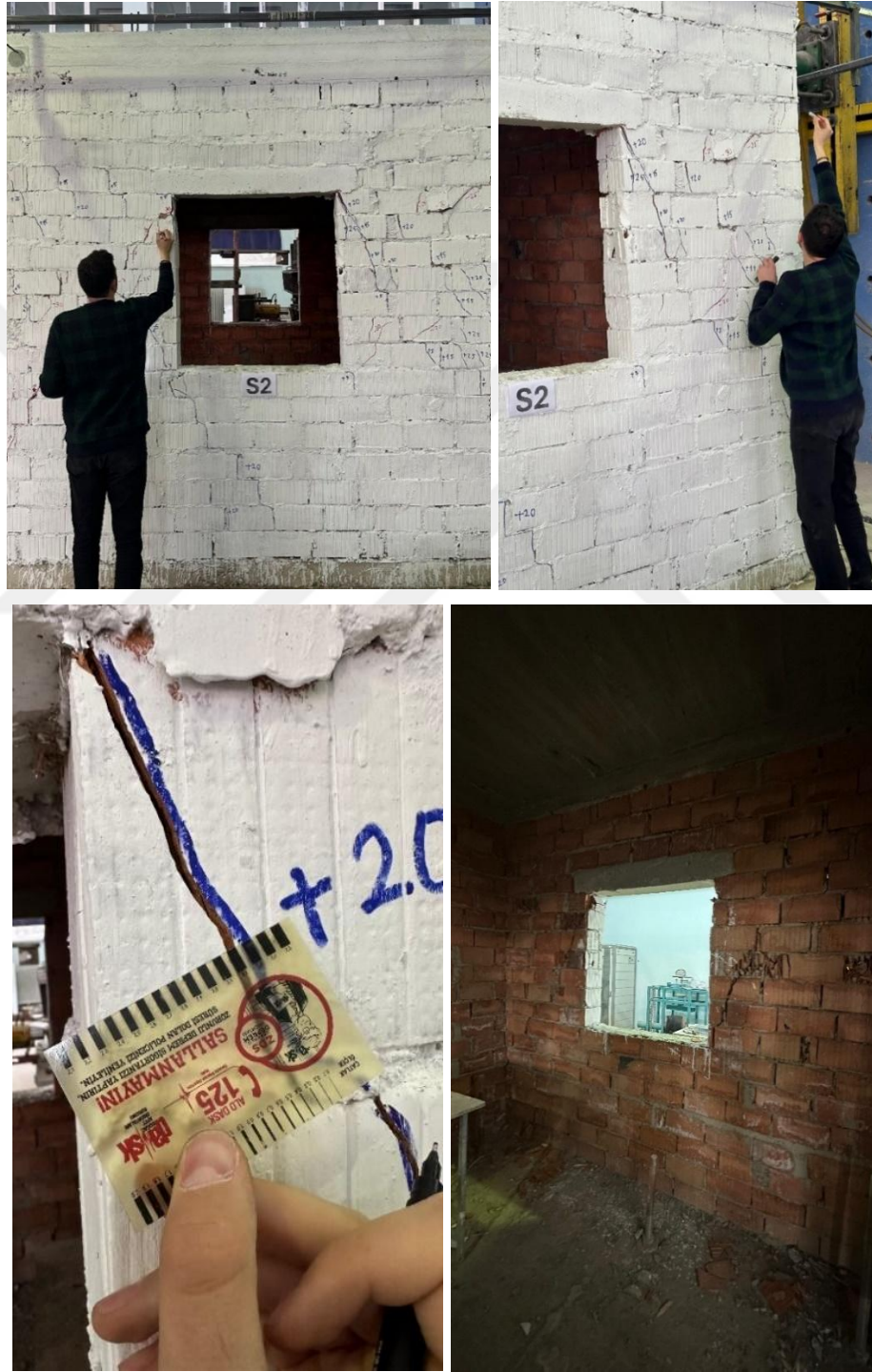
Şekil 5.22 5.çevrim döngüsü sonrası görünüm

6. çevrimde numunenin yük taşıma kapasitesi tamamen tükenmiş, yapı elemanlarında ağır hasar olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3.1'e göre, 6. çevrim sonunda gözlemlenen 15.0-25.0 mm aralığındaki çatlaklar, yapı elemanının ağır düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu aşamada, yaklaşık 21 mm genişliğinde çatlaklar gözlemlenmiş olup, yapının taşıyıcı sisteminde ciddi bütünlük kayıpları meydana gelmiştir (Şekil 5.23). Ayrıca, bazı bölgelerde tuğlalarda yüzeysel patlamalar oluşmuş, kırılan tuğlaların arasından donatıların kısmen ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu durum hem malzeme bütünlüğünün hem de donatı ile tuğla arasındaki aderansın önemli ölçüde zayıfladığını göstermektedir.



Şekil 5.23 6.çevrim döngüsü sonrası görünüm

Çizelge 3.1'e göre, 6. çevrim sonunda gözlemlenen 25.0 mm'den çok çatlaklar, yapı elemanının çok ağır düzeyinde bir performans sergilediğini göstermektedir. 7. döngüde yükleme protokolüne devam edilmiş ve numuneye 32 mm çatlak seviyesine kadar yükleme yapılmıştır. Bu süreç, numunenin dayanım kapasitesindeki kaybı ve hasar durumunu belirlemek için detaylı bir şekilde izlenmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24 7.çevrim döngüsü sonrası sol yan cepheden görünüm

S2 numunesinde çevrimler sonrası numunede oluşan fiziksel özellikler, çevrimleri ile birlikte Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 S2 numunesinde çevrimler sonucu gözlemlenen davranışlar

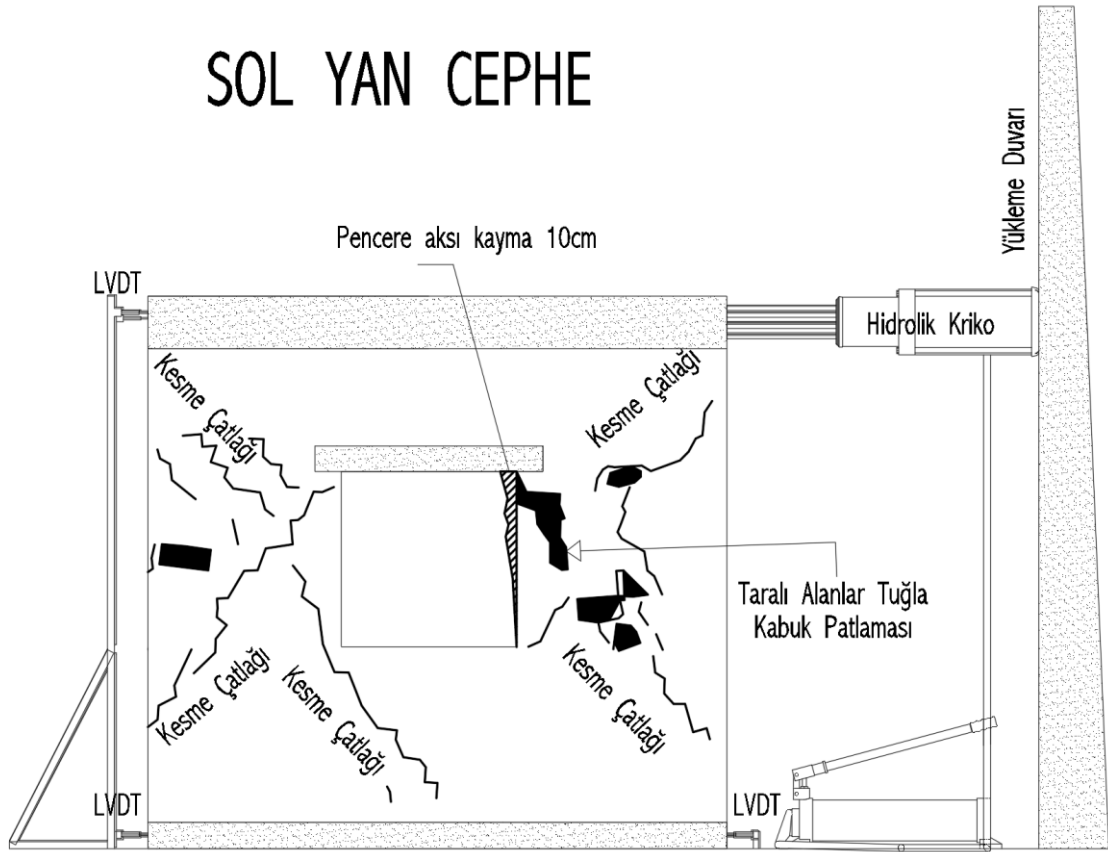
S2 NUMUNESİNDE ÇEVİRİMLER SONUCU GÖZLEMLENEN DAVRANIŞLAR	
-7	7. döngüde yükleme protokolü doğrultusunda deneye devam edilmiş ve numune, çatlak açıklığı 32 mm seviyesine ulaşmaya kadar yüklemeye tabi tutulmuştur. Pencere boşluğunda 10 cm kayma oluşmuştur
-6	Numunenin yatay yük taşıma kapasitesi tamamen tükenmiş ve yapıda ağır hasar meydana gelmiştir. Bu aşamada yaklaşık 21 mm genişliğinde çatlaklar oluşmuş ve tuğla birimlerde ezilme ve parçalanmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca bazı bölgelerde donatıların yüzeye çıktığı tespit edilmiştir.
-5	-5. çevrimde numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiş ve hafif hasar durumu tespit edilmiştir. Numunenin arka cephesinde ise herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
-4	İlk çatlaklar, pencerelerin lento kenarları ile alt çapraz bölgelerinde meydana gelmiştir. +4. çevrimde numuneye uygulanan yatay yük maksimum değeri olan 182.56 kN'a ulaşmış; bu çevrim sonrasında ise yük taşıma kapasitesinde azalma gözlemlenmiştir.
± 3	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
± 1	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
± 2	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
4	Çatlak oluşumu gözlenmemiştir.
5	+5. çevrimde 34,19 kN'luk yatay yük gözlemlenmiş olup, pencere ve lento kenarlarında yaklaşık 45° eğimli kesme çatlakları şeklinde meydana gelmiştir.
6	Yapıda ağır hasar durumu gözlemlenmiş; çatlak genişliklerinin 20–25 mm aralığına kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Özellikle pencere kenarlarında çatlak ilerlemesi belirgin şekilde artış göstermiştir.
7	7. döngü sonrasında, özellikle pencere kenarlarına yakın bölgelerde ve köşe alanlarında diyagonal (çapraz) çatlakların oluştuğu gözlemlenmiş; bu bölgelerde tuğla birimlerinde parçalanmalar meydana gelmiştir. Dağılan tuğlaların içinden donatıların açığa çıktığı tespit edilmiştir.

S2 deneyi sonrası oluşan çatlaklar sol yan cephe üzerinden çizilmiştir. Deney numunesi üzerinde oluşan çapraz çatlaklar, pencere kenarlarından başlayarak 45° açı ile yukarı ve aşağı doğru ilerlemiş olup kesme çatlaklarının neden olduğu görülmektedir.

Çatlakların pencere ve kapı boşlukları çevresinde yoğunlaşması, bu alanların gerilme yoğunlaşması nedeniyle zayıf bölgeler olduğunu göstermektedir.

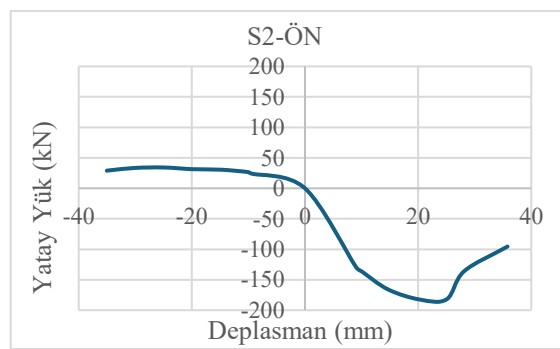
Çatlaklar harç dolguların olduğu yerlerde yatay olarak ilerlemiş olup, bazı tuğlalarda kabuk atması nedeniyle hasar görmüştür. Kabukların atmasıyla birlikte donatılar ortaya çıkmış olup pencere boşluğunda 10 cm kayma oluşmuştur (Şekil 5.26).

Yoğun çatlakların çoğunluğunun pencere çevresi ve duvarın alt bölgesinde yoğunlaşması, yükün bu bölgelerde daha fazla biriktiğini ve bu alanların kritik zayıf bölgeler olduğunu göstermektedir.

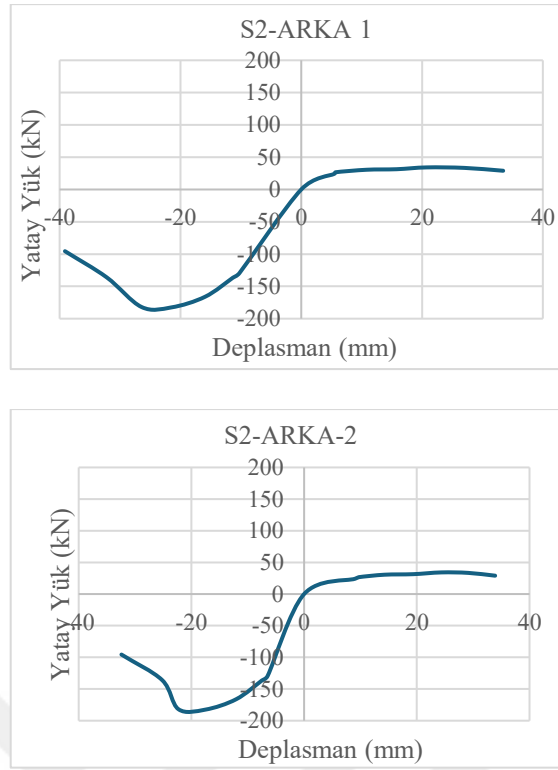


Şekil 5.26 S2 deney numunesinin sol yan cephesinde deney sonu oluşan çatlakların görünümü.

S2 numunesinin histerezis grafiğinden elde edilen değerlere göre, her çevriminden elde edilen maksimum yük değerleri ve o yük değerine ait deplasman değerlerinin oluşturmuş olduğu zarf eğrileri Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’te verilmiştir.

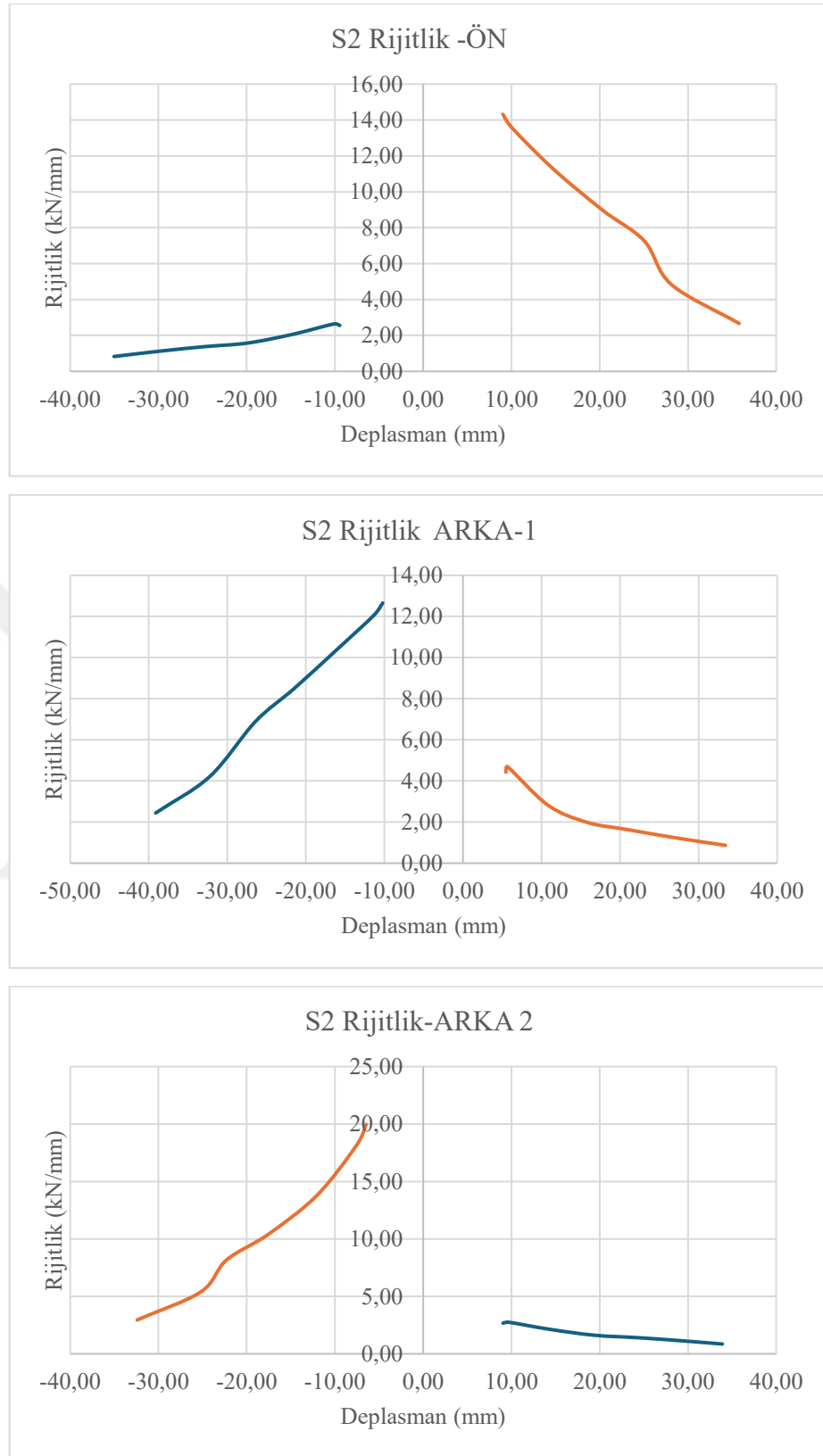


Şekil 5.27 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-1



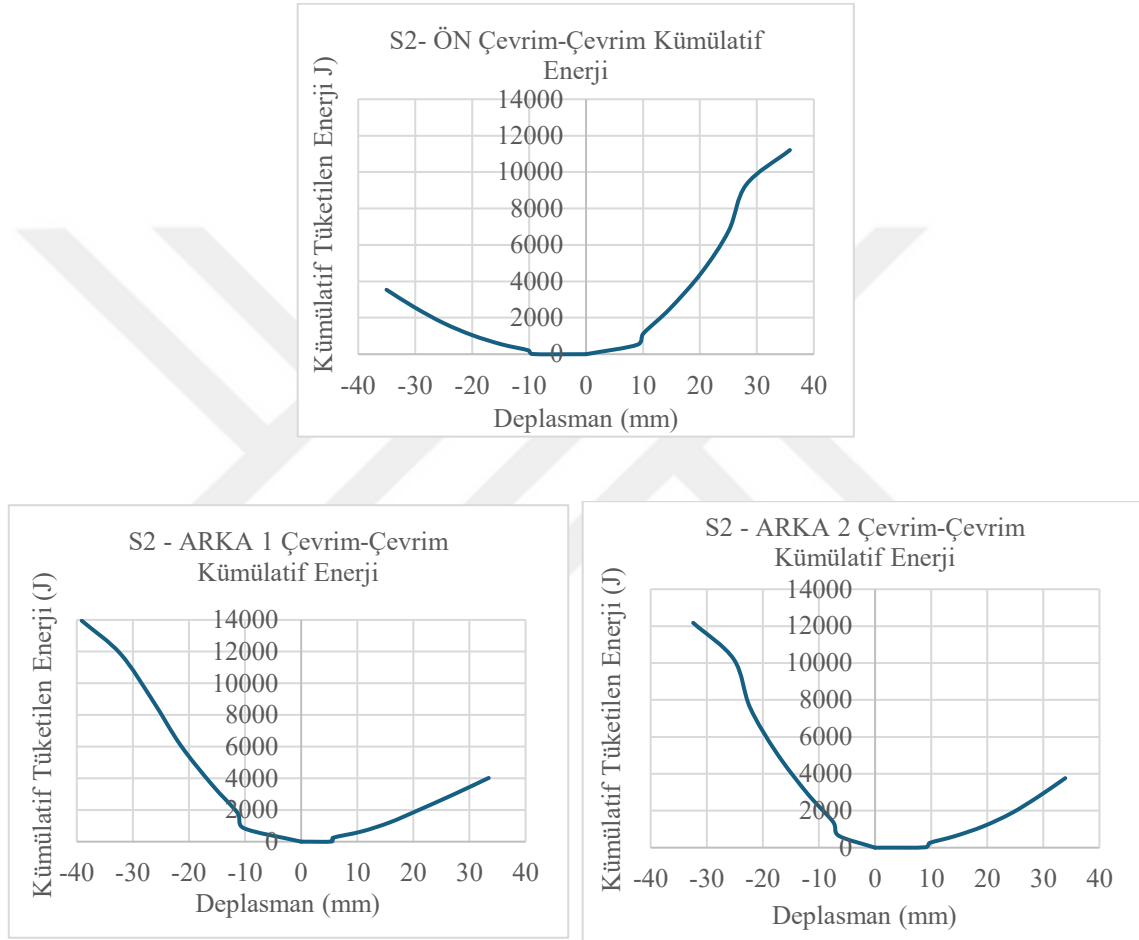
Şekil 5.28 S2 deney numunesi yatay yük-deplasman grafikleri-2

Her bir deney çevriminde, maksimum yatay yük değerlerinin karşılık gelen yatay deplasman değerlerine oranlanmasıyla çevrimsel rijitlik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5.29). Grafikte, itme çevrimlerinden elde edilen rijitlik değerleri sağ tarafta, çekme çevrimlerine ait değerler ise sol tarafta sunulmuştur. Bu hesaplamalar, numunenin her çevrimde sergilediği rijitlik değişimlerini değerlendirmek ve mekanik davranışını ayrıntılı bir şekilde analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



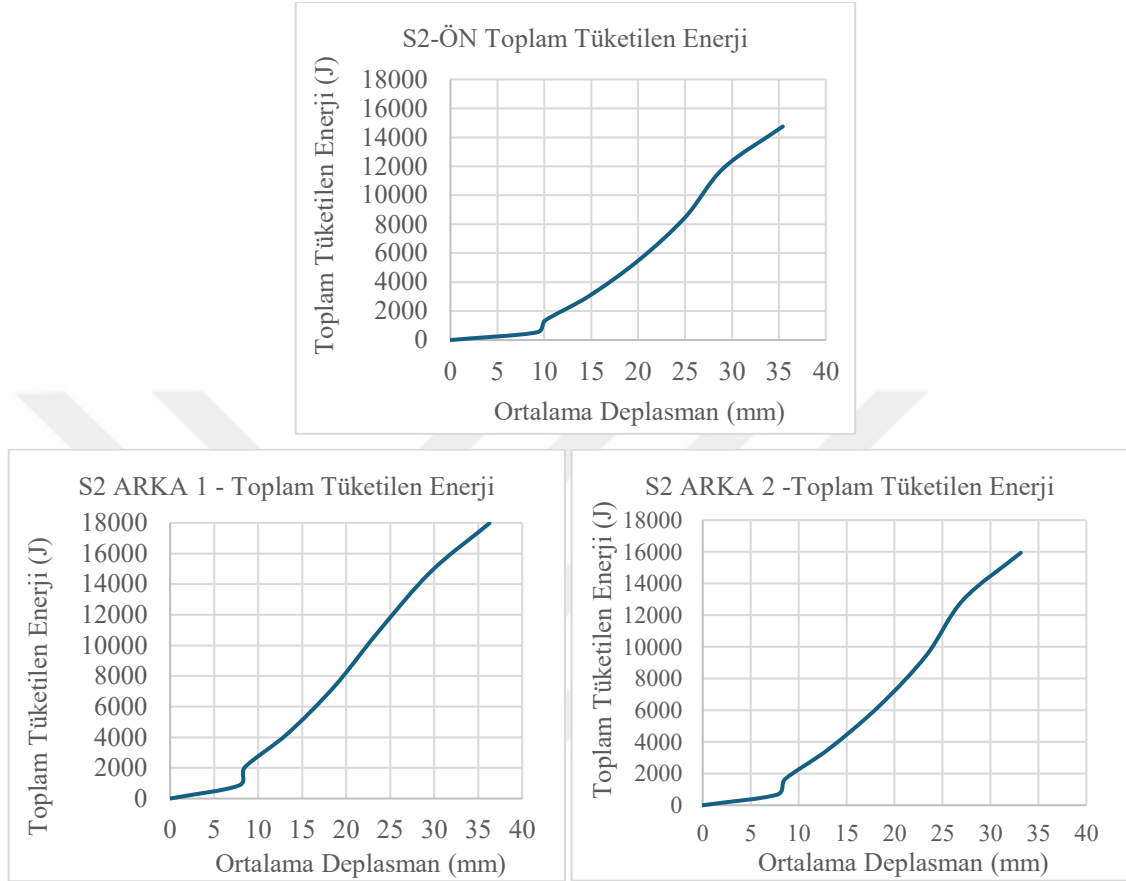
Şekil 5.29 S2 deneyi Rijitlik azalımı grafiği

Numunenin enerji tüketim kapasitesi, toplam yatay yük-tepe deplasmanı histeresis eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Hesaplama sonuçlarına ilişkin grafiksel gösterimler Şekil 5.30'da sunulmuş olup, numunenin farklı yükleme çevrimlerindeki enerji tüketim davranışını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu analiz, numunenin yapısal performansını ve mekanik özelliklerini anlamak açısından kritik bir değerlendirme sağlamaktadır.



Şekil 5.30 S2 deneyi tüketilen enerji-deplasman grafikleri

Bu numunede, her itme ve çekme çevrimlerinin mutlak değerce toplamalarının ve çevrimlerinin deplasman değerlerinin mutlak değerce toplamının ortalaması dikkate alınarak elde edilmiş kümülatif enerji tüketim grafikleri Şekil 5.31’de verilmiştir.



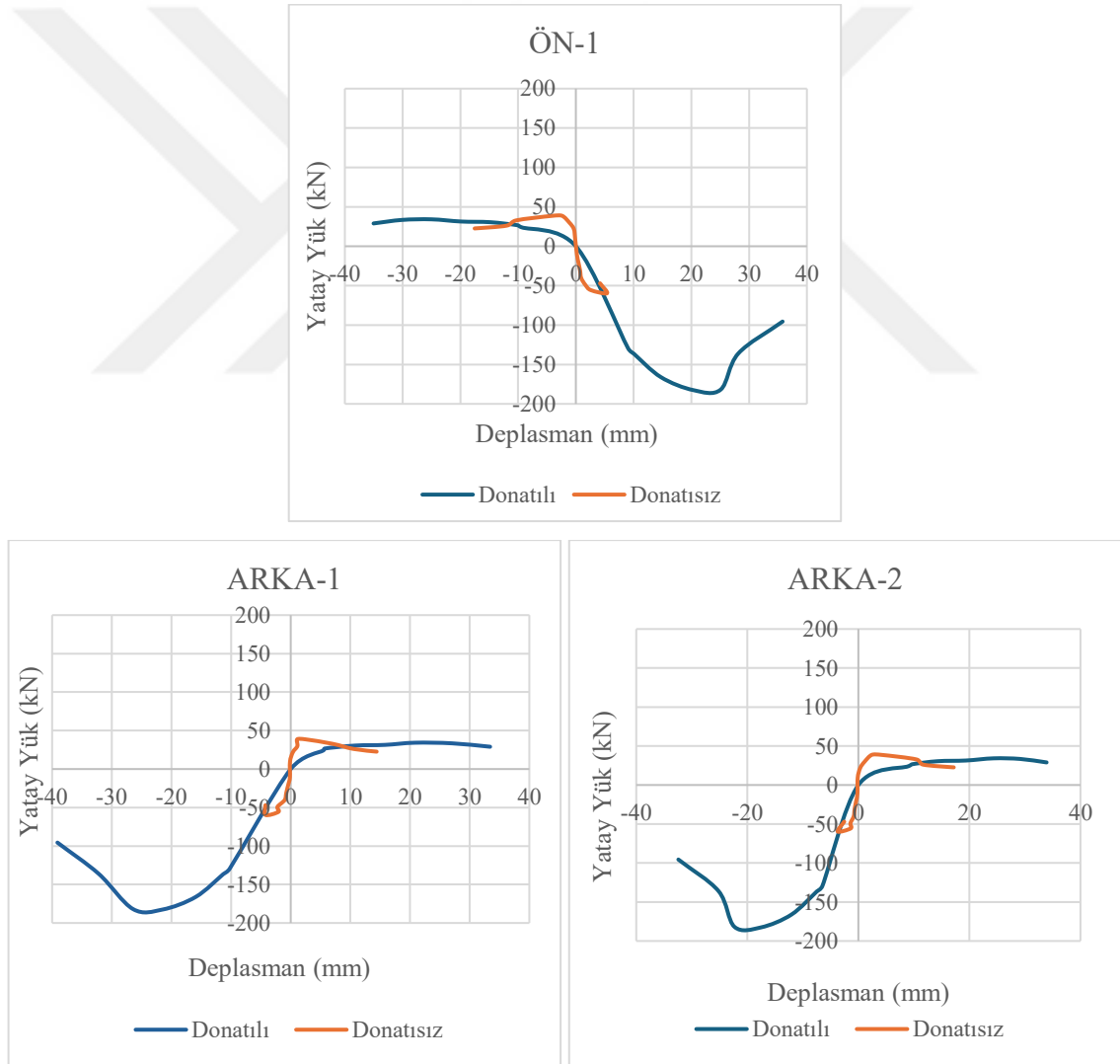
Şekil 5.31 İtme ve çekme yönünde ayrı ayrı çevrimlerin kümülatif enerji tüketimi

5.5.3. Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Donatılı ve donatısız yığma yapılar ile yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen yük-tepe deplasman histeresis grafiklerinden elde edilen değerlere göre hesaplanan dayanım kapasiteleri, rijitlik ve kümülatif enerji tüketimi ayrı ayrı incelenmiş ve kıyaslanmıştır.

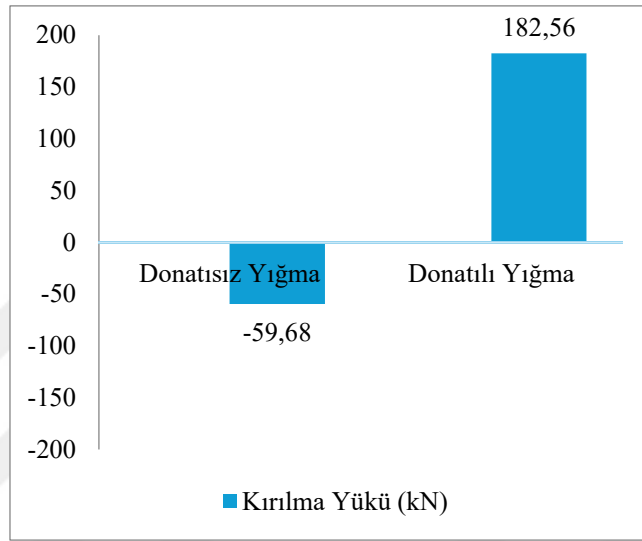
5.5.3.1. Dayanımların karşılaştırılması

Donatılı ve Donatısız yığma yapıların farklı yükler etkisi altında gösterdiği davranışlar deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak laboratuvar ortamında tek katlı 3.2x3.3x3 m ebatlarında, tek açıklıklı, 1/1 ölçekli donatılı ve donatısız yığma bina numuneleri üretilmiş ve tersinir-tekrarlanır yükleme ile test edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde yük hücresi ve LVDT'lerden elde edilen histeresis eğrileri oluşturulmuştur. Her çevriminde oluşan mutlak değerce maksimum yük değerleri dikkate alınarak zarf eğrileri çizilmiştir. Deney numunelerinin yükleme düzeneğine göre ÖN ve ARKA cephelerine yerleştirilen LVDT'lerden elde edilen zarf eğrileri Şekil 5.32'de verilmiştir.



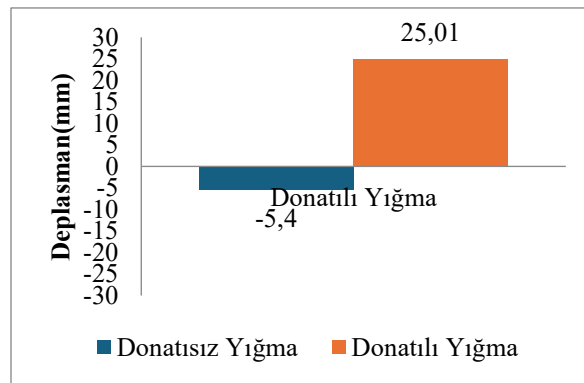
Şekil 5.32 Numunelerin yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri

İtme ve çekme yönlerinde oluşan maksimum yatay yük ve bu yükte oluşan deplasman değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Donatılı yığma bina, Donatısız yığma binaya göre çekme yönünde yaklaşık 3 kat fazla yük taşımıştır (Şekil 5.33). Fakat bu numune itme yönünde daha az yatay yük taşımıştır. Bu da yığma gibi gevrek bina sisteminde basınç yönünde daha fazla yük taşıma kapasitesine sahipken, diğer yönde yük taşıma kapasitesine etkisinin olmadığını bir göstergesidir.



Şekil 5.33 Kırılma yükleri kıyaslanması

Maksimum yükte oluşan deplasmanlara baktığımızda, donatısız numuneye göre donatılı numune çekme durumunda 5,08 kat daha fazla deplasman yapmıştır (Şekil 5.34). İtme yönünde ise 19,07 kat daha fazla deplasman yapmıştır (Çizelge 5.5). Yani donatılı numune, donatısız numuneye göre hem itme hem de çekme yönünden daha sünek davranış göstermiştir.



Şekil 5.34 İtme yönünde(+) Deplasmanların kıyaslanması

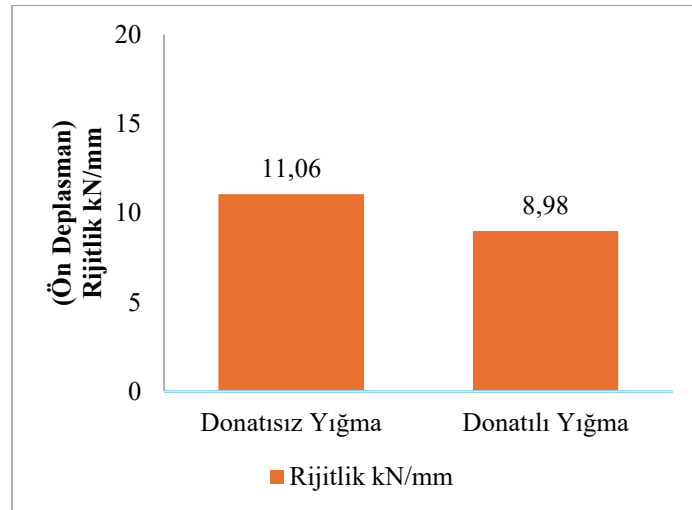
Çizelge 5.5 Yatay yük taşıma kapasiteleri ve deplasman değerleri

Test Numuneleri	Maksimum Yük		Maksimum yükte oluşan tepe deplasmanı (mm)					
			ÖN		ARKA1		ARKA2	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
Donatısız	-59.68	38.68	-5.4	2.39	-4.23	1.09	-3.73	2.42
Donatılı	-182.56	34.19	-20.34	25.01	-21.5	20.79	-17.54	24.35

5.5.3.2. Rijitliklerin karşılaştırılması

Yapının dış etkiler altında, yapmış olduğu şekil değiştirmeye karşı oluşan fiziki dirence rijitlik denir. Rijitlik arttıkça, yapının şekil değiştirme yapabilme kabiliyeti için gerekli kuvvette artmaktadır. Yapılar deprem yüklerini absorbe edecek kadar sünek ve bu yükü karşılayabilecek rijitliğe sahip olmalıdır.

Yapılara deprem yükü gibi bir yanal yük geldiğinde, ilk anda sünek bir davranış değil rijit bir davranış gösterecektir. Bu ilk davranışta oluşan başlangıç rijitlikleri yapıların düşük yüklerde deplasman yapabilme kabiliyetini göstermektedir. Çalışmamızda yatay yüklerden dolayı oluşan başlangıç rijitlikleri Çizelge 5.6’da verilmiştir. Ayrıca, çatlamış duvar kesitinin elastisite modülü düşeceğinden dolayı, ilk çatlağın oluşumunda hesaplanan rijitlikler de Çizelge 5.7’de verilmiştir. Maksimum yükte oluşan rijitlikler Çizelge 5.8’de verilmiştir. Numunelerin itme ve çekme yönünde oluşan rijitlikleri Şekil 5.36’de verilmiştir. Çekme yönünde ön rijitliklerinin kıyaslanması Şekil 5.35’te gösterilmiştir.



Şekil 5.35 Çekme yönünde ön rijitliklerin kıyaslanması

Çizelge 5.6 Başlangıç rijitlikleri

Test Numuneleri	Başlangıç Rijitlikleri (kN/mm)					
	ÖN		ARKA1		ARKA2	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
Donatısız	58.31	77.11	78.68	75.6	64.38	78.58
Donatılı	14.32	2.56	12.66	4.43	19.97	2.67

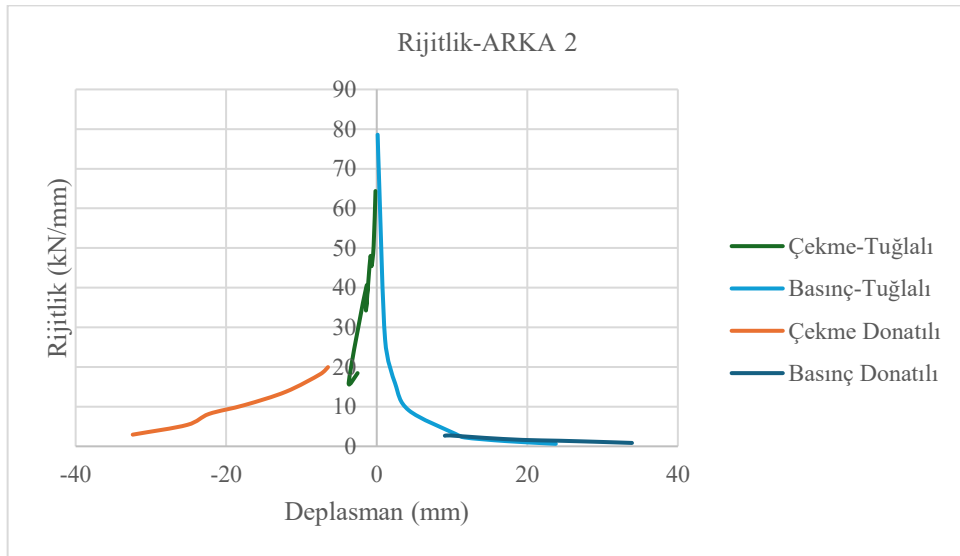
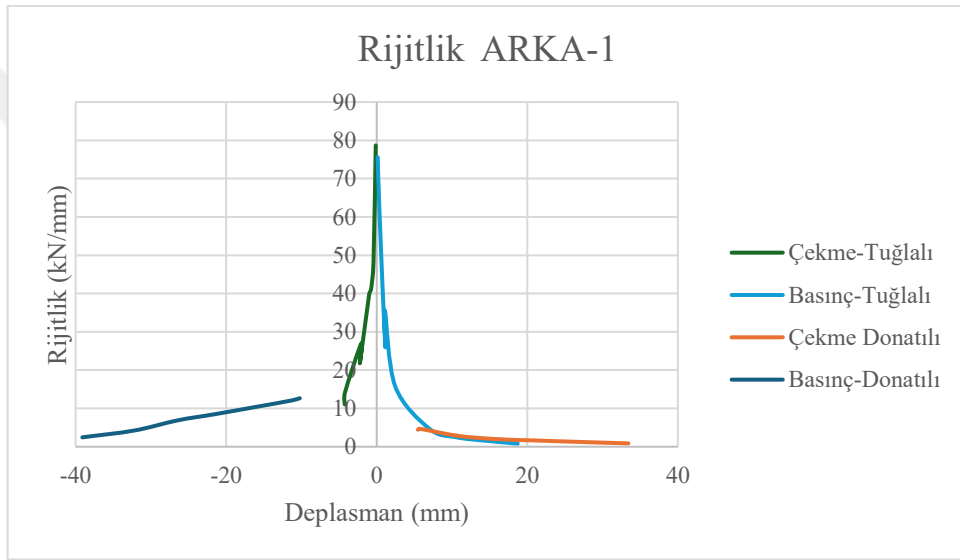
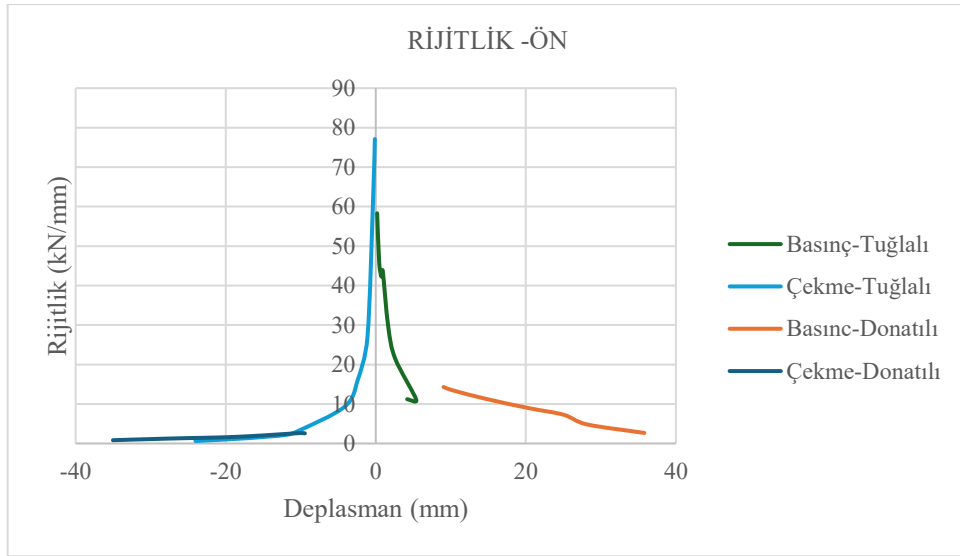
Çizelge 5.7 İlk çatlağın oluşumunda meydana gelen rijitlikler

Test Numuneleri	İlk çatlağın oluşumunda meydana gelen Rijitlikler (kN/mm)					
	ÖN		ARKA1		ARKA2	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
Donatısız	43.79	16.18	39.69	15.73	47.82	15.95
Donatılı	11.29	1.58	10.44	1.99	13.79	1.62

Çizelge 5.8 Maksimum yükteki rijitlikler

Test Numuneleri	Maksimum Yükteki Rijitlikler (kN/mm)					
	ÖN		ARKA1		ARKA2	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
Donatısız	11.06	16.18	14.12	15.73	16.01	15.95
Donatılı	8.98	1.37	8.49	1.64	10.41	1.40

Yapılan çalışmada elde edilen değerlere göre, donatılı yığma numunenin rijitliği düşük, donatısız yığma numunenin rijitliği yüksek çıkmıştır. Donatısız numunede yükün arttığı durumda hasar miktarı arttığından deplasman değeri artmakta ve bunun sonucu ilerleyen çevrimlerde rijitliği düşmektedir. Donatılı numunede ise duvarlarında kullanılan donatıdan kaynaklı davranıştan dolayı maksimum yüke kadar elastik davranış göstermiştir. Bu davranışın olduğu kısımda, itme ve çekme çevrimlerinde kılcal çatlağın genişliği sınırlı kalmış, ilerleyen yüklerde uygulanan yüklerle yapmış olduğu deplasman orantılı olarak az da olsa azalma meydana gelmiştir.

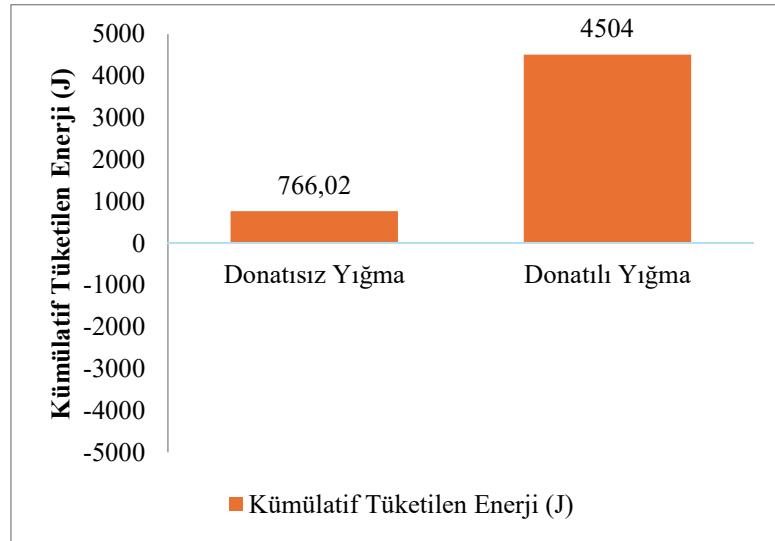


Şekil 5.36 Numunelerin rijitlik eğrileri

5.5.3.3. Enerji tüketme kapasitesinin karşılaştırılması

Deprem yükünden dolayı oluşan sismik enerjiyi, yapıda tüketebilirsek yapı göçmeden ya da ağır hasar almadan ayakta kalabilmektedir. Bu durumu klasik yığma yapılarda yapmak olabildiğince zordur. Bunu sağlamak için gevrek olan donatısız yığma binayı (klasik yığma bina) olabildiğince sünek hale getirmek gerekir. Geçmiş yıllarda, ahşabın esnekliğini kullanarak yığma yapıların sünekliği arttırılmaya çalışılmıştır (hımış yapı). Günümüzde ise donatısız yığma yapıları oluşturan taşıyıcı yığma duvarlar donatılı hale getirilerek yapının sünekliliği ve bununla beraber enerji tüketme kapasitesi arttırılabilmektedir.

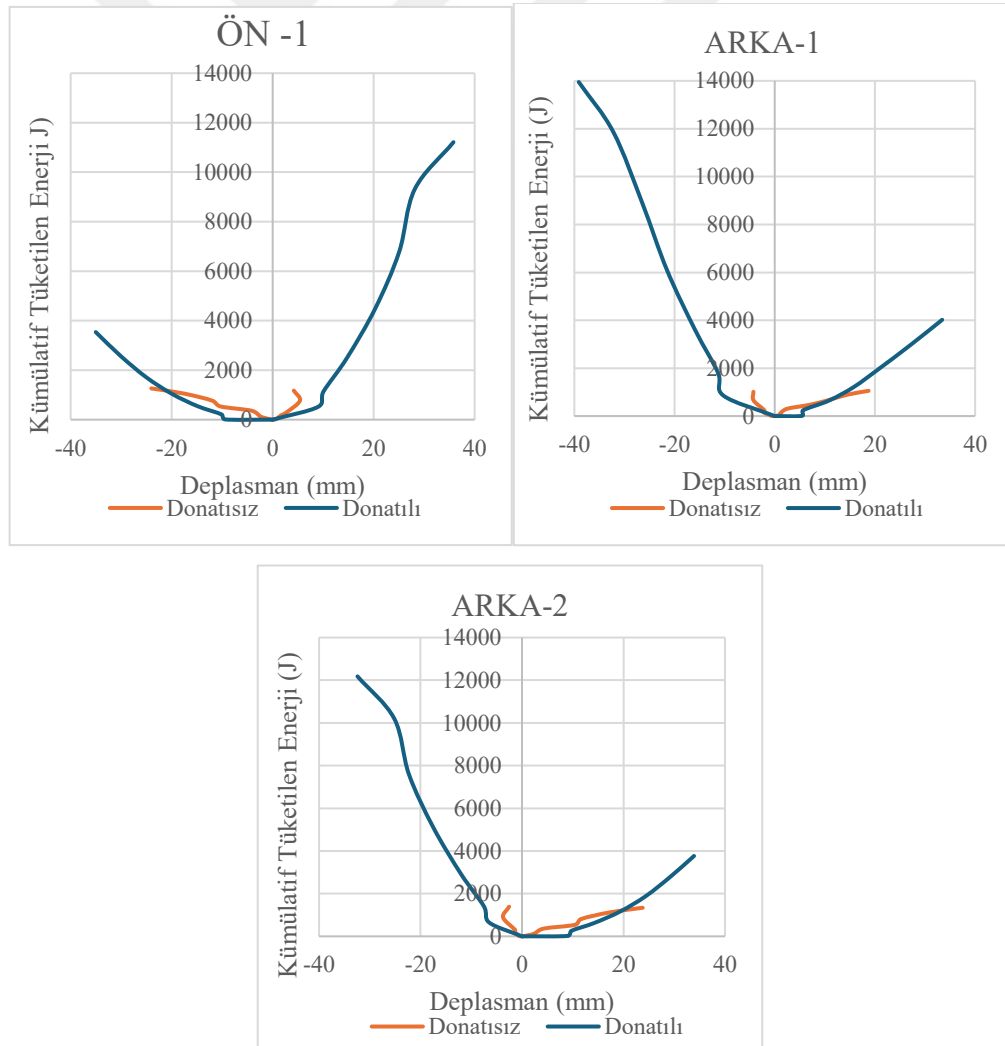
Yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen histeresis eğrilerin altında kalan alanın hesaplanarak ve kümülatif olarak eklenerek itme ve çekme durumlarında ayrı ayrı hesaplanmış, Çizelge 5.9’da sayısal olarak, Şekil 5.38’de ise grafiksel olarak verilmiştir. Donatılı yığma bina, donatısız yığma binaya göre maksimum yüke kadar olan çevrimlerden çekme yönünde yapının ön tarafından elde edilen verilere göre ve arka tarafından elde edilen verilere göre 5.88 katı daha fazla enerji tüketmiştir (Şekil 5.37). İtme yönünde ise bu değer yaklaşık 13 katına kadar çıkmaktadır. Göçme yüküne kadar ($0.85V_{max}$) olan çevrimlerde ise durum yaklaşık aynıdır. Donatılı numune donatısız numuneye göre; çekme yönünde yaklaşık 6 kat, itme yönünde ise yaklaşık 5.5 daha fazla enerji tüketmiştir.



Şekil 5.37 Kümülatif tüketilen enerjilerin kıyaslaması

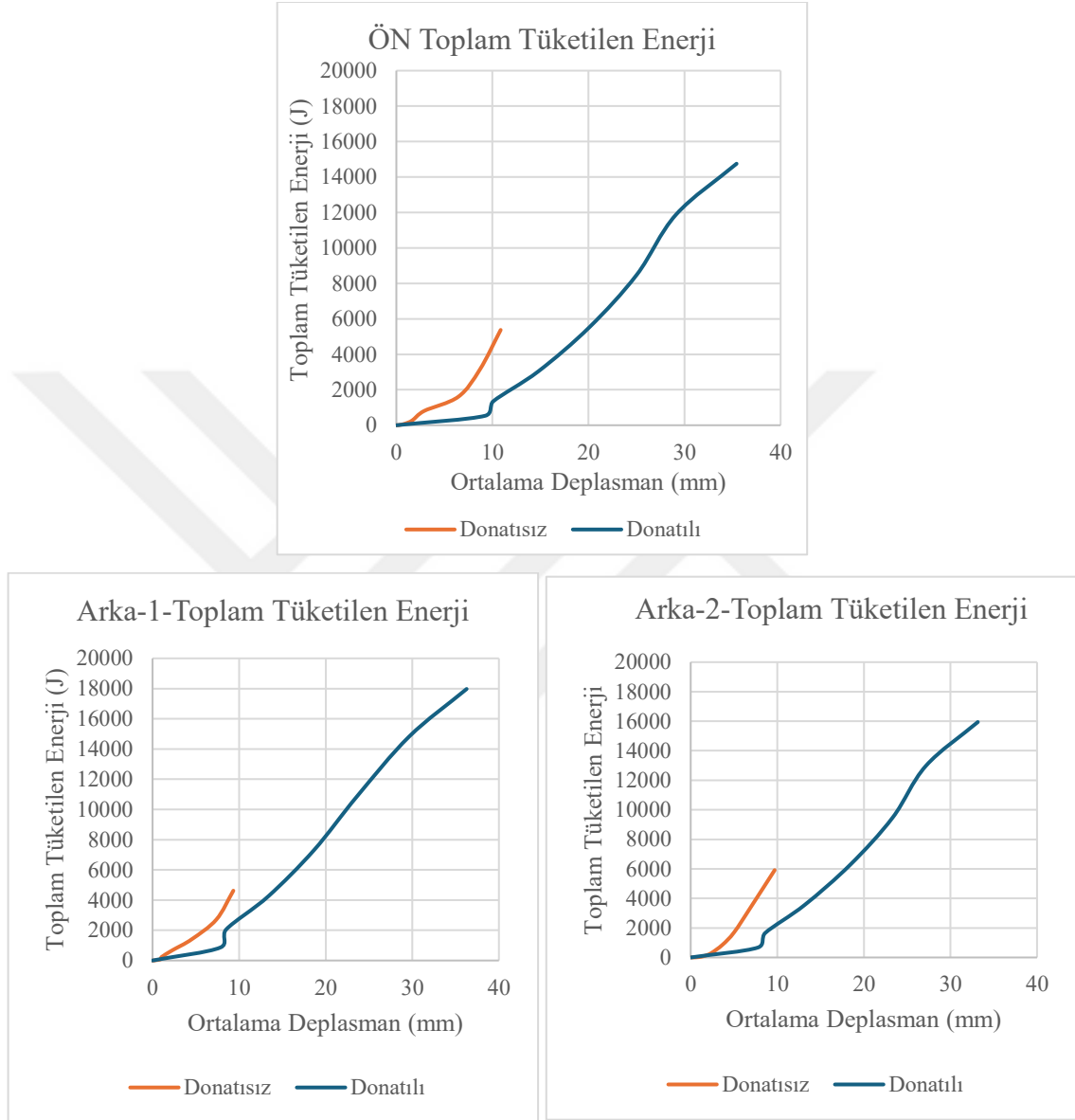
Çizelge 5.9 Kümülatif enerji tüketim kapasiteleri

T e s t N u m u n e l e r i	Kümülatif Enerji Dağılımı (J)											
	ÖN				ARKA1				ARKA2			
	Maksimum Yatay Yüke Kadar ($\leq V_{max}$)		Göçme Yüğüne Kadar ($0.85 \cdot V_{max}$)		Maksimum Yatay Yüke Kadar ($\leq V_{max}$)		Göçme Yüğüne Kadar ($0.85 \cdot V_{max}$)		Maksimum Yatay Yüke Kadar ($\leq V_{max}$)		Göçme Yüğüne Kadar ($0.85 \cdot V_{max}$)	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
S1	766	126	1174	534	654	108	1015	470	888	126	1388	540
S2	4504	1709	8048	3156	6091	1972	10375	3591	5127	1877	8898	3368



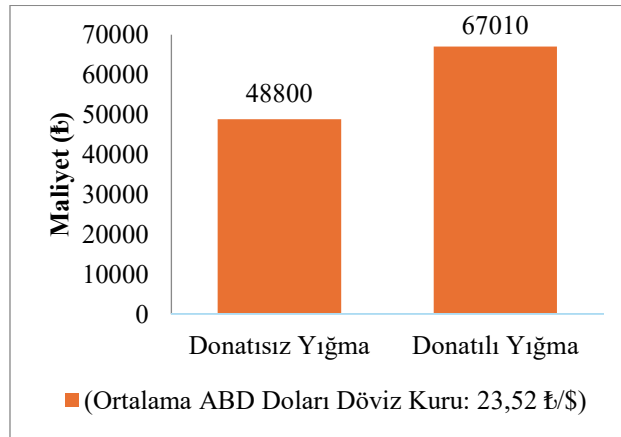
Şekil 5.38 Numunelerin itme ve çekme çevrimlerinde kümülatif tükettiği enerji eğrileri

Numunelerin, her itme ve çekme çevrimlerinin mutlak değerce toplamlarının ve çevrimlerinin deplasman değerlerinin mutlak değerce toplamının ortalaması dikkate alınarak elde edilmiş kümülatif enerji tüketim grafikleri Şekil 5.39’de verilmiştir.



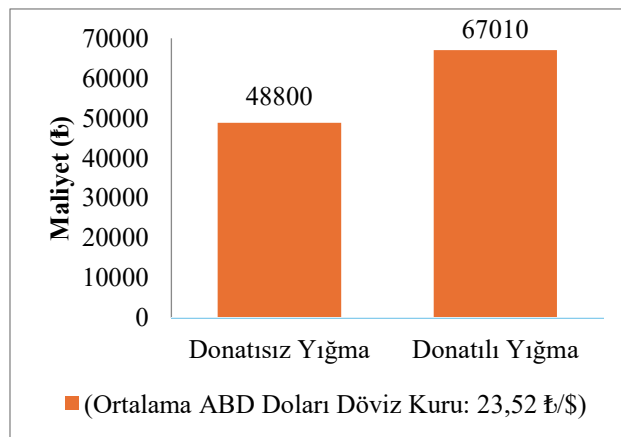
Şekil 5.39 Numunelerin kümülatif tükettiği enerji eğrileri

5.5.3.4. Finansal maliyet karşılaştırması



Şekil 5.40 Maliyet kıyaslaması

Çizelge 5.10’da, donatısız (S1 Numunesi) ve donatılı (S2 Numunesi) yığma numunelerin imalatında kullanılan malzemeler ile uygulanan işçilik süreçlerine ilişkin maliyet analizi tablosu sunulmaktadır. S2 numunesinin maliyeti, S1 numunesine kıyasla yaklaşık %37,3 daha yüksektir. S2 numunesinde işçilik maliyeti, S1’e kıyasla 12.500,00 ₺ daha yüksektir. Bu durum, S2 numunesinin üretim sürecinde daha fazla zaman, emek veya karmaşık işlemler gerektirdiğini göstermektedir. S2 numunesinde donatı kullanımı maliyeti, S1 numunesine göre daha fazladır. Bu durum, S2 numunesinin donatılı olması ve daha fazla malzeme gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. S2 numunesinde ek olarak epoksi maliyeti söz konusudur. S1 numunesinde epoksi kullanılmadığı için bu maliyet farkı belirgin bir etkiye sahiptir (Şekil 5.40).



Şekil 5.40 Maliyet kıyaslaması

Çizelge 5.10 S1 ve S2 numunelerinde malzeme ve işçilik maliyet analizi

Malzeme Adı	Birimi	S1 Numunesi (Fiyatı)	S2 Numunesi (Fiyatı)
Beton C25/30	m ³	7.450,00 ₺	7.400,00 ₺
Çelik Donatı (B420C)	ton	4.600,00 ₺	7.750,00 ₺
Kum/Çimento	ton/adet	4.250,00 ₺	5.000,00 ₺
Tuğla	adet	12.000,00 ₺	12.760,00 ₺
Kalıp	m ²	2.800,00 ₺	2.800,00 ₺
Boya	adet	200,00 ₺	200,00 ₺
Epoksi	adet	0,00 ₺	1.100,00 ₺
İşçilik	adet	17.500,00 ₺	30.000,00 ₺
Toplam Tutar		48.800,00 ₺	67.010,00 ₺
<i>Fiyatlara nakliye bedeli ve KDV tutarı eklenmiştir. (Ortalama ABD Doları Döviz Kuru: 23,52 ₺/\$)</i>			

5.6. Yığma Binaların Sayısal Sonuçları ve Karşılaştırılması

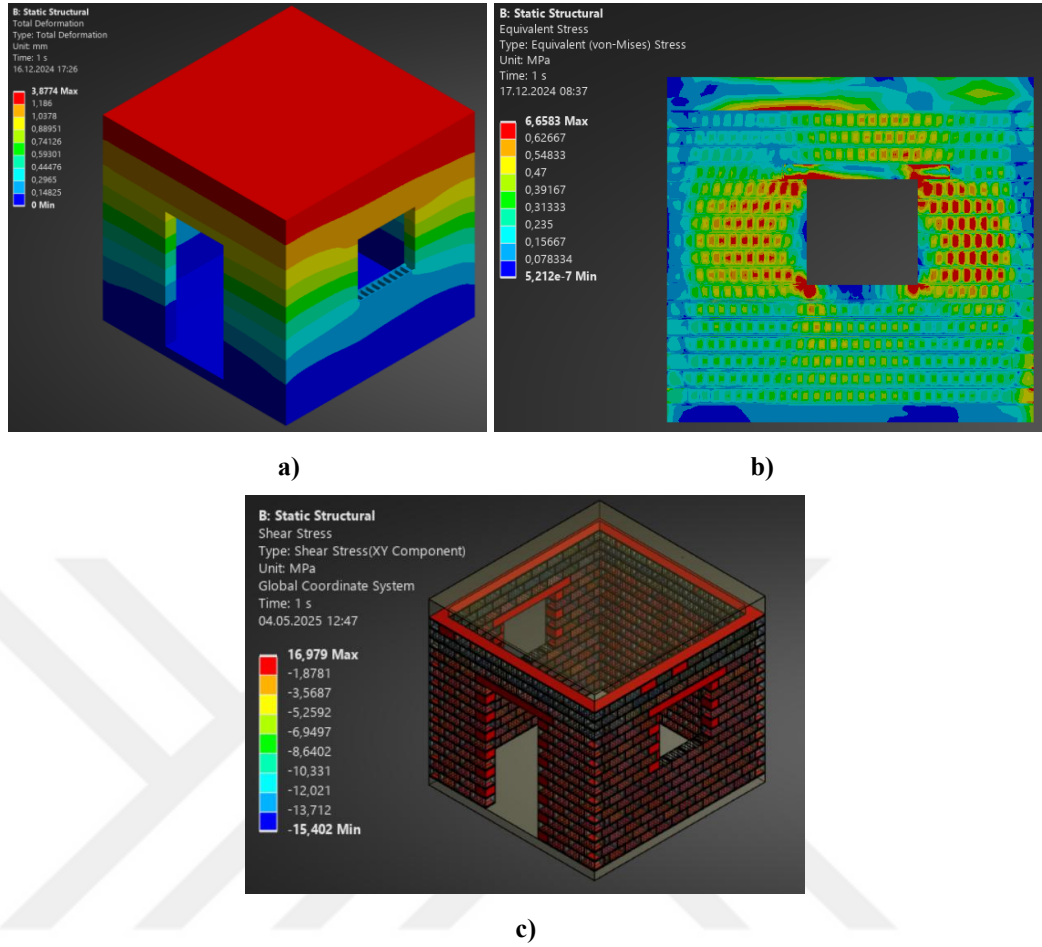
Sayısal sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve numuneler arasındaki performans farklarının karşılaştırılabilmesi için numunelere ilişkin analiz sonrası görseller ANSYS yazılımı ile hazırlanmıştır. Bu görseller, numunelerin toplam deformasyon davranışını ve gerilme davranışını göstermektedir.

Sayısal çalışmada, numuneye uygulanan kuvvetin yönüne bağlı olarak değişiklik gösteren maksimum kuvvet değerleri sisteme tanımlanmış ve bu kuvvetlerin etkisi altında numunenin davranışları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu çalışma, deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin geometrik ve malzeme özellikleri birebir korunarak oluşturulmuştur.

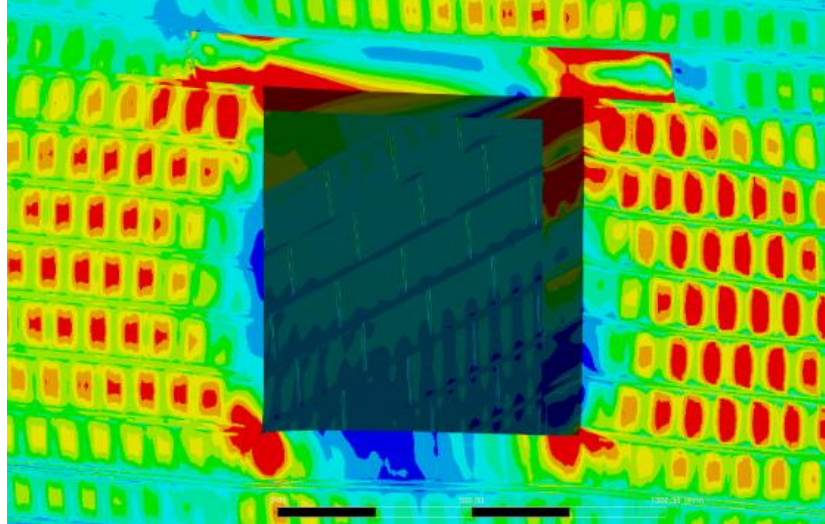
5.6.1. Donatısız yığma binanın sayısal sonuçları

Donatısız yığma binalarda deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri, yükün uygulama yönüne göre ANSYS yazılımı kullanılarak modele statik yükleme olarak tanımlanmış ve analiz bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. 59,68 kN yük çekme yönünde verilmiş olup yükleme sonrası maksimum deplasman 3,87 mm oluşmuştur (Şekil 5.41 a). Çekme yönünde yükleme sonrası maksimum 6,65 MPa gerilme değerine ulaştığı gösterilmiştir (Şekil 5.41b). Kesme gerilmesi analiz edildiğinde, maksimum değer 16,97 MPa olarak gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 5.41 c).



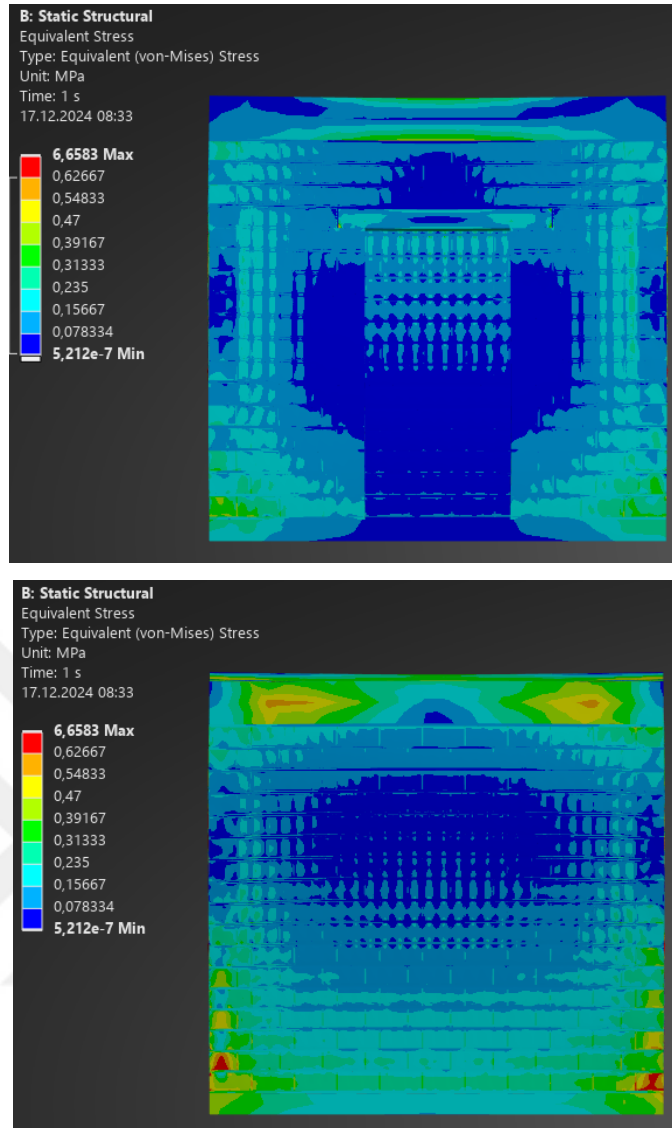
Şekil 5.41 S1 numunesinin çekme yönündeki analitik sonuçları

Gerilme dağılımı incelendiğinde, gerilmelerin kırmızı ve sarı renk tonları yüksek, yeşil ve mavi tonları düşük gerilmeleri göstermektedir. S1 numunesinin çekme yönündeki analizinden elde edilen sonuçlara göre, yapıda gerilmelerin maksimum değerlere ulaştığı noktaların pencere çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Pencere kenarları, gerilme yığılmalarının oluşabileceği geometrik keskinlikler meydana getirir. Bu da gerilmenin bu bölgelerde yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu durum, pencere açıklıklarının yapısal gerilme dağılımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 5.42).



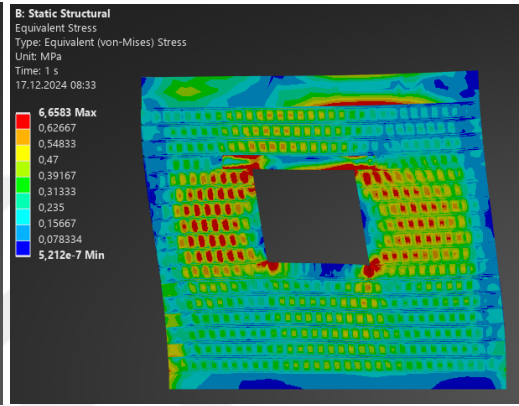
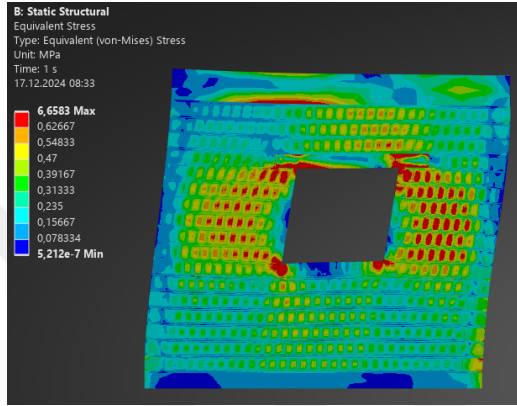
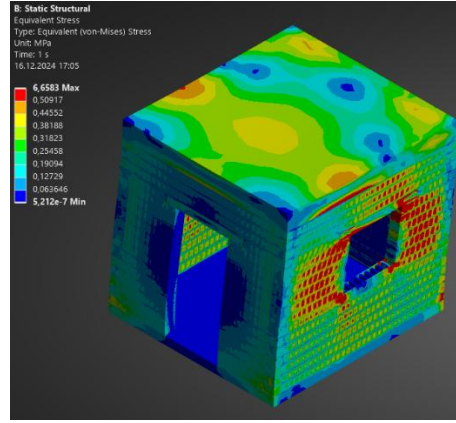
Şekil 5.42 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin penceredeki yakın görünümü

S1 numunesinin çekme yönündeki analizinden elde edilen gerilme davranışları incelendiğinde ön ve arka cephelerdeki gerilmelerin büyük bir kısmının mavi ve yeşil tonlarında olduğu görülmektedir. Bu da gerilmenin düşük seviyelerde olduğu bölgeleri ifade etmektedir. Yapının ön ve arka bölgesinde (pencere açıklığı bulunmayan bölgelerde) gerilmelerin düşük seviyelerde olduğu gözlenmektedir. Bu durum, çekme yükünün daha homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Ancak, kırmızı renkle gösterilen maksimum gerilme bölgeleri dikkat çekici şekilde yapının alt ve üst kenarlarında yoğunlaşmıştır. Bu tür bölgelerde gerilme yığılmalarının oluşması, yüklerin kenar bölgelerine transfer edildiğini ve yapının bu alanlarda daha fazla zorlandığını gösterir (Şekil 5.43).



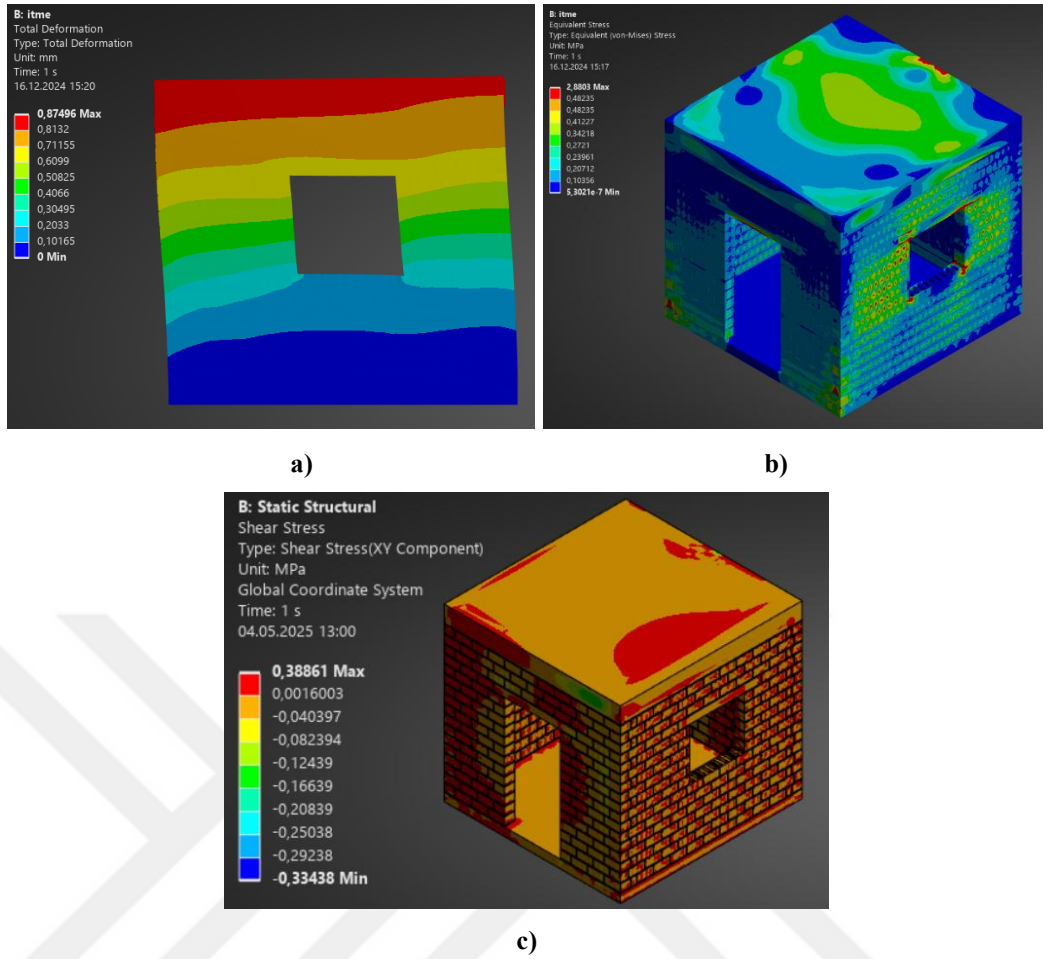
Şekil 5.43 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü

S1 numunesinin çekme yönündeki analizinden elde edilen gerilme davranışları incelendiğinde sol yan ve sağ yan cephelerdeki gerilmelerin pencere çevresinde, üst betonarme döşeme hizasında ve bina temel ile duvar arasında köşe kısımlarında yoğunlaşmaktadır (Şekil 5.44). Yapıya uygulanan çekme kuvvetinin etkisiyle, açıklık çevresindeki malzeme daha fazla zorlanmaya maruz kalmaktadır. Pencere gibi açıklıklar, yük taşıma kapasitesinde bir süreksizlik oluşturur. Bu nedenle yük, çevresel malzemeye aktarılır ve bu bölgelerde gerilmelerin artmasına neden olur.



Şekil 5.44 S1 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin 3D, sol yan ve sağ yan cephelerdeki görünümü

38,68 kN yük itme yönünde verilmiş olup yükleme sonrası maksimum deplasman 0,87 mm oluşmuştur (Şekil 5.45 a). Yine aynı yük değerinde yükleme sonrası maksimum 2,88 MPa gerilme değerine ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 5.45 b). Kesme gerilmesi analiz edildiğinde, maksimum değerin 0,38 MPa olarak gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 5.45 c).



Şekil 5.45 S1 numunesinin itme yönündeki analitik sonuçları

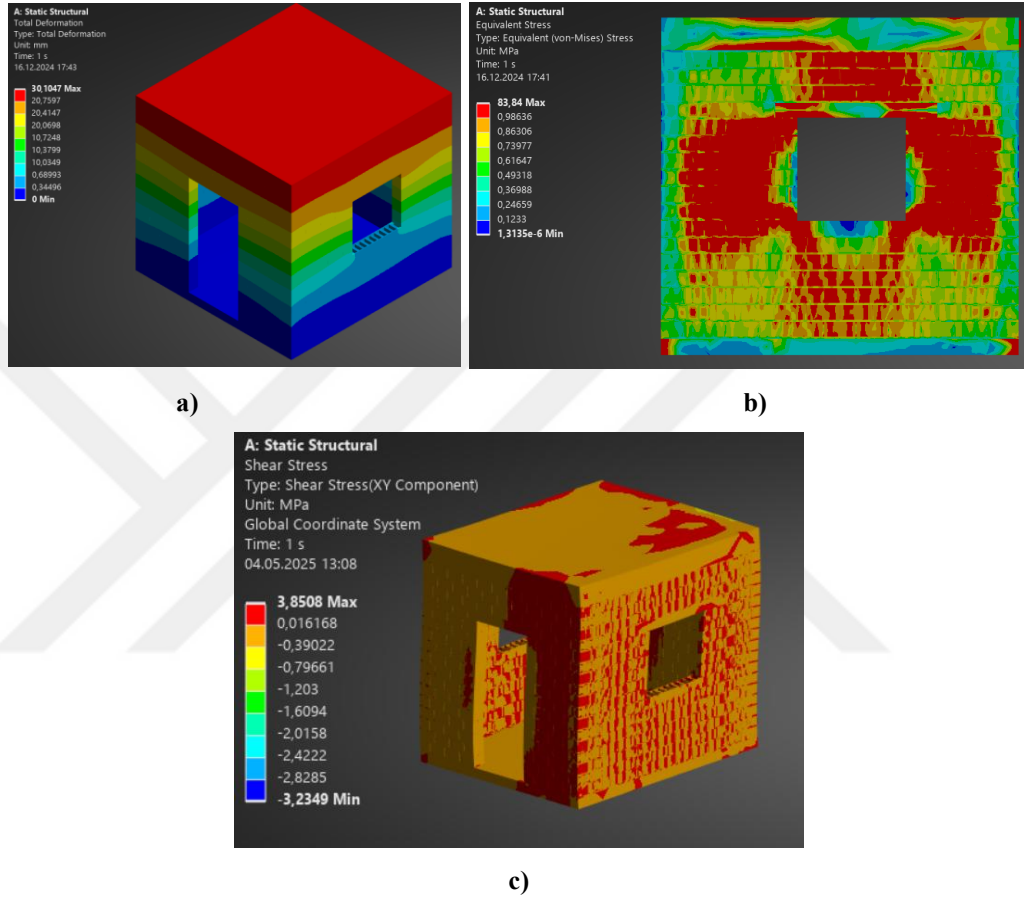
Yapının büyük bir kısmında gerilmeler düşük seviyelerde olup mavi ve yeşil tonlarıyla gösterilmiştir. Bu bölgelerde gerilmenin 0,302 MPa ile 0,321 MPa arasında düşük değerlerde olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum gerilme değerleri 2,8803 MPa kırmızı renkle gösterilen alanlarda yoğunlaşmıştır.

Yapıda çekmede olduğu gibi itme etkisi altında da pencere ve kapı açıklıkları çevresinde gerilme yığılmaları oluşmuştur. Bu durum, açıklık kenarlarının yük taşıma kapasitesinde süreksizlik yaratmasıyla ilişkilidir.

5.6.2. Donatılı yığma binanın sayısal sonuçları

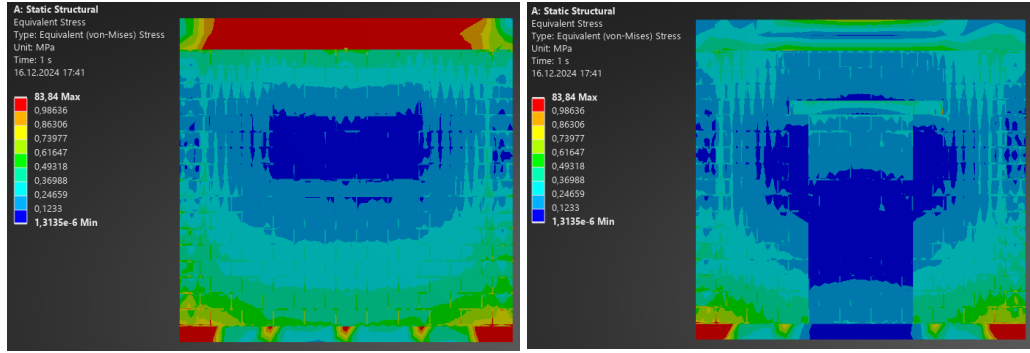
Donatılı yığma binada deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri, yükün uygulama yönüne göre ANSYS yazılımı kullanılarak modele statik yükleme olarak tanımlanmış ve analiz bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Çekme yönünde 182,56 kN değerinde bir yük uygulanmış ve yükleme sonucunda maksimum 30,10 mm

deplasman meydana gelmiştir (Şekil 5.46 a). Aynı yükleme koşullarında, yapıda oluşan maksimum gerilme değeri 83,84 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 5.46 b). Bu sonuçlar, yük etkisi altında yapıdaki deformasyon ve gerilme dağılımının önemli bir göstergesi olmuştur. Kesme gerilmesi analiz edildiğinde, maksimum değerin 3,85 MPa olarak gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 5.46 c).



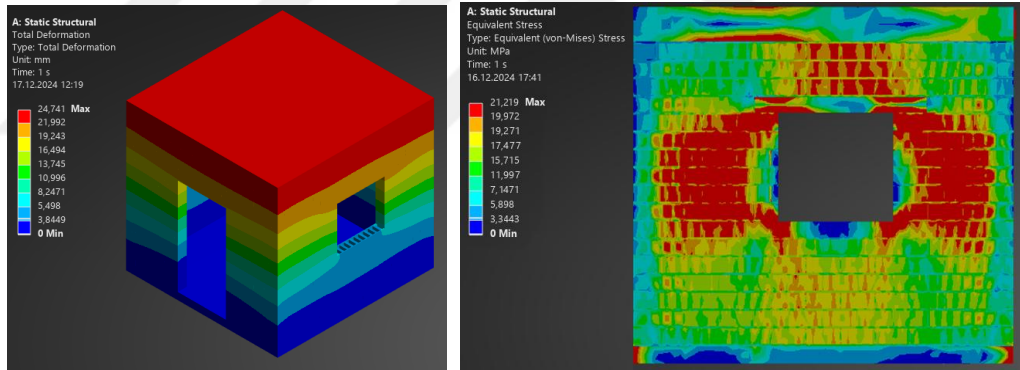
Şekil 5.46 S2 numunesinin çekme yönündeki analitik sonuçları

Görselde yapı üzerindeki toplam deformasyon dağılımı renk skalası ile gösterilmiştir. Deformasyon, özellikle yapının üst döşeme bölgesinde maksimum değerine ulaşmıştır. Bu durum, yük aktarımının yapının üst kısmında daha fazla deformasyona neden olduğunu göstermektedir. Yapının alt bölgesinde deformasyon daha düşük seviyelerde kalmıştır (mavi ve yeşil tonları). Pencere çevresinde kırmızı renklerle gösterilen yüksek gerilme yığılmaları oluşmuştur. Bu durum, açıklık kenarlarının yük aktarımı sırasında gerilme yoğunlaşmasına maruz kaldığını göstermektedir. Gerilmelerin maksimum değerinin, tuğla, harç ve beton döşemelerin basınç dayanımını aştığı belirlenmiştir. Özellikle üst betonarme döşeme, maksimum gerilme değerlerinin yoğunlaştığı bölge olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.47).



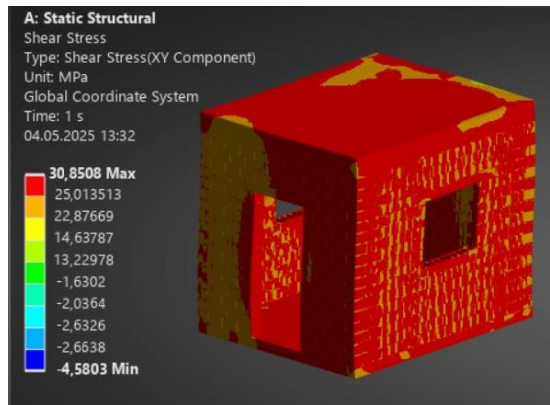
Şekil 5.47 S2 numunesinin çekme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü

34,19 kN yük itme yönünde verilmiş olup yükleme sonrası maksimum deplasman 24,74 mm oluşmuştur (Şekil 5.48 a). Yine aynı yük değerinde yükleme sonrası maksimum 21,22 MPa gerilme değerine ulaştığı gösterilmiştir (Şekil 5.48 b). Kesme gerilmesi analiz edildiğinde, maksimum değer 30,85 MPa olarak gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 5.48 c).



a)

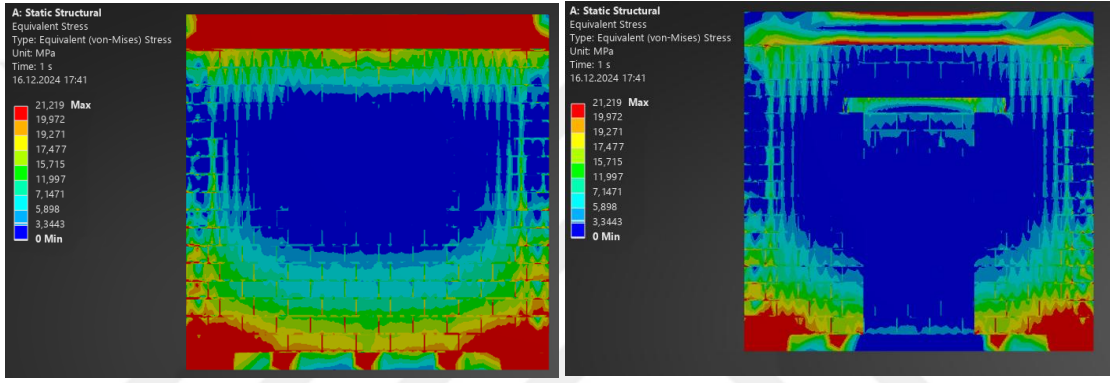
b)



c)

Şekil 5.48 S2 numunesinin itme yönündeki analitik sonuçları

Görselde yapı üzerindeki toplam deformasyon dağılımı incelendiğinde, deformasyonun özellikle üst döşeme bölgesinde maksimum değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Yapının alt bölgelerinde deformasyon daha düşük seviyelerde kalırken, pencere çevresinde yüksek gerilme yığılmaları olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, açıklık kenarlarının yük aktarımı sırasında gerilme yoğunlaşmasına maruz kaldığını göstermektedir. Ayrıca, gerilme değerlerinin tuğla ve harç döşemelerin basınç dayanımını aştığı ve maksimum gerilmelerin özellikle üst betonarme döşemede yoğunlaştığı belirlenmiştir (Şekil 5.49).



Şekil 5.49 S2 numunesinin itme yönündeki analizi sonrası gerilmelerin ön ve arka cephelerdeki görünümü

5.7. Yığma Binaların Sayısal Sonuçları ve Karşılaştırmaları

Donatısız (S1) ve donatılı (S2) yığma yapıların itme ve çekme yönlerine göre maksimum yükleri altındaki davranışları ANSYS yazılımında sayısal olarak incelenmiştir. Yapısal davranışları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda bulunan maksimum yükler itme ve çekme yönlerinde numunelere uygulanmıştır. Bu yüklerle göre oluşan deplasman değerleri ve gerilme değerleri Çizelge 5.11 'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 Yığma binaların sayısal sonuçları

Numune Adı	Yön	Maksimum Yük(kN)	Maksimum Deplasman(mm)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Kesme Gerilmesi (MPa)
Donatısız Numune (S1)	İtme	59,68	3,87	6,65	16,97
	Çekme	38,68	0,87	2,88	0,38
Donatılı Numune (S2)	İtme	182,56	30,1	83,84	3,85
	Çekme	34,19	24,74	21,22	30,85

Donatısız numunenin, maksimum deplasman değeri 3,87 mm ile sınırlı kalmıştır. Yapının düşük deplasman kapasitesi, donatılı numuneye (S2) göre gevrek davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, yapıdaki çatlakların ani ilerlediğini ve deformasyon kabiliyetinin yetersiz olduğunu ifade etmektedir. İtme yönünde maksimum deplasman 0,87 mm ile oldukça düşük bir değerdedir. Bu sonuç, donatısız yapının çekme kuvvetlerine karşı neredeyse hiç süneklik göstermediğini ve kırılğan bir şekilde hasar aldığını doğrulamaktadır.

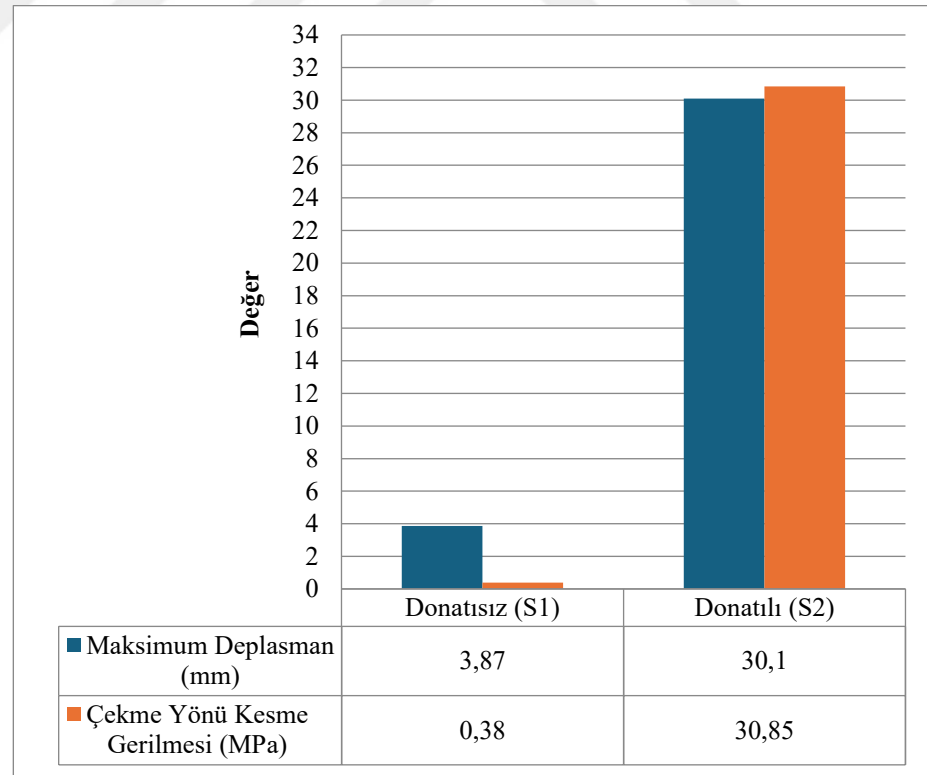
Donatılı numunede maksimum deplasman 30,1 mm olarak belirlenmiştir. Donatılı yapı, donatısız yapıya kıyasla çok daha fazla deformasyon kapasitesine sahiptir. Bu durum, sünek davranış sergilediğini ve yük altında enerjiyi absorbe ederek yapının kırılmadan deformasyon yapabildiğini göstermektedir. Çekme yükü altında maksimum deplasman 24,74 mm olup donatısız numuneye kıyasla oldukça yüksektir. Çekme yüklemesi altında bile donatının yapıya esneklik kazandırdığı ve yapının sünek davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu durum, donatının çekme kuvvetlerine karşı etkin rol oynadığını kanıtlamaktadır.

Çizelge 5.11'e göre, donatısız numunede itme yönünde yüksek bir kesme gerilmesi (16,97 MPa) meydana gelirken, çekme yönünde oldukça düşük bir değer (0,38 MPa) gözlemlenmiştir. Donatılı numunede ise çekme yönünde kesme gerilmesi belirgin biçimde artarak 30,85 MPa 'ya ulaşmış, bu da donatının çekme etkisi altındaki kesme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. İtme yönünde ise donatılı numunenin kesme gerilmesi (3,85 MPa) daha düşük çıkmış olup, yükün farklı taşıma mekanizmalarına (örneğin eğilme) dağıldığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak donatısız numune (S1), hem itme hem de çekme yüklemeleri altında gevrek davranış sergileyerek düşük deplasman kapasiteleri göstermiştir. Yapı, deformasyona uğramadan ani kırılmaya maruz kalmıştır. Donatılı numune (S2) ise yüksek deplasman değerleri ile sünek davranış göstermiştir (Çizelge 5.12 ve Şekil 5.50). Yapı, yük altında deformasyon yaparak enerjiyi absorbe edebilmiş ve göçme öncesi daha fazla şekil değiştirebilmiştir. Donatının kullanımı yığma yapıların sünekliğini önemli ölçüde artırarak, yapının hem itme hem de çekme yüklemeleri altında daha iyi performans göstermesini sağlamıştır. Sünek davranış, deprem gibi dinamik yükler altında yapıların ani göçmesini önlemek açısından kritik bir avantajdır.

Çizelge 5.12 Analitik ve deneysel çalışma kıyaslaması

Kriter	Deneysel Çalışma (Donatısız S1)	Analitik Çalışma (Donatısız S1)	Deneysel Çalışma (Donatılı S2)	Analitik Çalışma (Donatılı S2)
Maksimum Yük (kN)	-59,68	59,68	182,56	182,56
Maksimum Deplasman (mm)	5,4	3,87	25,01	30,1



Şekil 5.50 Analitik kıyaslaması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

TBDY-2018’de verilen yığma yapı türlerinden olan donatılı ve donatısız bir yığma yapının deprem davranışı hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yığma yapılar 1/1 ölçeğinde ve TBDY-2018 yönetmeliğine uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Yapılan deneyler ve sayısal çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar ve öneriler şöyledir;

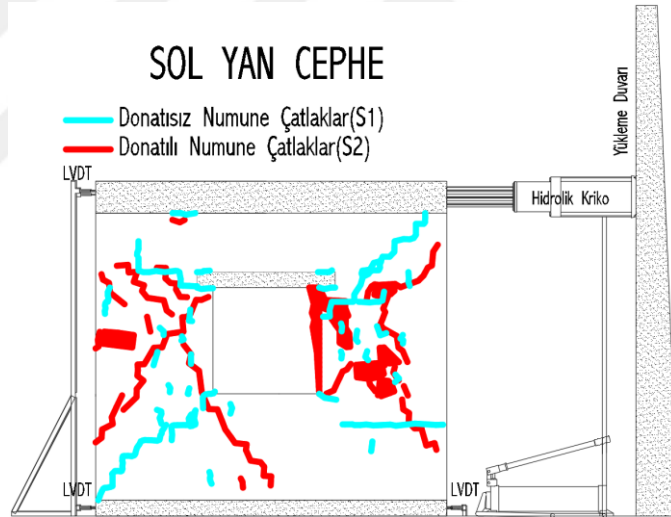
- 1) Genel olarak yığma yapılar itme yönünde daha fazla yük taşıma kapasitesine sahipken, diğer yönde yük taşıma kapasiteleri daha az olmaktadır. Yapılan deney sonuçları da bu durumu göstermektedir. Tersinir tekrarlanır yükler yığma duvarları çökmelere karşı dayanılmaz hale getirirler. Yapılar deprem etkisine, deprem enerjisini sönümleyerek karşı koyarlar. Bu durum yapının sünekliğine bağlıdır. Yapılar hem yeteri kadar sünek olmalı, hem de yük taşıma kapasiteleri yüksek olmalıdır.
- 2) Donatısız yığma yapıda ilk çatlama +4.çevrim meydana gelmişken, donatılı yığma yapıda ilk çatlak -4.çevrimde meydana gelmiştir. Ayrıca donatısız yığma yapıda 59.68 kN’luk tersinir tekrarlanır yük altında kalmışken donatılı yığma yapının kırılma yükü 182.56 kN’da kalmıştır. Buna göre donatılı yığma yapı 3,06 kat fazla yük taşımıştır.
- 3) Donatısız yığma yapıda çökme anında meydana gelen deplasman 5,4 mm oluşmuşken, donatılı yığma yapıda meydana gelen deplasman 25,01 mm olmuştur. Bu durum değerlendirildiğinde donatılı yığma yapıda meydana gelen deplasman donatısız yığma yapıya göre 4,63 kat daha fazladır.
- 4) Maksimum yükteki ön deplasmanlardaki rijitlikler değerlendirildiğinde donatısız yığma yapıda meydana gelen rijitlik 11.06 kN/mm iken, donatılı yığma yapıda meydana gelen rijitlik 8.98 kN/mm olarak bulunmuştur. Rijitlikler değerlendirildiğinde donatılı yığma yapıdaki rijitlik, donatısız yığma yapıdaki rijitliğe göre yüzde %18.81 daha az bulunmuştur. Donatısız numunede yükün arttığı durumlarda hasar miktarı arttığından deplasman değeri artmakta ve bunun sonucu ilerleyen çevrimlerde rijitliğide düşmektedir.
- 5) Donatısız yığma yapı ile donatılı yığma yapının enerji tüketme kapasiteleri karşılaştırıldığında, donatısız yığma yapının enerji tüketme kapasitesi 766,02

J iken, donatılı yığma yapının enerji tüketme kapasitesi 4504 J olarak hesaplanmıştır. Bu da donatılı yığma yapının donatısız yığma yapıya göre 5,88 kat daha fazla enerji tükettiğini göstermektedir.

- 6) Donatılı numunenin (S2) maliyeti, özellikle işçilik, çelik donatı ve epoksi kullanımı gibi kalemlerden kaynaklanan artışlarla, donatısız numuneye (S1) kıyasla belirgin şekilde yüksektir. Bu durumlar, donatılı yapıların üretiminde işçilik ve ek malzemelerin maliyeti üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Tasarım ve maliyet optimizasyonu açısından S2 numunesinin maliyetinin yaklaşık %37 daha fazla olduğu dikkate alınmalıdır.
- 7) İki numune arasında sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında; donatısız numune (S1), düşük deplasman kapasitesi (maks. 3,87 mm) ve düşük çekme yönü kesme gerilmesi (0,38 MPa) ile gevrek ve kırılgan bir davranış sergilemiştir. Buna karşın donatılı numune (S2), yüksek deplasman kapasitesi (maks. 30,1 mm) ve çekme yönünde yüksek kesme gerilmesi (30,85 MPa) ile sünek ve dayanıklı bir performans göstermiştir. Bu sonuçlar, donatının yapıya önemli ölçüde deformasyon kabiliyeti ve çekme dayanımı kazandırdığını ortaya koymaktadır.
- 8) Sayısal çalışmalar, deneysel çalışmaların gerçekliğini göstermede önemli bir parametre olarak düşünüldüğünde, sayısal sonuçların gerek deneysel çalışmalarda elde edilen deplasmana yakın sonuçlar vermesi, çatlak formasyonun gerilme formasyonu ve kesme gerilmeleri ile üst üste düşmesi ve yapıda oluşan hasarlarla paralellik göstermesi yapılan çalışmanın doğruluğuna işaret etmektedir.
- 9) Toplam gerilme ve kesme gerilmesi değerlerinin, harç ve tuğla numunelerinin malzeme dayanım değerlerinin üzerinde gerçekleşmesi, deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle örtüştüğünü göstermektedir. Bu durum, yapılan deneysel çalışmanın sayısal modellemelerle uyumlu olduğunu ve aralarında anlamlı bir paralellik bulunduğunu ortaya koymaktadır.
- 10) Deneysel ve sayısal çalışmalarda özellikle pencere ve kapı boşluklarında oluşan deformasyon görselleri birbirine benzerlik göstermektedir. Sayısal çalışmalarda donatılı numunelerde oluşan yüksek gerilmeler deneysel çalışmalarda da tuğla, harç ve beton elemanlarında kırılma ve çataklar oluşturmuştur. Pencere ve kapı açıklıkları çevresinde oluşan gerilme yoğunlaşmaları, yığma binalarının bu bölgelerde zayıf noktalar barındırdığını

göstermektedir. Bu tür gerilme yığılmaları, çatlak başlangıçlarına veya zamanla malzeme yorulmalarına neden olabilir. Açıklık çevresindeki gerilme yoğunlaşmaları ise yapısal bütünlük açısından kritik bölgeler olarak öne çıkmaktadır.

- 11) S1 (donatısız yığma) ve S2 (donatılı yığma) numunelerine ait sol yan cephedeki çatlak çizimleri incelendiğinde, çatlakların oluşum yeri ve yönlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Donatısız yapıda çatlaklar daha çok pencere köşelerinden başlayarak düzensiz ve yaygın şekilde dağılmış; kayma çatlakları belirgin olarak gelişmiştir. Buna karşılık donatılı yapıda çatlaklar daha kontrollü bir şekilde oluşmuş, belirgin kesme çatlakları ve tuğla kabuğunda patlamalar sınırlı alanlarda toplanmıştır. Donatıların çatlak ilerlemesini sınırlayarak yapının sünek davranmasını sağladığı ve çatlakların yönlendirilmiş biçimde oluşmasına katkıda bulunduğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 S1 (donatısız) ve S2 (donatılı) numunelerine ait deney sonu çatlak oluşumlarının genel görünümü.

- 12) Donatılı yığma yapı numunelerinin imalat sürecinde, işçilik açısından önemli düzeyde zorluklar yaşanmıştır. Uygulamada tuğlaların içlerinden geçirilen çelik donatılar ile harç kullanılarak örülmesi, yalnızca dikkatli ve özenli bir işçilik değil, aynı zamanda yüksek koordinasyon gerektiren bir işlem olarak öne çıkmıştır. Donatıların, tuğlaların mevcut deliklerine tam olarak hizalanarak yerleştirilmesi sırasında önemli düzeyde uyum zorluğu yaşanmış; bu nedenle imalat süreci birden fazla deneyimli işçinin ve destekleyici iskele

sistemlerinin eşzamanlı çalışmasını gerektirmiştir. Donatısız yığma yapı işçilik açısından daha kolay olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, donatılı yığma yapının yük taşıma kapasitesi, sünekliliği ve enerji tüketme kapasitesinin, donatısız yığma yapıya göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat donatılı yığma yapının gerçek bir yapıda uygulanabilirliği, işçiliği çok zordur. Maliyet açısından donatılı yığma yapının maliyeti donatısız yığma yapıya göre fazladır.

6.2. Öneriler

Ekonomik nedenlerle deneysel çalışmaların yapılamadığı TBDY-2018'de tanımlanan kuşatılmış ve donatılı panel sistemli yığma binalar üzerine yapılacak araştırmalar, mevcut çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmesi ve bu yapıların performansının değerlendirilmesi açısından önemli bir gereklilik oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, farklı donatı türleri kullanılarak tabla kalınlığı artırılabilir ve bu parametrenin yapısal performansa etkisi incelenebilir. Ayrıca, eksenel yükün artırılmasıyla, yığma yapıların taşıyıcı elemanlarının düşey yükler altındaki taşıma kapasitesinde meydana gelen değişimler gözlemlenebilir.

Elde edilen sonuçlara göre donatılı binada, açıklık kenarlarında gerilme yığılmaları belirgin şekilde oluşmuştur. Donatının bu bölgelerde daha etkin yerleştirilmesi veya kenar bölgelere ek takviyeler yapılması, gerilme yoğunlaşmasını azaltabilir.

Pencere ve kapı kenarlarında donatı optimizasyonu ve takviye elemanlarının eklenmesi ile gerilme yığılmalarını azaltacak şekilde tasarım ve malzeme iyileştirmeleri yapılabilir.

Yapının kritik bölgelerinde (örneğin açıklık kenarları) duvar kalınlığı artırılabilir veya daha dayanıklı malzemeler kullanılabilir.

TBDY-2018 kapsamında yığma yapılarda kullanılan tuğla, briket ve benzeri yapı malzemelerine ilişkin detaylı bilgiler, bu elemanların boşluk oranlarını gösteren örnek görseller ile sunulmalı; uygulama esaslarına yönelik kurallar açık biçimde belirtilmelidir. Özellikle donatılı yığma sistemlere dair üç boyutlu model örneklerinin eklenmesi, tasarım ve uygulama süreçlerinde daha doğru ve etkin çözümler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, yapısal güvenlik ve dayanım açısından önemli bilgiler sunmakta ve ilerleyen çalışmalarda optimizasyon için temel oluşturmaktadır.



7. KAYNAKÇA

- Abdulla, K. F., Cunningham, L. S. ve Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, 349-365. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.08.021
- AFAD. (2018, 2 Ocak). Sismik Tehlike Haritası Özet Raporu. *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*. 2 Aralık 2024 tarihinde <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/ozetRapor.xhtml> adresinden erişildi.
- ANSYS. (2024). SOLID65 Elemanı Açıklaması. 16 Aralık 2024 tarihinde https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_arch/Hlp_E_SOLID65.html adresinden erişildi.
- Arun, G. (2005, 17 Şubat). Yığma Kagir Yapı Davranışı. *YDGA2005 - Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı*. Ankara.
- Arya, A. S., Boen, T. ve Ishiyama, Y. (2014). Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000229059> adresinden erişildi.
- Aydemir, A. (2010). *A Simple Seismic Performance Assessment Technique For Unreinforced Brick Masonry Structures*. 16 Aralık 2024 tarihinde <https://avesis.metu.edu.tr/yonetilen-tez/aeb7150e-3cfb-42ac-af23-dc0b26528957/a-simple-seismic-performance-assessment-technique-for-unreinforced-brick-masonry-structures> adresinden erişildi.
- Bahadır, F. ve Balık, F. S. (2021). Farklı Duvar Örgüleri ile Üretilmiş Prototip Yığma Binaların Sarsma Tablası Deneyleri. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 343-358. doi:10.36306/KONJES.837692
- Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. (1998). Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik (Deprem Yönetmeliği - 1998). Ankara: Resmî Gazete.
- Bayülke, N. (1978). Tuğla Yığma Yapıların Depremlerdeki Davranışları, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni. Ankara.
- Bayülke, N. (1992). Yığma Yapılar. İnşaat Mühendisleri Odası Ankara 2018.
- Bayülke, N. (2011). Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* içinde . Ankara: 11-14 Ekim ODTÜ.
- Büyükcan, Ç. İ. (2018). Gazbeton Üretiminde Mineral Katkı Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, *İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir*.
- Choudhury, T., Milani, G. ve Kaushik, H. B. (2020). Experimental and numerical analyses of unreinforced masonry wall components and building. *Construction and Building Materials*, 257, 119599. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119599
- Computers and Structures Inc. (2015). SAP2000 (Sürüm 18) [Bilgisayar yazılımı]. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.

- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2013). Riskli yapıların tespitine ilişkin yönetmelik. Resmî Gazete (No. 28786, 15.06.2013).
- Çırak, İ. F. (2011). Yığma Yapılarda Oluşan Hasarlar, Nedenleri ve Öneriler. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 3(2), 55-60.
- Çöğürçü, M. T. (2007). Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Dassault Systèmes. (2020). *ABAQUS 2020: Sonlu elemanlar analiz yazılımı* [Bilgisayar yazılımı]. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Doran, B., Murat HOTHOT, Y., Dinç Şengönül, B., Karslıoğlu, M., Ulukaya, S. ve Yüzer, N. (2025). Experimental and Numerical Investigation on Strengthening Techniques for Double-Wythe Stone Masonry Walls. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 36(4). doi:10.18400/TJCE.1517318
- Döndüren, M. S. ve Kollu, M. S. (2018). Son 15 Sene İçinde Türkiye’de Meydana Gelen Depremlerde Yığma Binalarda Meydana Gelen Hasarlar ve Nedenleri. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 17(2), 59-70. <http://sutod.selcuk.edu.tr/sutod/article/view/438> adresinden erişildi.
- Döndüren, Mahmud Sami, Demiröz, A., Şişik, Ö., Teknik, K., Müh, Ü., Bilimleri, D., Bölümü, M. (2019). Tarihi Yığma Tütünsüz Baba Türbesinin Mekaniksel Davranışının İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, (17), 24-29. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosyoteknik/issue/79087/1332115> adresinden erişildi.
- Döndüren, Mahmut Sami. (2008). Bağlayıcı Özelliği Artırılan Duvar Ve Sıva Harcının Düzlem Dışı Yüklenen Tuğla Duvarların Mekaniksel Davranışına Etkisi . *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Selçuk Üniversitesi.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). FEMA 273: Mevcut binaların sismik değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için yönergeler. Washington, DC: FEMA.
- García, H., Jiménez-Pacheco, J. ve Ulloa, J. (2024). Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification. *Results in Engineering*, 23, 102546. doi:10.1016/J.RINENG.2024.102546
- Güner, Y. ve Nuhoglu, A. (2022). Yığma Yapıların Düzlem İçi Davranışının Kafes Model Yaklaşımı ile Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(3), 479-489. doi:10.19113/SDUFENBED.1110156
- Hemant, B. K., Durgesh, C.R., Sudnir K. J., 2007. Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 19, 728-739.
- Huang, D., Albareda, A. ve Pons, O. (2023). Experimental and Numerical Study on Unreinforced Brick Masonry Walls Retrofitted with Sprayed Mortar under Uniaxial Compression. *Buildings 2023, Vol. 13, Page 122, 13(1)*, 122. doi:10.3390/BUILDINGS13010122

- Hwang, S. H., Kim, S. ve Yang, K. H. (2022). In-plane lateral load transfer capacity of unreinforced masonry walls considering presence of openings. *Journal of Building Engineering*, 47, 103868. doi:10.1016/J.JOBE.2021.103868
- Kayırga, O. M. (2017). Yığma Yapıların Deprem Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kıpçak, F. ve Erdil, B. (2023). Yığma yapıların düzlem dışı davranışlarına yan duvarın ve yan duvar boşluğunun etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 853-860. doi:10.28948/ngumuh.1268912
- Kömürcü, S. (2017a). Yığma Duvarların Düzlem İçi Davranışlarının Modellenmesi ve Analizi. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). *İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- Kömürcü, S. (2017b). Yığma Duvarların Düzlem İçi Davranışlarının Modellenmesi Ve Analizi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kumar Adhikari, R., Parammal Vatter, A. ve D'Ayala, D. (2023). Seismic Performance Assessment of Low-Rise Unreinforced and Confined Brick Masonry School Buildings Using the Applied Element Method. *Buildings 2023, Vol. 13, Page 159, 13(1)*, 159. doi:10.3390/BUILDINGS13010159
- Majid, A. , Bingöl, A. F. , ve CAF, M. ., (2015). Tarihi eserlerde Yığma Duvarların Geometrik Etkisine göre Taşıma Kapasitesinin araştırılması ve Düşey Donatılar Kullanılarak Güçlendirilmesi . 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu* (ss. 144-154). Erzurum, Türkiye.
- Moon, F. L. (Franklin L. (2003, 11 Aralık). Seismic Strengthening of Low-Rise Unreinforced Masonry Structures with Flexible Diaphragms. Georgia Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1853/5128> adresinden erişildi.
- Saberi, M. (1998). Deprem yüklerinin altında yığma binaların davranışı, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE). (2017). Depremlerde yapıların performans değerlendirmesi ve iyileştirilmesi için kılavuz (NZSEE yönetmeliği). Wellington, Yeni Zelanda: NZSEE.
- Nikooravesh, M. ve Soltani, M. (2021). Experimental and analytical investigation of seismic behavior of centercore-retrofitted masonry walls. *Engineering Structures*, 244, 112823. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112823
- Paulo B. Lourenço. (2013). Computational Strategies For Masonry Structures: Multi-Scale Modelling, Dynamics, Engineering Applications and Other Challenges. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería* içinde (ss. 25-28). Bilbao, España. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/26547/1/Lourenco%20PB.pdf> adresinden erişildi.

- Priestley, M. J. N. ve ;Paulay, T. (2003). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York, USA.
- Shariq, M., Abbas, H., Irtaza, H. ve Qamaruddin, M. (2008). Influence of openings on seismic performance of masonry building walls. *Building and Environment*, 43(7), 1232-1240. doi:10.1016/J.BUILDENV.2007.03.005
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkındaki yönetmelik (TDY 2007). Ankara, Türkiye: Resmî Gazete.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)*. Resmî Gazete (Sayı: 30364 – Mükerrer), 18 Mart 2018.
- Tellioglu, S. ve Satıcı, B. (2023). Tarihi Yapılarda Restorasyon Tekniklerine Göre Uygulanacak Malzemelerin Belirlenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 6(1), 37-49. doi:10.56809/ICUJTAS.1229473
- Thamboo, J. A. ve Dhanasekar, M. (2016). Behaviour of thin layer mortared concrete masonry under combined shear and compression. *Australian Journal of Structural Engineering*, 17(1), 39-52. doi:10.1080/13287982.2015.1116181
- Tripathy, D. ve Singhal, V. (2024). Experimental and analytical investigation of opening effects on the in-plane capacity of unreinforced masonry wall. *Engineering Structures*, 311, 118161. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118161
- TÜİK. (2024). Türkiye Nüfus Yoğunluğu ve Dağılışı Haritası 2023. *Coğrafya Harita*. 2 Aralık 2024 tarihinde <http://cografyaharita.com/haritalarim/4aturkiye2023-nufus-yogunlugu-ve-dagilisi-haritasi.png> adresinden erişildi.
- Türkçü, Ç. (1997). *Yapım, Mimarlar Odası İzmir Şubesi Yayınları*. İzmir.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2000). TS EN 1052-1: Yığma duvarlar – Deney metotları – Bölüm 1: Eksensel basınç dayanımının tayini için yöntem. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2016). TS 138: Çimento – Genel amaçlı çimentolar – Özellikler. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2010). TS 708: Beton agregaları – Özellikler. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2014). TS 500-2: Betonarme yapılar – Bölüm 2: Açıklamalar ve kılavuz bilgiler. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2014). TS EN 206: Beton – Özellikler, performans, üretim ve uygunluk. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2011). TS EN 998-2: Harçlar – Duvar harcı – Bölüm 2: Taşıyıcı duvar harcı için özellikler. Ankara: TSE.

- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2002). TS 197-1: Harçlar – Bölüm 1: Duvar örme ve sıva harçları – Tanım, sınıflandırma ve özellikler. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2015). TS EN 771-1: Duvar elemanları – Özellikler – Bölüm 1: Kil esaslı birim elemanlar. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2005). TS EN 1996-1-1: Eurocode 6 – Yığma yapıların tasarımı – Bölüm 1-1: Genel kurallar yapısal tasarım, dayanım ve stabilite kuralları. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2002). TS EN 1015-11: Yapı harçları – Deney yöntemleri – Bölüm 11: Sertleşmiş harç numunelerinde eğilme ve basınç dayanımının tayini. Ankara: TSE.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2011). *TS EN 772-1: Duvar elemanları – Mekanik, fiziksel ve geometrik özelliklerin belirlenmesi için deney metotları – Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini*. Ankara: TSE.
- Url-1. (2024). Baykara Tuğla/Yatay ve Düşey Delikli Tuğlalar. 15 Aralık 2024 tarihinde <http://www.baykaratugla.com.tr/baykara-tugla-urunler/> adresinden erişildi.
- Url-2. (2023). Sonsuz Şükran Köyü/Konya. 15 Aralık 2024 tarihinde https://www.yenikonya.com.tr/kultur_sanat/anadolu_nun_kultur_sanat_kalbi_sonsuz_sukran_koyu-1909669 adresinden erişildi.
- Url-3. (2022). Kırılda Müstakil Ev Yapımı 4. 15 Aralık 2024 tarihinde <https://www.youtube.com/watch?v=YDZF163H26k&t=56s> adresinden erişildi.
- Url-4. (2021). Hızlandırılmış inşaat videoları 2. 15 Aralık 2024 tarihinde <https://www.youtube.com/watch?v=ozmW8KMtjRA> adresinden erişildi.
- Xie, Q., Xu, D., Wang, Y., Zhang, L. ve Xin, R. (2021). Seismic Behavior of Brick Masonry Walls Representative of Ancient Chinese Pagoda Walls Subjected to In-plane Cyclic Loading. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(9), 1336-1348. doi:10.1080/15583058.2019.1674943
- Yetkin, M. (2024). 6 Şubat 2023 Depremleri İçin Kırılda Yığma Yapıların Performansları Üzerine Bir Saha Araştırması: Nurdağı/Gaziantep Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 821-837. doi:10.17780/KSUJES.1430177
- Yıldızoğlu, H., Can, Ö. ve Tayfur, B. (2018). Yığma Binalarda Deprem Performansının Belirlenmesi (Bayburt Korkut Ata Lisesi Örneği). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 372-380. doi:10.17714/GUMUSFENBIL.380259
- Gaz Beton Url. (2023). Ytong. 15 Aralık 2024 tarihinde <https://ytong.com.tr/tasiyici-duvar-paneli> adresinden erişildi.