

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI ANA BİLİM DALI**

**LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU
DUVARLARIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Eyüp Serhan GÜVEN

**Danışman
Prof. Dr. Ali DEMİR**

**İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Taha Yasin ALTIOK**

MANİSA-2025

**EYÜP
SERHAN
GÜVEN**

**LİF TAKYİYELİ KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU
DUVARLARIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurullara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını. Tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Eyüp Serhan GÜVEN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU DUVARLARIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Eyüp Serhan GÜVEN

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ali DEMİR

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Taha Yasin ALTIOK

Dolgu duvarlar genellikle taşıyıcı sistem tasarımına dahil edilmemekle birlikte, deprem performansı üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Bu çalışmada, tek açıklıklı çelik çerçeve içine örülen dört adet tam ölçekli tuğla duvar numunesi üzerinde tekrarlı tersinir yatay yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerden biri yalın tuğla (REF-2), biri geleneksel çimento esaslı sıvalı duvar (REF), diğer ikisi ise Basalt Fabric-Reinforced Cementitious Matrix- Bazalt Kumaş Donatılı Çimentolu Matris (B-FRCM) ile güçlendirilmiş ve farklı sıva tipleri (hidrolik kireç esaslı – FRCM-2, çimento esaslı – CBSM-FRCM) ile kaplanmıştır.

Deneysel bulgular, sıva tipi ve B-FRCM güçlendirmenin yapısal performans üzerinde kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. CBSM-FRCM numunesi, en yüksek yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji tüketimi değerlerine ulaşmış; itme ve çekme yönlerinde referans numunelere kıyasla katlanarak artan performans sergilemiştir. FRCM-2 numunesi ise en yüksek süneklik kapasitesine ulaşmış, böylece yüksek deformasyon kabiliyeti açısından öne çıkmıştır. Geleneksel sıvalı REF numunesi yalın REF-2'ye göre anlamlı bir iyileşme sağlamış olsa da kapasite ve deformasyon açısından güçlendirilmiş sistemlerin gerisinde kalmıştır.

Sonuç olarak, çimento esaslı sıvaların aderans ve dayanım özellikleri sayesinde taşıma kapasitesi ve enerji tüketiminde üstünlük sağladığı; hidrolik kireç esaslı sıvaların ise sünekliği artırarak deformasyon kapasitesini geliştirdiği belirlenmiştir.

Bu bulgular, deprem performansının artırılmasında hem sıva tipinin hem de B-FRCM güçlendirme uygulamalarının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: B-FRCM, Yapısal Güçlendirme, Dolgu Duvar, Deneysel Çalışma



ABSTRACT

Graduate Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFILL WALLS STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED COMPOSITES

Eyüp Serhan GÜVEN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ali DEMİR

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Taha Yasin ALTIOK

Infill walls are often excluded from structural design; however, they play a decisive role in the seismic performance of buildings. In this study, four full-scale brick masonry infill wall specimens constructed within a single-bay steel frame were tested under cyclic lateral loading. Among the specimens, one was bare brick (REF-2), another was a conventionally plastered wall with cement-based mortar (REF), while the remaining two were strengthened using Basalt Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (B-FRCM) and finished with different plaster types: lime-based plaster (FRCM-2) and cement-based repair mortar (CBSM-FRCM).

The experimental results demonstrated that both plaster type and B-FRCM strengthening significantly affect structural behavior. The CBSM-FRCM specimen exhibited the highest lateral load-bearing capacity, stiffness, and energy dissipation, with substantially enhanced performance in both push and pull directions compared to the reference specimens. In contrast, the FRCM-2 specimen achieved the highest ductility, highlighting its superior deformation capacity. The conventionally plastered REF specimen provided noticeable improvement over the bare REF-2 wall but remained inferior to the strengthened systems in terms of capacity and deformation.

Overall, cement-based plasters provided superior adhesion and compressive strength, thereby enhancing load transfer and energy dissipation, whereas lime-based plaster improved ductility and deformation capacity. These findings underline the critical

influence of plaster type and B-FRCM application in improving the seismic performance of masonry infill walls.

Keywords: B-FRCM, Structural Strengthening, Infill Wall, Experimental study



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında bilgi ve deneyimi ile bana destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali DEMİR'e ve Dr. Öğr. Üyesi Taha Yasin ALTIOK hocama, Tetraglobe yetkilisi Sayın Koray Aydın'a, her zaman desteğini esirgemeyen rahmetli babam, annem, eşim, çocuklarıma , yürekten teşekkür ederim.

Eyüp Serhan GÜVEN
Manisa, 2025



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\Delta_i^{(x)}$	Azaltılmış Göreli Kat Ötelemesi
δ_i	Göreli Kat Ötelemesi
λ	Elastik Tasarım Spektral İvme Oranı
h_i	Kat Yüksekliği
ABYYHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASCE	Amerikan Standartı
BA	Betonarme
B-FRCM	Bazalt Kumaş Takviyeli Çimentolu Matris
CBSM	Çimento Bazlı Kompozit Matrisler
CFRC	Carbon Fiber Reinforced Concrete
CRFP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
DAF	Doğu Anadolu Fay Hattı
DBYYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
ETABS	Extended Three-dimensional Analysis of Building Systems
Eurocode 8	Avrupa Birliği Deprem Yönetmeliği
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FC-REF	Esnek Derz Bağlantılı Yatay Delikli Tuğla Duvar
FC-WB	Esnek Derz Bağlantılı Alçıpan Bölme Duvar
FRP	Lif Takviyeli Polimer (Fiber-Reinforced Polymer)
FRCM+CBSM	FRCM + Çimento esaslı onarım harçlı sıva
FRCM-2	B-FRCM + Hidrolik kireç esaslı onarım harçlı sıva
I	Bina önem katsayısını, h_i kat yüksekliğini
IMG	Inorganic Matrix Grid (İnorganik Matris Izgara)
KAF	Kuzey Adadolu Fay Hattı
kN	KiloNewton
LVDT	Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör
mm	Milimetre
MPa	MegaPascal
Pmax	Maksimum Yük
R	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
RC	Reinforced Concrete
REF	Geleneksel harç sıvalı duvar numunesi
REF 2	Geleneksel Tuğla ile Örülmüş Yalın Duvar
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TRM	Textile Reinforced Mortar (Tekstil Takviyeli Harç)
UBC	Uniform Building Code 1997
UHPC	Ultra Yüksek Performanslı Matrisler
URM	Donatısız Yığma Duvar (Unreinforced Masonry)
WB-REF	Geleneksel Alçıpan Bölme Duvar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1 Türkiye Deprem Bölgesi Haritası (tdth.afad.gov.tr).....	11
Şekil 1. 2 Türkiye'nin yüzölçümü ve nüfusunun deprem bölgelerine dağılışı	12
Şekil 1. 3 Depreme karşı farklı dayanımlara sahip yapıların yük deplasman eğrisi ..	14
Şekil 1. 4 a) Gerçek çerçeve durumu, B) Yönetmeliğe göre hesap edilen çerçeve ...	17
Şekil 1. 5 Dolgu duvarların modellenmemesi, deprem enerjisinin taşıyıcı sistemde düzensiz dağılmasına ve yapı göçmesine neden olması	17
Şekil 1. 6 Dolgu duvarların dikkate alınmaması, yumuşak kat oluşumuna ve göçmeye yol açması	18
Şekil 1. 7 Kısa kolonlarda kesme kuvveti, normal kolonlara göre daha fazla olması	19
Şekil 1. 8 Kiriş ile duvar arasındaki boşluk, depremde yüksek kesme kuvvetine ve hasara neden olması	19
Şekil 1. 9 Deprem etkisiyle dolgu duvarlarda oluşan yapısal deformasyonlar	23
Şekil 1. 10 Dolgu duvarların taşıyıcı sistem üzerindeki katkıları	24
Şekil 1. 11 Yumuşak kat düzensizliği	25
Şekil 2. 1. Yapısal kullanılan çimentolu kompozitlere örnekler	30
Şekil 2. 2. Bazalt lif ağı örnekleri	30
Şekil 2. 3. Bazalt lif ağı ve çimento bazlı sıva harcının uygulaması	32
Şekil 2. 4. Çimento bazlı sıva harcı	33
Şekil 2. 5. Deney düzeneği	36
Şekil 2. 6. Reaksiyon duvarı	37
Şekil 2. 7. Yük hücresi	38
Şekil 2. 8. Deplasman ölçerler	39
Şekil 2. 9. Veri toplama cihazları	40
Şekil 2. 10. Tipik bir ölçüm düzeneği	41
Şekil 2. 11. Histeresis ve zarf eğrisinin çizdirilmesi	42
Şekil 2. 12. Sistem sünekliğinin belirlenmesi	43
Şekil 2. 13. Tüketilen enerji [43]	44
Şekil 2. 14. Toplam tüketilen enerji değerinin hesaplanması [43]	44
Şekil 2. 15. Yükleme Protokolü (FEMA 461)	45
Şekil 3. 1. REF-2 numunesi	48
Şekil 3. 2. REF-2 numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar	49
Şekil 3. 3. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)	50
Şekil 3. 4. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)	50
Şekil 3. 5. Sistem rijitlik azalım grafikleri	51
Şekil 3. 6. Enerji tüketim grafikleri	52
Şekil 3. 7. REF numunesi	53
Şekil 3. 8. REF numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar	54
Şekil 3. 9. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)	55
Şekil 3. 10. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)	55
Şekil 3. 11. Sistem rijitlik azalım grafikleri	56
Şekil 3. 12. Enerji tüketim grafikleri	57
Şekil 3. 13. FRCM-2 numunesi	58
Şekil 3. 14. FRCM-2 numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar	59
Şekil 3. 15. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)	60
Şekil 3. 16. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)	60
Şekil 3. 17. Sistem rijitlik azalım grafikleri	61

Şekil 3. 18. Enerji tüketim grafikler.....	62
Şekil 3. 19. CBSM-FRCM numunesi	63
Şekil 3. 20. CBSM-FRCM numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar	64
Şekil 3. 21. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)	65
Şekil 3. 22. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)	65
Şekil 3. 23. Sistem rijitlik azalım grafikleri	66
Şekil 3. 24. Enerji tüketim grafikleri.....	67
Şekil 3. 25. Numunelerin deneysel zarf eğrileri.....	70
Şekil 3. 26. Göreli kat öteleme oranlarında ortalama yatay yük değerleri.....	72
Şekil 3. 27. Süneklik değerlerinin karşılaştırılması	74
Şekil 3. 28. Rijitlik azalım eğrileri-1.....	76
Şekil 3. 29. Rijitlik azalım eğrileri-2.....	76
Şekil 3. 30. Kümülatif enerji tüketimleri	78
Şekil 3. 31. Akma ve göçme yüküne kadar kümülatif enerji tüketimleri.....	79
Şekil 3. 32. İtme ve çekme yönünde kümülatif enerji tüketimleri	80



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. 1 Türkiye’de meydana gelen önemli depremler	12
Tablo 2. 1. Bazalt Cam Elyaf Esaslı B-FRCM Ağının Teknik Özellikleri.....	31
Tablo 2. 2. Çimento Bazlı Güçlendirme Harcı	32
Tablo 2. 3. Hidrolik Kireç Esaslı Güçlendirme Harcı Basınç Dayanımı	33
Tablo 2. 4. Deneysel numuneler, değişkenleri ve detayları	35
Tablo 3. 1. Deneysel numune kısaltmaları ve açıklamaları	68
Tablo 3. 2. Numunelerinin deneysel maksimum yük ve deplasman değerleri	70
Tablo 3. 3. Göreli kat öteleme oranlarında ortalama yatay yük değerleri ve farklar .	72
Tablo 3. 4. Süneklik değerleri	74
Tablo 3. 5. Farklı göreli kat öteleme oranlarında ortalama rijitlik değerleri ve farklar	77
Tablo 3. 6. Başlangıç ve maksimum yükteki rijitlik değerleri	77
Tablo 3. 7. Farklı göreli kat öteleme oranlarında kümülatif enerji tüketimi ve farklar	78
Tablo 3. 8. Kümülatif tüketilen enerji değerleri ve oranları	79
Tablo 3. 9. İtme yönü kümülatif toplam tüketilen enerji değerleri ve enerji oranları	81
Tablo 3. 10. Çekme yönü kümülatif toplam tüketilen enerji ve enerji oranları	81

TAAHHÜTNAME.....	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT	VI
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XI
İÇİNDEKİLER.....	XII

İÇİNDEKİLER

GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş ve Literatür Taraması	1
1.2 Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi	8
1.3 Türkiye'nin Depremselliği ve Deprem Yönetmelikleri	9
1.4 Yapılarda Dolgu ve Bölme Duvarların Tanımı, Görevleri ve Yapısal Katkıları .	15
1.5 Dolgu Duvarların Yapı Tasarım Hesaplarına Etkisi	17
1.6 Depremlerde Dolgu Duvar Hasarları ve Eksikliğinin Sonuçları.....	21
1.7 Dolgu Duvarların Taşıyıcı Sistem Davranışına Katkıları	24
2.1 MATERYAL	28
2.1.1 Çimento Esaslı İnce Kompozitler	28
2.1.2 Çimento Bazlı Kompozit Malzeme.....	31
2.1.3 Tuğla	33
2.1.4 Hidrolik Kireç Esaslı Güçlendirme Harcı	33
2.2 YÖNTEM.....	34
2.2.1 Deneysel Numunelerin Özellikleri.....	34
2.2.2 Deneysel Numunelerin Detayları ve Üretimleri	35
2.3 Deney Düzeneği, Ölçüm Tekniği, Ölçümlerin Değerlendirilmesi.....	36
2.3.1 Deney Düzeneği.....	37
2.3.2 Ölçüm Tekniği	38
2.3.3 Yük Ölçümleri.....	38
2.3.4 Yer Değiştirmelerin Ölçülmesi	39
2.3.5 Yük ve Yer Değiştirme Ölçümlerinin Bilgisayar Ortamına Aktarılması.....	39
2.3.6 Ölçüm Düzeneği.....	40
2.3.7 Ölçümlerin Değerlendirilmesi.....	41

2.3.8 Zarf Eğrisi ve Histeresis Eğrileri.....	41
2.3.9 Sistem Süneklik Grafikleri.....	42
2.3.10 Rijitlik Azalım Grafikleri.....	43
2.3.11 Tüketilen Enerji Grafikleri.....	43
2.3.12 Yükleme Protokolünün Belirlenmesi.....	44
3.DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI.....	46
3.1. Deney Sonuçları.....	47
3.1.1. REF-2 (Yalın duvar numunesi).....	47
3.1.2. REF (Geleneksel harç sıvalı duvar numunesi).....	52
3.1.3. FRCM-2 (FRCM + Hidrolik kireç esaslı onarım harçlı sıva).....	57
3.1.4. CBSM-FRCM (B-FRCM + Çimento esaslı onarım harçlı sıva).....	62
3.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	67
3.2.1. Yatay Yük Taşıma Kapasitesi.....	68
3.2.2. Süneklik	72
3.2.3. Rijitlik	74
3.2.4 Enerji Tüketim Kapasitesi.....	77
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	85

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş ve Literatür Taraması

Betonarme yapılar, sağladıkları birçok avantajlar nedeniyle dünyada en çok tercih edilen yapı sınıfındandır. Gerek imalat kolaylığı gerekse ekonomik avantajları nedeniyle ülkemizde tercih edilen yapı türündendir.

Dünyada son yıllarda yaşanan depremler sebebiyle, depreme dayanıklı olmayan yapıların daha ekonomik bir şekilde depreme dayanıklı hale getirebilmek için çeşitli güçlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Yapıları depreme uygun hale getirmek için yapılacak güçlendirme işlemi ekonomik olmasının yanında daha hızlı yapılması ve daha kolay uygunluğu sebebiyle tercih edilir hale gelmiştir. Depremlerin neden olduğu can ve mal kayıplarını azaltmak ve yapıların performansını artırmak amacıyla B-FRCM (Basalt Fiber Reinforced Cementitious Matrix- Bazalt Kumaş Takviyeli Çimentolu Matris) malzemesi geliştirilerek yapıların güçlendirme işlemi için kullanılmaktadır.

B-FRCM (Basalt Fiber Reinforced Cementitious Matrix- Bazalt Kumaş Takviyeli Çimentolu Matris) malzemesi, çimento esaslı bir bağlayıcı içinde yüksek mukavemetli fiber tekstillerin (bazalt lifleri) kullanılmasıyla oluşturulan bir kompozit güçlendirme malzemesidir. B-FRCM malzemesi hafif ve yüksek mukavemetlidir. Yangına karşı dayanıklıdır.

Bu çalışmada; B-FRCM (Basalt Fiber Reinforced Cementitious Matrix- Bazalt Kumaş Takviyeli Çimentolu Matris) malzemesini dolgu duvar üzerinde güçlendirme elemanı olarak kullanarak numunelerin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi kıyaslanmıştır. Bu kapsamda 4 adet 1:1 ölçekli, delikli kil tuğladan yapılmış duvar numuneleri hazırlanmış ve farklı parametreler kapsamında güçlendirilmiştir.

Bunun sonucunda güçlendirilmeden yapılan referans numuneler ile B-FRCM malzemelerle güçlendirilen numunelerin karşılaştırılmasında bölme duvarlı çelik çerçeve sistemin deprem performansının ne derece artırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan tez çalışmasında dolgu duvarların çeşitli malzemeler güçlendirilerek deprem etkilerine karşı yarı statik yükler altında davranışı incelenmiştir. Bu amaçla

4 adet yığma duvar numunesi oluşturularak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Literatürde yığma duvarların çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesine ait çalışmaların sonuçları elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Literatürde konu kapsamındaki mevcut çalışmalar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Ehsani vd., (1997), Tuğla duvarların kesme dayanımını artırmak amacıyla dış yüzeylere epoksi ile yapıştırılmış lif takviyeli polimer (FRP) kaplamalar uygulanmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde değişkenler olarak kompozit kumaşın dayanımı, lif yönelimi ve ankraj uzunluğu ele alınmıştır. Numuneler statik yükleme altında test edilmiştir. Sonuçlar, bu tekniğin hem dayanımı hem de sünekliği önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Liflerin yükleme düzlemine göre açısız yönelimi, güçlendirilmiş sistemin rijitliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olmasına rağmen nihai dayanımı önemli ölçüde etkilememiştir.[1]

Kolsch (1998), Güçlendirilmiş beton kirişler ve eğilme yüküne maruz kalan yığma duvarlar üzerinde bir dizi deney yapmışlardır. Deprem nedeniyle eğilme yüküne maruz kalan mevcut binalar ve özellikle dolgu duvarlar için bir güçlendirme yöntemi ele alınmıştır. Yöntemin temel fikri, yapısal elemanların yüzeylerine ek kaplamalar uygulayarak harici takviye sağlamaktır. Bu kaplamalar, çimento esaslı bir matris içine gömülmüş karbon kumaşlardan oluşan tekstil malzemelerinden meydana gelmektedir. Yoğun kumaşların çimento esaslı matrisle birlikte kullanılması, bu kompozit kaplamaları diğer yöntemlerden ayıran önemli bir özelliktir. Güçlendirilmiş beton kirişler ve eğilme yüküne maruz kalan yığma duvarlar üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Test edilen elemanların taşıma kapasitesinde önemli bir artış sağlanmıştır.[2]

Hamid vd., (2005) Kompozit laminantlarla güçlendirilmiş takviyesiz (URM) duvarların davranışını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. İlk test aşaması, duvarlarda mevcut farklı stres koşulları altında 24 URM düzeneğinin test edilmesini içermektedir. Testler, yatak derzlerine dik ve paralel basınçta yüklenen prizmalar, diyagonal çekme numuneleri ve derz kesmesi altında yüklenen numuneleri içermektedir. İkinci test aşamasında, beş adet duvar dolgu çelik çerçeve güçlendirme ile ve güçlendirme olmadan test edilmiştir. Kompozit

laminantlar, duvarların stabilize ederek ve düzlem dışı hasarları önleyerek rijitliği ve mukavemeti artırdı ve tepe sonrası davranışı geliştirdi. Bu makalede raporlanan testler, kompozit laminantların URM'nin deformasyon kapasitesini iyileştirmede, tehlikeli URM hasarını sınırlamada, felaket düzeyindeki arızayı önlemede ve önemli yapısal hasardan sonra bile duvar bütünlüğünü korumada verimliliğini göstermektedir.[3]

Yuksel vd., (2006), tek açıklıklı ve iki katlı betonarme sistemlerde dolgu duvar varlığı ve dolgu duvar üzerine karbon lif takviyeli polimer (CFRP) güçlendirme uygulamasını deneysel olarak incelemişlerdir. Dolgu duvarın yalnız çerçeveye göre yük taşıma kapasitesini dört kat artırdığını, CFRP'nin ise güçlendirilmemiş dolgu duvara göre kapasiteyi %30 oranında artırdığını belirtmiştir.[4]

Prota vd., (2006), açıklığı olan tam ölçekli takviyesiz duvar (URM) düzlem içi yanal yükleme altında test etmiştir. Duvar ilk olarak orta düzeyde bir hasar seviyesine ulaşılan kadar monotonik olarak artan yer değiştirmelere tabi tutulmuştur. Hasarlı numune daha sonra monotonik test sırasında elde edilen maksimum kaymaya yakın bir değere kadar döngüsel olarak test edildiği ve önceki hasarın doğrusal olmayan tepkisi üzerindeki etkileri araştırıldığı belirtilmiştir. Son olarak, duvar inorganik matris-ızgara (IMG) kompozitleriyle onarıldı ve neredeyse çökme durumuna kadar döngüsel yer değiştirme kontrollü bir teste tabi tutuldu. Gözlemlenen hasarın çoğu hem yanal direnci hem de mukavemet düşüşünü etkileyen spandrel panelinde gelişti. İskelelerin sallanması, düşük kalıntı yer değiştirmeler ve yeniden merkezleme davranışı ile karakterize edilen yanal sertliği ve histerik tepkiyi yönetti. Deneysel kuvvet-yer değiştirme eğrileri arasındaki karşılaştırma, IMG güçlendirme sisteminin spandrel paneline enerji dağıtma kapasitesi sağlayabildiğini, inşa edilmiş duvarın yük taşıma kapasitesini geri kazandığını ve daha büyük yer değiştirmelerde gerçekten gözlemlenen mukavemet düşüşünü geciktirdiğini göstermiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin çift doğrusal idealizasyonları, test edilen duvar sistemlerinin yer değiştirme sünekliğinin, genel aşırı mukavemetinin ve mukavemet azaltma faktörünün tanımlanmasına olanak sağlamıştır.[5]

ElGawady vd., (2007), yedi adet yarım ölçekli duvar örneğinin, fiber takviyeli polimer FRP kullanılarak güçlendirmeden önce ve sonra davranışı araştırmıştır. 20. yüzyılın ortalarında Orta Avrupa'da inşa edilen duvarları simüle etmek için yarım ölçekli içi boş kil duvar birimleri ve zayıf harç kullanılarak dört duvar inşa edilmiştir. Üç duvar önce güçlendirilmemiş duvar duvarları olarak test edilmiştir; ardından, sismik olarak hasar görmüş örnekler FRP'ler kullanılarak güçlendirilmiştir. Dördüncü duvar, FRP kullanılarak inşa edildikten sonra doğrudan yükseltilmiştir. Her örnek, tek bir tarafın tüm yüzeyine güçlendirilmiştir. Tüm örnekler sabit yerçekimi yükü ve kademeli olarak artan düzlem içi yükleme döngüleri altında test edilmiştir. Test edilen örnekler, 0,5 ve 0,7 olmak üzere iki etkili moment/kesme oranına sahipti. Temel parametre, FRP takviye oranının elastisite modülü ile çarpımı olarak tanımlanan FRP eksenel rijitliği miktarıydı. Tek taraflı iyileştirme/yükseltme, test numunelerinin yanal mukavemetini, sertliğini ve enerji dağılımını önemli ölçüde iyileştirdi. Yanal mukavemetteki artış, FRP eksenel rijitlik miktarıyla orantılıydı. Ancak, yüksek miktarda FRP eksenel rijitlik kullanımı çok kırılğan bir arızaya yol açtı. Son olarak, basit mevcut analitik modeller, test numunelerinin nihai yanal mukavemetlerini makul derecede iyi tahmin etti.[6]

Lignola vd., (2009), CFRC ile güçlendirilen yığma duvarlar üzerinde bir dizi deney yapmıştır. CFRC ile güçlendirdiği yığma duvarların çökme yükünde %90 oranında artış sağladığını bildirmiştir. [7]

Özkaynak (2010), CFRP kullanılarak güçlendirilen dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin, düzlem içi yatay yükler altında sismik performansı hem deneysel hem de teorik olarak araştırmıştır. Türkiye betonarme yapı stoğuna uygun olarak tasarlanmış 1/3 ölçekli, tek açıklıklı ve tek katlı 22 numune, statik ve benzeşimli dinamik testlere tabi tutulmuştur. Deney numuneleri, yalın çerçeveler, dolgu duvarı bulunan çerçeveler ve CFRP takviyeli dolgu duvarlı çerçeveler olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, en uygun CFRP uygulama detaylarını belirlemek amacıyla altı numune statik yüklemeye tabi tutulmuştur. İkinci aşamada ise 16 numune, farklı yatay yükleme protokolleri ve iki ayrı atalet kütlelerini temsil eden benzeşik dinamik yüklemeler altında test edilmiştir. Yalın ve CFRP ile güçlendirilmiş çerçevelerin davranışı rijitlik, dayanım, süneklik, enerji tüketimi, yapısal sönüm ve hasar birikimi gibi performans ölçütleri açısından değerlendirilmiş; deney sonuçları FEMA 356 performans kriterlerine göre analiz edilmiştir. Elde

edilen sonuçlar, CFRP ile güçlendirilen dolgu duvarların rijitlik, dayanım ve enerji tüketimi bakımından yalın sistemlere kıyasla anlamlı iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. Statik ve dinamik deneylerden elde edilen taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirmesi verilerinin birbirini desteklediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, deneysel verilere paralel olarak geliştirilen teorik kapasite eğrileri ve itme analizleri, benzeşik dinamik deneylerle yüksek düzeyde uyum göstermiştir. Çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar için bir davranış modeli önerilmiş; bu model, deprem güvenliği yetersiz bir betonarme yapının güçlendirilmesi senaryosunda uygulanarak yapı performansının iyileştirildiği gösterilmiştir.[8]

Arslan ve Celebi (2019), özel bir fiber güçlendirme sisteminin uygulanmasından önce ve sonra gaz beton blok yığma duvarların deneysel olarak döngüsel davranışını incelemişlerdir. İncelenen güçlendirme sistemi, deprem koruması sağlamak amacıyla alkaliye dayanıklı cam-polipropilen liflerden oluşan çok eksenli hibrit kumaş ve doğal hidrolik kireç içeren beyaz çimento bazlı sıva harcından oluşmaktadır. Sismik güçlendirme tekstiline yapışma etkisini değerlendirmek amacıyla farklı malzeme içeriğine sahip başka bir harç türü de test edilmiştir. Bu çalışmanın deneysel sonuçları, tüm test numuneleri için kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuç olarak, özellikle genişletilmiş cam granüllü sıva ile çift taraflı güçlendirme uygulamalarında, sismik tekstil uygulanmasıyla dayanım ve süneklik kapasitesinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür.[9]

Ökten (2013), her biri 1/3 ölçekli olmak üzere toplam sekiz tane bir katlı ve bir açıklıklı içinde dolgu duvarlı betonarme çerçeve üretilmiş ve çeşitli şekillerde CFRP kompozitlerle güçlendirilerek iki yönlü tekrarlayan yatay yükler etkisi altında test etmiştir. Numunelerden ikisi, biri yalın çerçeve diğeri dolgu duvarlı çerçeve olmak üzere referans grubu olarak değerlendirilmiştir. Tüm çerçeveler, zayıf kolon-güçlü kiriş yaklaşımıyla ve düşük dayanımlı beton kullanılarak, uygulamadaki zayıf yapılar dikkate alınarak tasarlanmıştır. Testler sonucunda CFRP ile güçlendirilmiş çerçevelerin, hem yatay doğrultuda yük taşıma kapasitesi hem de enerjilerini tüketme performansı açısından referans numunelere göre belirgin üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş numunelerde oluşan hasarların daha sınırlı

olduğu, sünekliğin arttığı ve yük taşıma kapasitesinin daha uzun süre korunabildiği tespit edilmiştir.[10]

Onar (2007), model tuğla duvarların CFRP malzemesi ile güçlendirilmesine yönelik bir dizi deneysel çalışma yapmıştır. Her biri 12 numunedan oluşan üç ayrı seri hazırlanmış ve toplamda 36 adet duvar örülmüştür. Her serideki ilk 6 numune, güçlendirme uygulanmadan önce hasara uğratılmış ve epoksi esaslı malzeme ile onarılmıştır. Diğer 6 numune ise hasarsız olarak güçlendirilmiştir.

Her seride farklı CFRP uygulama şekilleri kullanılmıştır:

- Seri 1: Çekme ve basınç yönlerinde 2,5 cm genişliğinde CFRP şeritler,
- Seri 2: 0,5 cm ve 1,5 cm genişliğinde, 1 cm aralıklı dağınık şeritler,
- Seri 3: Kuvvetli eksenli çekme yönüne paralel olacak şekilde dokuma CFRP uygulanmıştır.

CFRP'lerin tuğla yüzeyine aderansı epoksi esaslı yapıştırıcı ile sağlanmıştır. Duvarlar, düşey sabit yükleri ve yatay deprem etkisini temsil eden birleşik tek eksenli basınç-yatay yük altında test edilmiştir. Her numunede kırılma yükleri, çatlak ve kırılma modları, yer değiştirme ölçümleri ve yük-deformasyon eğrileri kaydedilmiştir. Deneysel bulgulara göre, dokuma CFRP ile yapılan güçlendirme en yüksek taşıma kapasitesini sağlamış, şerit (lamine) CFRP uygulamaları da önemli dayanım artışları göstermiştir. Ayrıca, CFRP uygulanan duvarlarda yer değiştirme kapasitesinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir.[11]

Samuel (2016), lif takviyeli polimerler kullanılarak duvarcılıkta güçlendirme tekniklerinin gözden geçirilmesi yığma yapıların performansını artıracak güçlendirme tekniklerini geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. FRP malzemelerin hafifliğini, dayanıklılığını sahip olduğunu belirtmiştir. FRP malzemelerin kullanılarak güçlendirilen yığma yapıların eğilme ve kesme mukavemetini ve sünekliğini arttırdığını tespit etmiştir.[12]

Korany and Drysdale (2006), takviye malzemesi olarak karbon fiber halat kullanarak URM duvarlarının düzlem dışı bükülme direncini arttırmak için FRP rehabilitasyon tekniğinin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu teknikte, örgülü karbon fiber halat, tuğla üniteleri arasındaki derzlerden dikey

olarak kesilen oluklara yerleştirilmeden önce bir epoksi bileşiği ile kaplandı. Oluklar basınçlı hava ile temizlendikten sonra epoksi astar uygulandı ve FRP takviyesi yapıldı. Takviyeyi yerleştirdikten sonra, FRP halatını tamamen sarmak için başka bir epoksi yapıştırıcı tabakası uygulandı. Mevcut cepheyi korumak için dışarıdan mevcut harca benzer renk ve özellikte yeniden işaretleme harcı uygulandı. Yeniden işaretleme sonrasında duvara tam ters çevrimsel yükleme uygulandı. Bu incelemenin ilgili sonuçları şunlardır; FRP takviyeli duvarlar, takviyesiz numuneye göre kapasite, deformasyon ve enerji tüketiminde önemli bir artış gösterdi ve FRP takviyeli duvarlar için tekrarlı yükleme altında önemli bir mukavemet bozulması gözlemlenmedi.[13]

Martins vd., (2015), dolgu duvarların düzlem dışı davranışını iyileştirmek amacıyla tekstil takviyeli harç (TRM) ile güçlendirme uygulamalarını deneysel olarak yapmışlardır. Cam elyafın süneklik, karbon fiberin ise yatay yük taşıma kapasitesinde etkili olduğunu tespit etmiştir.[14]

Deng vd., (2019), kaynaklı tel ve imento esaslı kompozit ile güçlendirilmiş duvar numuneleri üzerinde sarsma tablası deneyi yapmışlardır. Çimento takviyeli kompozitin yüksek sismik dayanım sergilediğini gözlemlemiştir. [15]

Bernat-Maso vd., (2014), yığma duvarların tekstil takviyeli ve püskürtme betonlu harçla güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Dayanım ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığını gözlemlemiştir.[16]

Reboul vd., (2018), TRC ve FRP ile güçlendirilmiş duvarların tekrarlı yükler altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. TRC'nin erken çatlak oluşumu sergilemesine rağmen sünek davranışta etkili olduğunu rapor etmiştir. [17]

Kouris ve Triantafillou (2018), TRM'nin FRP'ye kıyaslayan çalışmalar yapmışlardır. Çimento matris yapısı nedeniyle daha düşük maliyetli, geçirgen ve dayanıklı olduğunu belirtmiştir. [18]

Mustafaraj ve Yardim (2019), polipropilen takviyeli harç, galvanizli elik hasır ve CFRP uygulamalarını deneysel olarak incelemişlerdir. Tümünde dayanıklılık ve mukavemet artırıcı etkiler elde etmiştir.[19]

Yacila vd., (2019), hasarlı tuğla duvarların elik ızgaralarla güçlendirerek bir takım deneyler yapmışlardır. şekil değiştirme ve enerji sönümleme kapasitelerinin önemli ölçüde arttığını bulgulamıştır. [20]

1.2 Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi

Türkiye, deprem riski yüksek bölgelerden biri olarak, yapı sistemlerinde güvenliği ön planda tutmayı gerektiren bir konuma sahiptir. Depremler sırasında en fazla hasarı alan yapısal elemanlardan biri olan bölme duvarlar, taşıyıcı sistemlerde rijitlik ve dayanım özellikleri çoğunlukla göz ardı edilen, ancak hacim olarak önemli bir yer kaplayan elemanlardır. Bölme duvarlar, duvar birimi ve harç biriminden oluşan kompozit yapılar olarak, deprem anında hem düzlem içi hem de düzlem dışı etkilerden zarar görmektedir. Yapısal hesaplamalarda rijitlik ve süneklik gibi özellikleri ihmal edilmekte, yalnızca ek yük olarak değerlendirilmektedir. Bu ihmal, yapının doğal periyodunun yanlış hesaplanmasına ve dolayısıyla yapı tasarımının yanlış deprem kuvvetleri altında yapılmasına yol açmaktadır.

Yapılan araştırmalar, bölme duvarların deprem anında rijitlik ve dayanım üzerinde önemli bir rol oynadığını, hasar aldıktan sonra duvar birimleri arasındaki sürtünme yoluyla deprem enerjisinin sönümlendiğini göstermiştir [21]. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında sahada birçok kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda az hasar alan yapıların neredeyse tamamının bölme duvarlarının ciddi düzeyde zarar gördüğü ve çoğu duvarın göçtüğü gözlemlenmiştir. Bu durum hem malzeme kaybına hem de ağır yaralanma ve can kayıplarına neden olmuş; bu yıkımların toplumsal psikoloji üzerinde derin etkileri bulunmuştur. Özellikle, duvarların hasar görmesi sonrası, yapıların genel güvenliği konusunda büyük bir endişe oluşmuştur.

Bu çalışma, yapısal sistemin en geniş hacmini kapsayan bölme duvarlarda kullanılacak, tahliye gerektirmeyen, hızlı uygulanabilir, düşük maliyetli bir güçlendirme yöntemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Güçlendirme uygulamalarında, Bazalt Kumaş Takviyeli Çimentolu Matris (B-FRCM) malzemesi tercih edilmiştir. B-FRCM, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek çekme mukavemeti, uygulama kolaylığı ve hafiflik özellikleriyle öne çıkmakta olup, yapısal güçlendirme alanında etkili bir çözüm sunmaktadır. İki bileşenden oluşan bu malzeme, çimentolu matris ve matrise gömülü tekstil liflerinden oluşur ve çeşitli kaplama malzemeleriyle kolayca uygulanabilmektedir (horasan harcı, hidrolik kireç esaslı onarım harçları gibi).

Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarla, B-FRCM güçlendirme yönteminin uygulamada geniş yer bulacağı düşünülmektedir. Bu tür malzemelerin genellikle kolon, kiriş ve perde gibi taşıyıcı elemanlarda kullanıldığı bilinmekte olup, duvarlar üzerinde kullanılması özgünlük değerleri arasındadır. Hidrolik kireç esaslı harçlar ve horasan harcı ile tarihi yapıların güçlendirilmesinde de kullanılması hedeflenmektedir. Bölme duvarların rijitlik, dayanım, süneklik ve enerji sönümleme kapasiteleri bu yöntemle artırılarak, görelî kat öteleme oranlarının düşmesi sağlanacak; yumuşak kat ve zayıf kat gibi yapısal göçmelere neden olan hasar tiplerinin oluşumu engellenecektir. B-FRCM malzemesi, genellikle hidrolik kireç esaslı onarım harçları ve geleneksel sıva ile yüzeye uygulanmakta olup, bağlayıcı malzemenin özellikleri yöntemin etkinliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Böylece, konut tipi yapılar, kamu binaları ve sanayi yapılarında uygulanabilecek olan bu yöntem, tahliye gerektirmeyecek ve ek maliyetler oluşmadan, yapıların mevcut kullanımlarına kesintisiz olarak devam etmesine imkân tanıyacaktır.

1.3 Türkiye'nin Depremselliği ve Deprem Yönetmelikleri

Türkiye, Alp-Himalaya kuşağında konumlanması sebebiyle, dünyanın en yüksek sismik tehlike barındıran alanlarından birinde bulunmaktadır. Ülke yüzölçümünün %92'si ve nüfusun %95'i deprem tehlikesi altındadır. 20. yüzyılda meydana gelen depremler sonucunda 100 bini aşkın vatandaş hayatını kaybetmiş, milyonlarca yapı yıkılmış veya ağır hasar görmüştür [22].

Ülkemizde depremlere bağlı kayıplar yalnızca can ve mal kaybı ile sınırlı kalmayıp, psikolojik, sosyolojik ve ekonomik etkilerle toplum üzerinde uzun süreli travmalar bırakmaktadır. 1999 Marmara ve Düzce depremleri ile Türkiye, yapı güvenliği konusunda ciddi bir farkındalığa ulaşmış; ancak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, yapısal sistemlerde hâlen ciddi zafiyetler olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur.

Yapılan jeolojik çalışmalar ve Türkiye Diri Fay Haritasına göre, ülkemiz büyük bir kısmında sismik açıdan aktif durumda bulunan 485 adet fay hattı bulunmaktadır. [23]. Bunlardan en önemlileri Doğu Anadolu Fayı (DAF) ve Kuzey

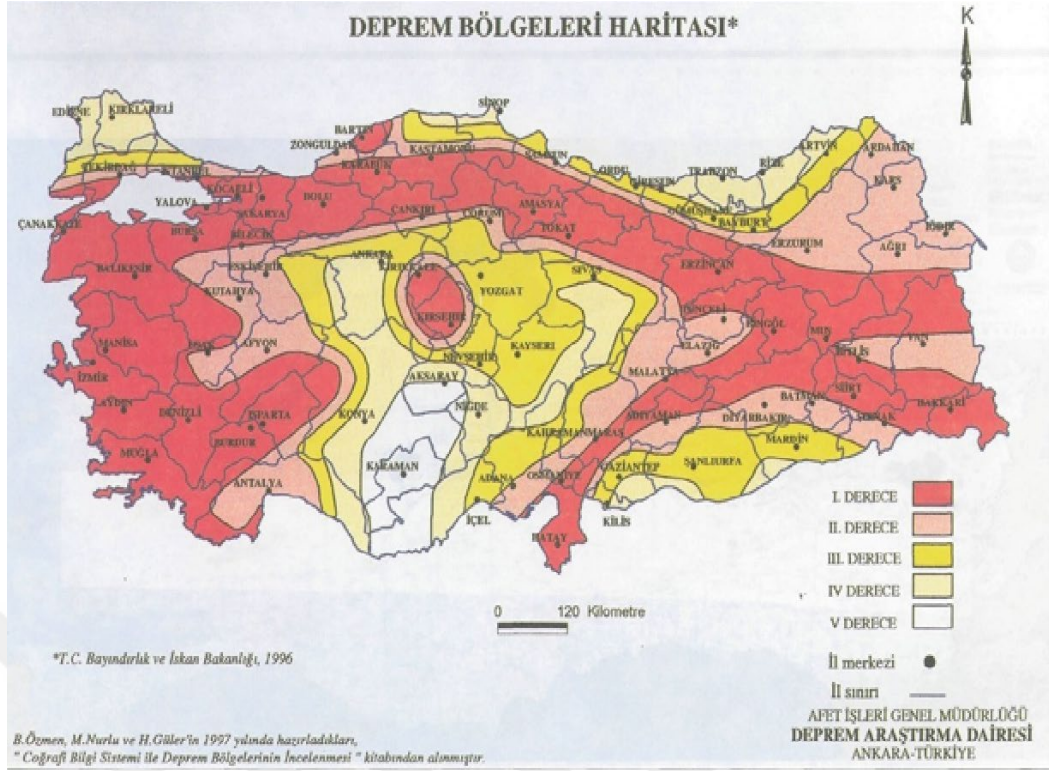
Anadolu Fayı (KAF) olup, bu fay hattı sistemleri üzerinde meydana gelen depremler tarih boyunca en yıkıcı sonuçları doğurmuştur. KAF yaklaşık 1350 km, DAF ise yaklaşık 580 km uzunluğunda olup, bu faylar boyunca oluşan deformasyon, yılda ortalama 13–27 mm’lik levha hareketleriyle Anadolu Levhasını batıya doğru itmektedir. Bu hareket, Batı Anadolu’da graben ve horst yapılarıyla kendini göstermekte, bölgeyi karmaşık bir tektonik yapıya dönüştürmektedir.

Son yüzyılda ülkemizde meydana gelen başlıca önemli depremler Tablo 1.2’de yer almakta olup, bu depremler sonucu on binlerce insan hayatını kaybetmiş ve büyük ölçekte yapılar çökmüştür. Bu yıkımlar, yapı sistemlerinde tasarım ve uygulama hatalarının ne denli kritik sonuçlar doğurabileceğini kanıtlamıştır.

Türkiye’de yapı tasarımı ve güçlendirme uygulamaları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [24] (TBDY-2018) çerçevesinde yürütülmektedir. Bu yönetmelik, yapısal sistemlerin yatay yük taşıma kapasitesi, sünek davranışı ve enerji sönmeme potansiyelini dikkate alarak yapı güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Ancak uygulamada pek çok binada yönetmelik hükümlerinin ya tam olarak uygulanmadığı ya da yapı denetim süreçlerinin yetersiz kaldığı görülmektedir.

Yapılarda gözlemlenen başlıca yapım hataları arasında; donatı detaylandırma eksiklikleri, yetersiz kolon-kiriş birleşim bölgeleri, niteliksiz beton kullanımı, simetri ve rijitlik dikkate alınmadan planlama, yumuşak kat ve kısa kolon oluşumları, düzensiz dolgu duvar yerleşimi gibi faktörler yer almaktadır. Bu yapısal zafiyetler, deprem sırasında göçme riskini ciddi oranda artırmaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 1.1’ de görüldüğü gibi Türkiye’nin jeolojik yapısı, diri faylarının yoğunluğu ve geçmiş depremlerden elde edilen veriler, yapı güvenliğini önceleyen bilimsel ve teknik çözümlere olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bölme duvarlar gibi sıklıkla göz ardı edilen yapısal olmayan elemanların güçlendirilmesi ve yönetmeliklerin bu doğrultuda geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

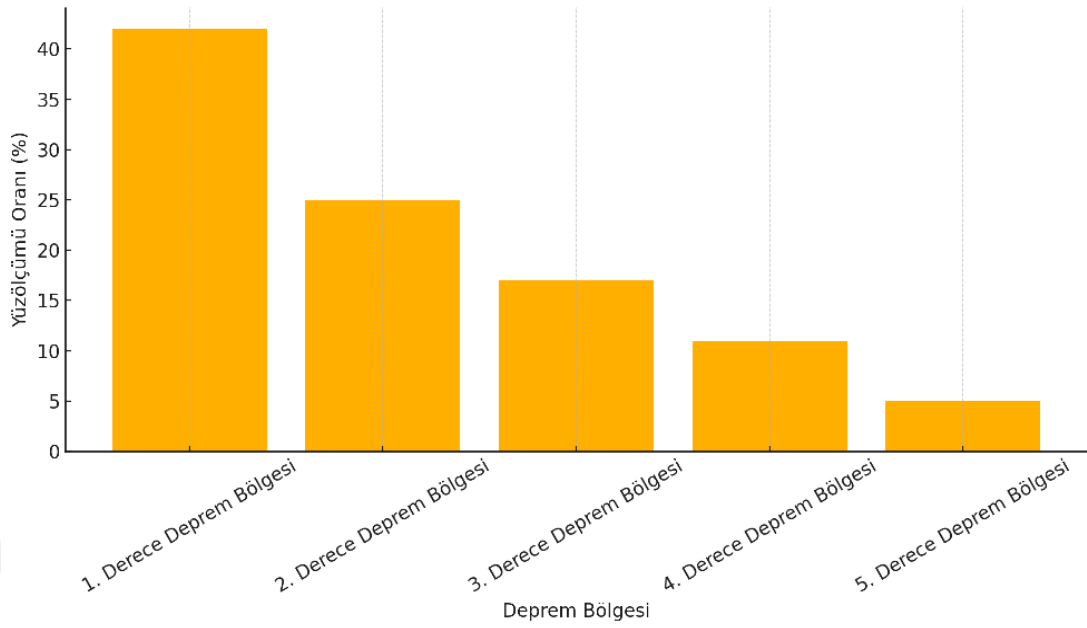


Şekil 1. 1 Türkiye Deprem Bölgesi Haritası (tdth.afad.gov.tr)
(Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 1996). [25]

Yapılar, ekonomik ömürleri boyunca yalnızca sabit ve hareketli yükler değil; aynı zamanda deprem, sel, yangın, rüzgâr ve heyelan gibi çeşitli iç ve dış çevresel etkiler altında kalmaktadır. Türkiye'nin aktif tektonik yapısı nedeniyle deprem tehlikesine karşı duyarlılığı oldukça yüksektir. Bu amaç doğrultusunda, ülke çapında sismik risklerin belirlenmesi için deprem bölgeleri haritaları oluşturulmuş ve Türkiye beş ayrı deprem bölgesine bölünmüştür.

Şekil 1.2' de görüldüğü gibi, birinci derece deprem bölgesi, doğrudan fay kuşaklarını içeren alanları kapsamakta olup 328.995 km² ile Türkiye yüzölçümünün yaklaşık %42'sini oluşturmaktadır. Bunu çevreleyen ikinci derece bölge 186.411 km² (%24), üçüncü derece bölge ise %18'lik pay ile özellikle İç Anadolu'nun güneyi, Kırklareli, Sinop, Doğu Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu'nun güney kesimlerini kapsamaktadır. Böylece, Şekil 1.1' de görüldüğü gibi ilk üç deprem bölgesinde yer alan alanlar, Türkiye'nin toplam yüzölçümünün yaklaşık %84'ünü oluşturmaktadır. Deprem tehlikesinin görece düşük olduğu dördüncü ve beşinci derece bölgelerin kapladığı alan ise sırasıyla %12 ve %4'tür.

Şekil 1. 2 Türkiye'nin yüzölçümü ve nüfusunun deprem bölgelerine dağılışı



Tablo 1. 1 Türkiye’de meydana gelen önemli depremler [26]

Tarih	Yer	MAG(MS)	Can Kaybı	Hasarlı Bina
07.05.1930	Türkiye-İran Sınırı	7.2	2.514	-
27.12.1939	Erzincan	7.9	32.968	116.720
20.12.1942	Tokat- Erbaa	7.0	3.000	32.000
27.11.1943	Samsun-Lâdik	7.2	4.000	40.000
01.02.1944	Bolu-Gerede	7.2	3.959	20.865
19.08.1966	Muş-Varto	6.9	2.396	20.007
28.03.1970	Kütahya-Gediz	7.2	1.086	19.291
06.09.1975	Diyarbakır-Lice	6.6	2.385	8.149
24.11.1976	Van-Muradiye	7.5	3.840	9.232
30.10.1983	Erzurum-Kars	6.9	1.155	3.241
17.08.1999	Kocaeli-Gölcük	7.8	17.480	73.342
06.02.2023	Kahramanmaraş-Elbistan ve Pazarcık	7.7-7.6	44.374	240.000

Türkiye’de mevcut yapı stokunun önemli bir kısmı, 1997 yılında yayınlanan ve yürürlüğe giren *Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik* [27] öncesinde inşa edilmiş olup, herhangi bir mühendislik hizmeti veya deprem yönetmeliğine dayalı proje sürecinden geçmemiştir. Depremlerin önceden tahmin edilememesi ve ülkenin yüksek sismik riski göz önüne alındığında, yalnızca yeni yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması yeterli değildir; mevcut yapıların da taşıyıcı sistem performanslarının artırılması zorunlu hale gelmiştir. Bu bağlamda,

yapıların tasarım, inşa ve kullanım süreçlerinde deprem güvenliği temel bir tasarım kriteri olarak ele alınmalıdır. Ülkemizde son yüzyılda meydana gelen önemli depremler Tablo 1.1’ de gösterilmektedir.

Yürürlükteki deprem yönetmeliklerinin temel amacı, olası en büyük depremler karşısında yapıların göçmesini engelleyerek can güvenliğini sağlamaktır. Ancak, mevcut yapı stoğunun büyük bölümünün bu standartlara uygun olmaması, tüm yapıların yeniden inşasını hem ekonomik hem de pratik açıdan sürdürülemez kılmaktadır. Bu nedenle, yapıların deprem güvenliğini artırmak amacıyla, ilgili yönetmeliklerde belirtilen taşıma kapasitesi sınırlarını karşılayacak biçimde onarım ve güçlendirme çalışmaları yapılması gereklidir. Bu tür müdahaleler, yapıların performans seviyelerini iyileştirerek hem yapısal güvenliği artırmakta hem de ekonomik kaynakların etkin kullanımını sağlamaktadır.

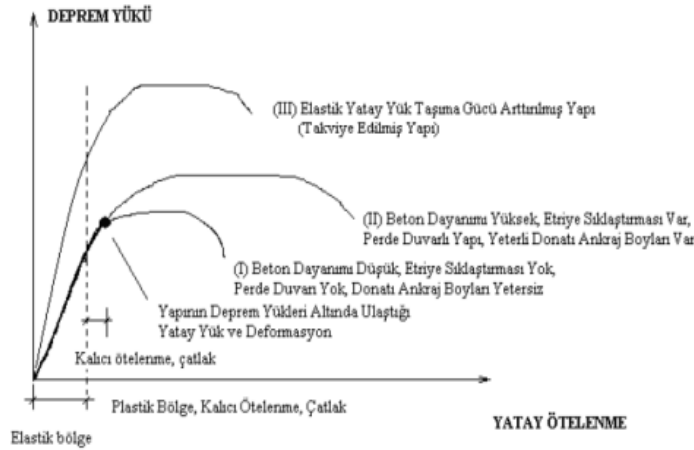
Onarım: Hasar görmüş bir yapı ya da yapı elemanının; görünüş, kullanılabilirlik, taşıma kapasitesi ile diğer dayanım ve statik özelliklerinin, belirli bir güvenlik düzeyine ve hasarsız durumundaki özelliklerine kısmen ya da tamamen geri döndürülmesi amacıyla gerçekleştirilen müdahaleler, yapısal onarım uygulamaları olarak tanımlanmaktadır.

Güçlendirme: Yapının sahip olduğu yatay yük kapasitesinin, sünekliğinin, rijitliğinin ve dayanımının, mevcut yapısal özelliklerinin üzerine çıkarılması amacıyla gerçekleştirilen uygulamalar güçlendirme çalışmaları olarak tanımlanır. Onarım uygulamalarında yapının daha önce bir hasar almış olması beklenirken, güçlendirme çalışmalarında böyle bir ön koşul bulunmamaktadır. Yani, güçlendirme işlemleri hasar almamış yapılar için de gerçekleştirilebilir. Bir yapıda güçlendirme gereksinimi doğurabilecek başlıca nedenler aşağıda maddeler hâlinde sıralanmıştır.

- Yapının kullanım amacında veya fonksiyonel gereksinimlerinde meydana gelen değişiklikler,
- Yapının inşa edildiği dönemde yürürlükte olan yapı yönetmeliklerine tam olarak uygun olmaması,
- Beton basınç dayanımının standartların altında kalması,
- Dönemin yönetmeliklerine aykırı şekilde yetersiz donatı kullanılması,

- Mevcut yapıya sonradan ilave katların eklenmiş olması,
- Yapının kullanım amacında gerçekleşen değişiklikler sonucu taşıyıcı sistemin yetersiz kalması,
- Yapı içerisinde çok sayıda bölme duvarın eklenmesiyle taşıyıcı olmayan sistemlerin yapısal davranışı etkilemesi,
- Yapının yeterli yanal rijitliğe sahip olmaması ve deprem gibi yatay yükler karşısında yetersiz davranış sergilemesi,
- İç veya dış etkenler (deprem, yangın, korozyon vb.) sonucu taşıyıcı sistemde meydana gelen hasarlar.

Şekil 1.3'te, depreme karşı farklı yapısal dayanım düzeylerine sahip yapıların yük-deplasman eğrileri ile güçlendirme uygulamaları sonrasında davranış özellikleri iyileştirilmiş bir yapının tipik yük-deplasman eğrisi sunulmaktadır. Grafikte; I numaralı eğri, gevrek davranış sergileyen bir yapıyı, II numaralı eğri, sünek davranış gösteren bir yapıyı ve III numaralı eğri ise güçlendirme uygulamalarıyla taşıma gücü kapasitesi artırılmış bir yapıyı temsil etmektedir.



Şekil 1. 3 Depreme karşı farklı dayanımlara sahip yapıların yük deplasman eğrisi [28]

Ülkemizde geçmişte yaşanan acı tecrübeler sonucunda, deprem riskinin azaltılmasına yönelik çeşitli politika ve uygulamalar hayata geçirilmiştir. Bu kapsamda atılan önemli adımların başında; 'Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998)'[29], bu yönetmeliğin geliştirilmesiyle 2007 yılında yürürlüğe giren 'Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)' ve 2018 yılında yayımlanıp 1 Ocak 2019 tarihi itibarıyla yürürlüğe giren

'Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)' yer almaktadır. 'Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi'ne ilişkin hükümler ise ilk kez 2007 yılı yönetmeliğinde yer bulmuştur.

Deprem riskini azaltmaya yönelik politika çerçevesinde gerçekleştirilen diğer önemli düzenlemeler arasında; 2001 yılında yürürlüğe giren 'Yapı Denetimi Hakkında Kanun'[30], 2009 yılında kurulan 'Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)' ve 2012 yılında uygulamaya konulan 'Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'[31] örnek olarak gösterilebilir.

Bir deprem ülkesi olan Türkiye için bu tür düzenlemeler ve uygulamalar son derece önemli adımlar teşkil etmektedir. Ancak etkin bir afet yönetimi kapsamında asıl öncelik, riskin yönetilmesidir. Bu çerçevede de en temel unsur, toplumun her kesimini kapsayan kapsamlı ve sürdürülebilir eğitim faaliyetleridir.

1.4 Yapılarda Dolgu ve Bölme Duvarların Tanımı, Görevleri ve Yapısal Katkıları

Türkiye’de ve birçok gelişmekte olan ülkede yaygın olarak kullanılan dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde, dolgu malzemesi genellikle tuğla, beton biriket veya gaz betondur. Türkiye’de özellikle dış cephe ve iç bölme amaçlı boşluklu fabrika tuğlası tercih edilmektedir. Depremler sırasında dolgu duvarların hasar görmesi, maddi kayıpların önemli bir kısmını oluşturmakta ve çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini etkileyerek yapının dayanıklılığını belirleyebilmektedir. Ancak, dolgu duvarlarda oluşan hafif çatlaklar bile yapı sakinlerinde oturma korkusu yaratmaktadır.

Dolgu duvarların betonarme yapıların deprem performansına etkisi; dolgu duvar ile betonarme çerçevenin göreceli dayanımına, dolgu duvarın yapım kalitesine ve dolgu ile çevresindeki çerçeve arasındaki bağlantıya bağlıdır. Dolgu duvarlar yapının dayanıklılığına önemli katkı sağlamaktadır. Ancak bazı durumlarda dolgu duvarlar hem düzlem içi hem de düzlem dışı zorlamalar nedeniyle yapının taşıyıcı sisteminden tamamen ayrılmaktadır. Geleneksel betonarme bina tasarımında, dolgu duvarların yatay yük taşıma kapasitesine etkisi göz ardı edilerek hesaba katılmaz. Bu yaklaşım, dolgu duvarların çerçeveden ayrıldığı varsayımı altında doğru sayılabilir. Fakat Türkiye’de uygulamada bu durum geçerli değildir. Dolgu duvarlar ile çerçeve

arasında boşluk bırakılarak, deprem anında birbirlerine zarar vermeleri engellenebilirdi. Fakat Türkiye’de yapım pratiği betonarme çerçeveler döküldükten sonra dolgu duvarların çerçevelerin içine yerleştirilmesi ve harç ile çerçeveye tutturulması şeklindedir. İnşaatın bu aşamasında, ölü yükler altında, çerçeve ile dolgu duvar arasında bir yük aktarımı beklenmez. Ancak deprem kaynaklı yatay kuvvetler etkisiyle dolgu duvarlar devreye girer ve yatay yüklere karşı direnç, çerçeve ile dolgu duvarın birlikte çalışması sonucu, bu elemanlardan biri hasar görene kadar sağlanır.

Tasarım sürecinde dolgu duvarların etkisi göz ardı edilip dayanım ve rijitlik katkıları yedek kapasite olarak değerlendirilmesi ilk etapta emniyetli bir yaklaşım gibi görünse de yeterli değildir. Analitik modellerde dolgu duvarları ihmal etmek her zaman güvenli sonuçlar vermez. Dolgu duvarlar, yapının yatay rijitliğini artırarak doğal titreşim periyodunu kısaltabilir ve bu durum deprem yüklerinin artmasına yol açabilir [32]. Ayrıca, deprem sonrası yapılan gözlemler dolgu duvarların genellikle hasar gördüğünü ortaya koymaktadır [33]. Dolgu duvarlardaki hasarlar, yatay yüklere karşı direncin ve enerji sönümlemenin göstergesidir; bu nedenle dolgu duvarların analitik hesaplamalarda dikkate alınması gerekmektedir.

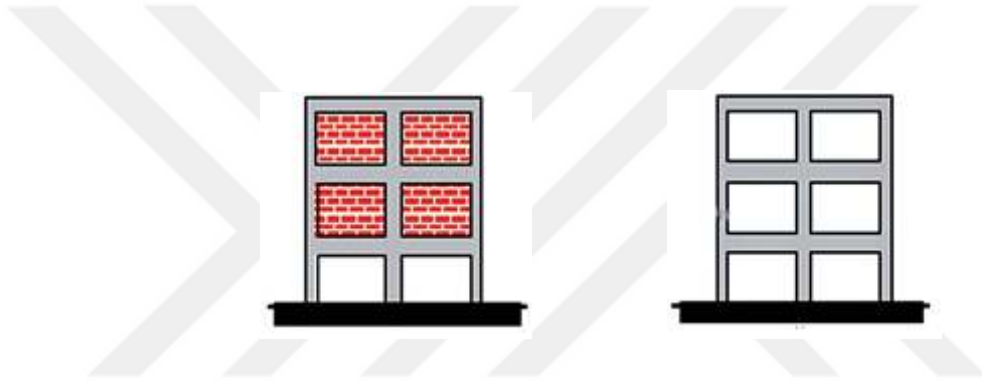
Son zamanlarda yapılan çalışmalar, dolgu duvarların yapı performansına önemli katkılar sağladığını ve özellikle düşük şiddetli depremlerde bu etkinin ihmal edilemeyeceğini göstermektedir. Dolgu duvarların betonarme yapıların yatay rijitliğini %440’a kadar artırabileceğini ortaya koymuştur.[34] Aynı çalışmada, yapı hizmete elverişlilik seviyesinde enerjinin %95’inin dolgu duvarlardaki çatlama ve kırılma ile sönümlendiği de vurgulanmıştır. Deprem başlangıcında dolgu panellerin çatlayarak çerçeveden ayrılmasının, dolgu duvarların yapı davranışına etkilerinin göz ardı edilmesi gerektiği düşüncesini geçersiz kıldığını belirtmiştir.[35] Ayrıca, birçok durumda enerjinin büyük bir kısmının dolgu duvarlarda sönümlendiği, kiriş ve kolonlardaki enerji sönümlemenin ise daha düşük seviyede gerçekleştiği ifade edilmiştir.

Türkiye’de yapı kalitesi ve kapasitenin düşük olması nedeniyle, dolgu duvarların binaların rijitlik ve dayanımına önemli katkısı olduğu kabul edilmektedir. Bu katkı, dolgu duvar ve çerçeve özelliklerine bağlıdır. Çalışmada, dolgu duvarların yapı davranışına etkisi analitik yöntemlerle incelenmiştir.

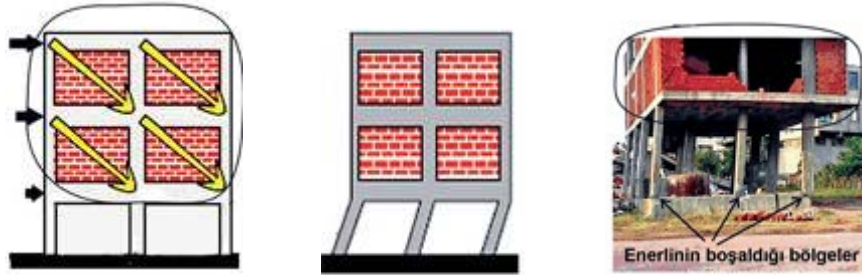
1.5 Dolgu Duvarların Yapı Tasarım Hesaplarına Etkisi

Ülkemizde kullanılan standartlarda dolgu duvarların statik hesapta sadece ağırlık olarak ilave edilirken taşıyıcı sisteme etkisi göz önüne alınmamaktadır.

Dolgu duvarların bulunduğu bir çerçevenin (Şekil 1.4'a) hesaplamalarında, yönetmeliğe göre dolgu duvarların etkisi göz ardı edilerek çerçeve (Şekil 1.4 b) gibi modellenirse, sonuçların gerçek durumu tam yansıtmaması şüphelidir. Deneysel çalışmalar da dolgu duvarların ihmal edildiği hesaplamaların gerçeğe önemli ölçüde uymadığını göstermektedir.[36]



Şekil 1. 4 a) Gerçek çerçeve durumu, B) Yönetmeliğe göre hesap edilen çerçeve



Şekil 1. 5 Dolgu duvarların modellenmemesi, deprem enerjisinin taşıyıcı sistemde düzensiz dağılmasına ve yapı göçmesine neden olması

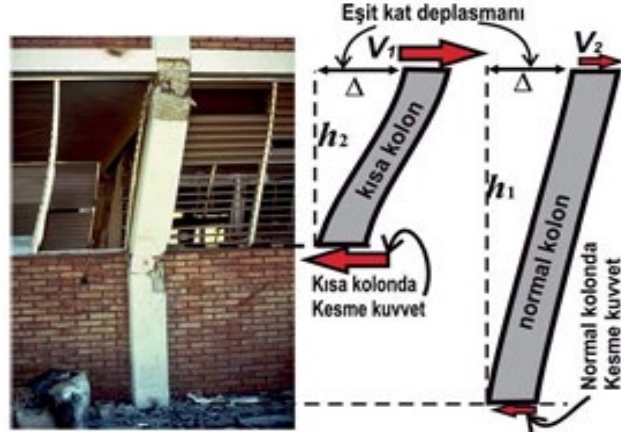


Şekil 1. 6 Dolgu duvarların dikkate alınmaması, yumuşak kat oluşumuna ve göçmeye yol açması

Dolgu duvarların dikkate alınmamasının diğer önemli bir dezavantajı, deprem sırasında binanın titreşime giren enerjisinin, dolgusuz bölümlerdeki taşıyıcı sistemde toplanarak yapının çökmesine yol açmasıdır (Şekil 1.5).

Binaların çoğunluğunda, mimari olarak özellikle zemin katlarında işyeri ve otopark olması nedeniyle bölme duvarlar yapılmamaktadır. Projelendirme aşamasında yapılan hesaplamalarda, dolgu duvarlarının rijitliği göz ardı edildiği için, enerji yumuşak katlarda yoğunlaşmaktadır. Oysa dolgu duvarların sağladığı rijitliğin, yapı davranışında ciddi bir etkisi bulunmaktadır; zira deprem sırasında duvarlı katlar, adeta yekpare bir sistem gibi davranmaktadır. Yumuşak katlarda yoğunlaşan enerji, özellikle kolon başlarını keserek, binanın göçmesine yol açan bir davranış sergilemektedir. Deprem sonrası göçme biçimlerinden bazıları Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, normal katlarda pencere camları dahi kırılmazken, tüm enerjinin duvarsız katlarda yoğunlaşarak boşalması, binanın göçmesine yol açmıştır. Yönetmeliklerde, 'yumuşak kat' yapımının engellenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yapının proje hesapları, gerçek durumu doğru bir şekilde temsil etmelidir. Deneysel sonuçlar ve deprem sonrası göçme biçimleri, duvarların hesaba katılmasının ve duvarsız katlara yeterli gücün verilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Bunun dışında, duvarların sebep olduğu bir diğer önemli etken ise duvarların kolon boyunca devam etmemesi, yani kısa kolon oluşumudur.



Şekil 1. 7 Kısa kolonlarda kesme kuvveti, normal kolonlara göre daha fazla olması

Şekil 1.7’de görüldüğü gibi, kolonun belli bir yüksekliğine kadar duvar bulunması durumunda, kolonun bu kısmı yatay etkiye karşı duvarlar tarafından desteklenir. Bununla birlikte, kolonun duvarsız kısmı, normal kolon kesme kuvvetine kıyasla daha yüksek kesme etkisine maruz kalmaktadır. Kısa kolon durumu, duvarın etkisiyle meydana gelir. Bu nedenle, duvar etkisinin kısa kolon oluşturup oluşturmadığı, proje safhasında dikkatle kontrol edilmeli ve gerekli tedbirler alınmalıdır. Yani, duvar etkisinin hesaba katılması, kısa kolon durumunun belirlenmesi için de zorunlu bir adımdır. Örneğin, bina bodrum katlarındaki bant pencereler, kısa kolon oluşumuna sebep olabilmektedir. Hatta bant pencere yüksekliği azaldıkça, yatay deprem kuvvetleri önemli derecede artmaktadır. Duvar ile kiriş arasında yarım tuğla yüksekliğinde bir açıklık bulunması veya duvarların kirişlerle birleşim yüzeyinde birkaç santimetre (2-3 cm) kadar açıklıklar bulunması, çok yüksek kesme kuvvetlerinin oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 1.8.).



Şekil 1. 8 Kiriş ile duvar arasındaki boşluk, depremde yüksek kesme kuvvetine ve hasara neden olması

Bir binanın deprem altındaki davranışının doğru şekilde analiz edilebilmesi için, doğal titreşim periyodunun bilinmesi gereklidir. Eşdeğer deprem yükü yönteminde deprem yükleri doğrudan yapının birinci mod periyodu ile ilişkilidir. Bu nedenle yapı ve deprem yönetmeliklerinde periyot hesaplamaları için yaklaşık formüller sunulmaktadır. Ancak bazı yönetmelikler, daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla Rayleigh oranı gibi enerji temelli hesap yöntemlerinin kullanılmasını da teşvik etmektedir.

Yapılar üzerinde yapılan yapı sağlığı izleme çalışmaları, gerçek yapılarda deneysel olarak elde edilen periyot değerleri ile analitik olarak hesaplanan ve ‘kesin’ kabul edilen periyot değerleri arasında ciddi farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu farkların temel nedeni; analizlerde kullanılan kütle ve rijitlik değerlerinin ve bu değerlerin yapı içindeki dağılımının, gerçek durumu yeterince yansıtmamasıdır. Ayrıca, yapı içinde bulunan ve rijitliği artıran bölme duvar gibi elemanlar çoğu zaman analitik hesaplamalarda ihmal edilmektedir. Literatürde yapılan çeşitli çalışmalar [37–40], dolgu duvarların varlığının yapının doğal titreşim periyodunu önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, yapının sönüm oranı, türü ve rijitliğin yapı boyunca dağılımı da periyot üzerinde etkili olan diğer önemli parametrelerdir. Periyot hesabında en temel ve etkili iki parametrenin doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu parametrelerden ilki, yapı salınımı sırasında etkin olan kütledir. Deprem yönetmeliklerinde, deprem etkisi altında esas alınacak kütlenin belirlenmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Diğer temel parametre olan yapının yatay rijitliği ise, kütleyle kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapıda artan deformasyonlarla birlikte, yapı elemanlarında meydana gelen çatlama ve eleman rijitliklerinin tanımlanmasındaki belirsizlikler, yatay rijitliğin doğru bir şekilde belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Örneğin, Türkiye Deprem Yönetmeliği’nin 1998 ve 2007 sürümlerinde, periyot hesabında elemanların rijitlik değerleri belirlenirken çatlama etkisi dikkate alınmazken; 2018 Deprem Yönetmeliği’nde [41] eleman türlerine göre değişen oranlarda çatlama ve buna bağlı rijitlik kayıpları öngörülmüştür. Bu değişiklik, yapıların hesaplanan doğal periyotlarında farklara, dolayısıyla da tasarım kuvvetleri ile deplasman değerlerinde değişikliklere yol açmaktadır. Ayrıca yönetmeliklerde periyot hesabı için farklı bağıntıların sunulmuş olması da hesaplamalarda önemli farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Hatta aynı ülke içerisinde dahi farklı

yönetmeliklerde periyot hesap yöntemleri değişebilmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan ASCE 7-16 [42] ve UBC-1997 [43] standartlarında farklı periyot hesap denklemleri önerilmiştir. Türkiye'de ise 1998, 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri arasında benzer farklar bulunmaktadır. Her ne kadar bu yönetmeliklerin dayandığı teorik altyapı benzer olsa da periyot hesabında kullanılan ampirik yaklaşımlar farklılık gösterebilmektedir. Tüm bu yönetmeliklerde [44–46] doğal titreşim periyodu genel olarak aşağıdaki formülle ifade edilmektedir (Denklem 1.1). Bu formülde α yapı türüne bağlı olarak değişen katsayıyı, H bina yüksekliğini, β ise tüm yönetmeliklerde genellikle $\frac{3}{4}$ olarak kabul edilen sabit katsayıyı temsil etmektedir.

$$T = \alpha \cdot H\beta \quad (\text{Denklem 1. 1})$$

Yönetmeliklerde verilen periyot bağıntılarından elde edilen periyot değerleri, yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı gerçek yapı davranışını yansıtan değerlere kıyasla genellikle daha büyük çıkmaktadır. Bu durum, Hong ve Hwang [47] ile Goel ve Chopra [48] tarafından yapılan çalışmalarda da ortaya konmuştur.

1.6 Depremlerde Dolgu Duvar Hasarları ve Eksikliğinin Sonuçları

Deprem yükleri etkisi altında bulunan dolgu duvarlarda meydana gelen hasar türleri, duvarların malzeme özellikleri, boyutları, yerleşim düzenleri ve taşıyıcı sistemle olan etkileşimlerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir [49]. Bu bağlamda, en yaygın karşılaşılan dolgu duvar hasarları şunlardır:

Diyagonal (Çapraz) Çatlaklar: Dolgu duvarlar, yatay deprem yükleri altında kesme kuvvetlerine maruz kaldıklarında duvar düzleminde genellikle “X” biçiminde diyagonal çatlaklar gelişmektedir. Bu çatlaklar, çoğunlukla duvarın orta bölgesinde yoğunlaşır ve yüksek basınç gerilmelerine bağlı olarak oluşur. Eğer dolgu malzemesinin basınç şekil değiştirme kapasitesi, kırılma kapasitesinden fazlaysa çapraz kırılma meydana gelir. Bu çatlaklar bir köşeden başlayarak çapraz yönde ilerler ve genellikle dolgu panelinin yeni bir yük taşıma mekanizmasına geçtiğini gösterir. Bu durum, bazı durumlarda yatay birleşimlerdeki kaymalarla da ilişkili olabilir. (Şekil 1.9.(a)).

Köşe Ezilmesi (Kompresyon Hasarı): Dolgu duvarlarda, özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinin köşe noktalarında, sıkışma etkisinin yoğunlaştığı alanlarda ezilme hasarları oluşabilmektedir. Bu tür hasarlar, yük aktarımının düzensiz olduğu bölgelerde daha sık görülmektedir. Yatay yükler altında köşe bölgelerinde gerilme yoğunlaşması meydana gelir ve bu durum kaçınılmaz köşe ezilmelerine yol açar. Rijit ve yüksek dayanımlı çerçeve elemanlarında bu hasarlar genellikle sınırlı kalırken, zayıf çerçevelerde ezilmeler daha yaygın olup taşıyıcı sisteme de zarar verebilir. Yük artışıyla birlikte bu hasarlar ilerleyerek tüm duvar elemanlarının ayrılmasına ve çatlakların çerçeve elemanlarının merkezine doğru yayılmasına neden olabilir. (Şekil 1.9.(b)).

Ayrılma ve Kopma: Dolgu duvarların taşıyıcı çerçeve elemanlarından ayrılması ya da bağlantı noktalarının kopması sonucunda, duvar taşıyıcı sistemden bağımsız hale gelmektedir. Bu tür hasarların oluşumunda, genellikle yetersiz ankraj detaylarının etkili olduğu görülmektedir (Şekil 1.9.(c)).

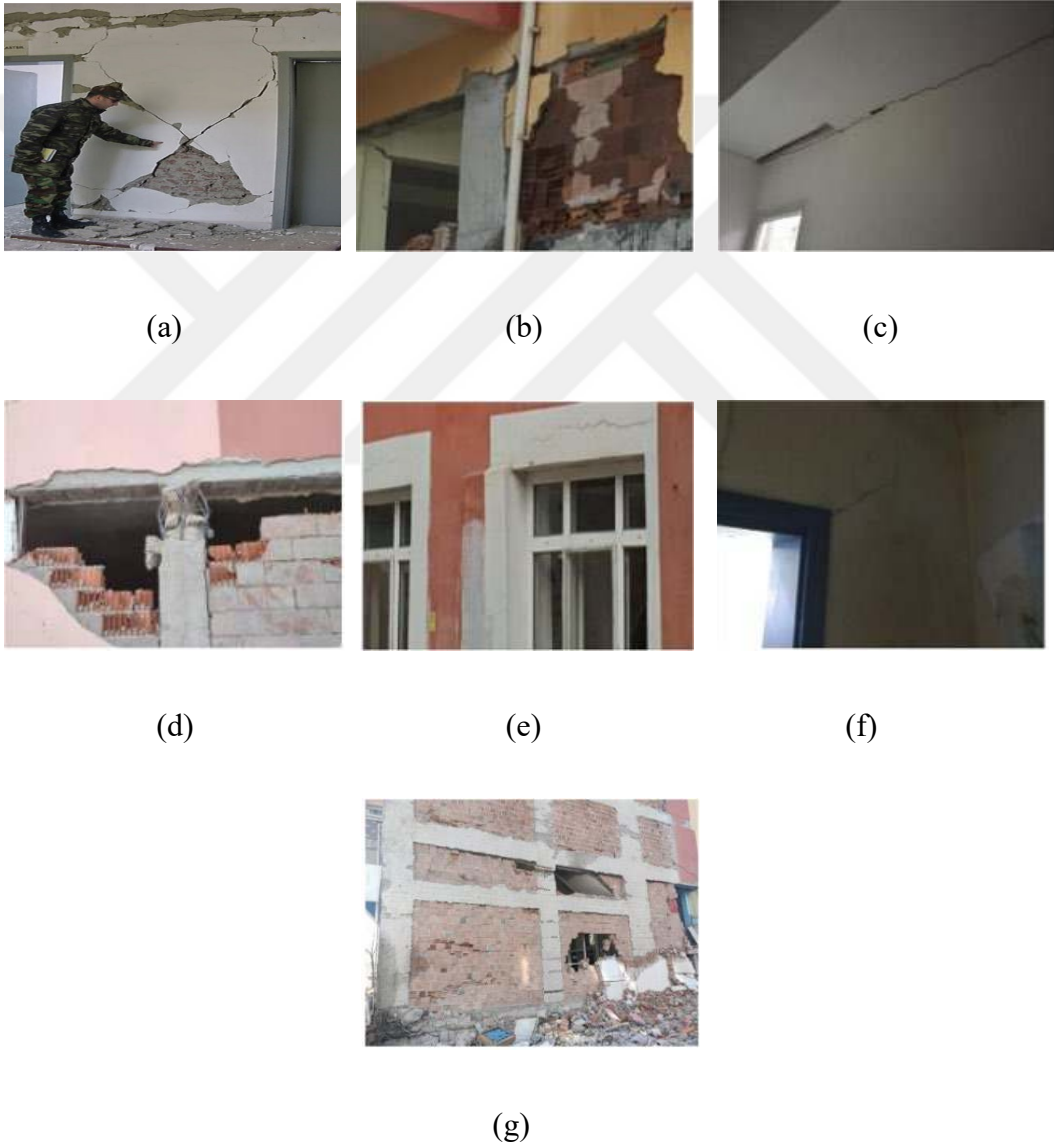
Burkulma ve Parçalanma: Deprem sırasında dolgu duvarların ileri düzeyde deformasyona maruz kalması durumunda, duvar yüzeyinde parçalanmalar meydana gelebilmektedir. Bu durumda özellikle duvarın orta bölgesinde malzeme ayrışması ve dökülmelerin gözlemlendiği rapor edilmektedir (Şekil 1.9.(d)).

Yanal Kayma Çatlakları: Taşıyıcı çerçeve ile dolgu duvar arasındaki bağın zayıf olduğu durumlarda, duvarın yatay doğrultuda kayması söz konusu olabilir ve bu kayma hareketi sonucunda birleşim bölgelerinde yatay çatlaklar oluşabilir (Şekil 1.9.(e)). Bu tür hasar mekanizması, genellikle diğer kırılma türleriyle eş zamanlı olarak gözlemlenmektedir. Yatay birleşim kayması özellikle çelik gibi rijit ve sünek çerçevelerde daha sık görülür. Birleşik dolgu sistemlerinde, özellikle tuğla duvarlarda, birleştirme harcının aderansının yetersiz olduğu durumlarda bu zayıflık genellikle dolgunun orta bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu hasar türü çoğunlukla düşük düzeyde ezilme ile karakterize edilir. Ayrıca, bu davranış biçiminin önlenmesine yönelik belirli bir sınır değeri bulunmamakta olup, sistem tarafından üretilen enerji sürekli olarak Coulomb tipi sürtünme yoluyla dağıtılmaktadır.

Kapı ve Pencere Çevresindeki Hasarlar: Kapı ve pencere gibi açıklıkların çevresinde, stres yoğunlaşmasının etkisiyle çatlaklar ve malzeme dökülmeleri

meydana gelebilmektedir. Kapı ve pencere çevresindeki hasarların genellikle açıklıkların köşe noktalarından başlayarak, duvarın diğer kısımlarına doğru yayılma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 1.9.(f)).

Tam Çökme (Göçme): Şiddetli deprem etkileri altında dolgu duvarların tamamen göçmesi mümkündür. Bu tür göçme davranışı, genellikle duvarın taşıyıcı çerçeveye yeterli bütünleşme sağlamaması ya da maruz kaldığı yüklerin kapasitesini aşması durumunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.19.(g)), [50]. Deprem hareketlerinin dolgu duvar düzlemine aktarılması, düzlem dışı kırılma mekanizmalarını tetikleyebilir.



Şekil 1. 9 Deprem etkisiyle dolgu duvarlarda oluşan yapısal deformasyonlar
[51,52]

1.7 Dolgu Duvarların Taşıyıcı Sistem Davranışına Katkıları

Dolgu duvarlar, sıklıkla yapısal analizlerde ikincil elemanlar olarak değerlendirilip göz ardı edilse de betonarme yapıların taşıyıcı sistemine rijitlik ve dayanım yönünden önemli katkılar sunan yapısal bileşenlerdir. Betonarme taşıyıcı sisteme sahip yapılar tasarlanırken dolgu duvarların etkisi çoğunlukla hesaba katılmamaktadır [53] Bu duvarlar, yatay yükler altında sistemin rijitliğini artırarak görelî kat ötelemelerini azaltmakta, plastik mafsall oluşumlarını yönlendirerek taşıyıcı elemanlardaki hasarları sınırlamaktadır. Deprem etkisi altındaki yapılarda dolgu duvarların varlığı, iç kuvvetlerin azalmasına ve yapısal performansın artmasına katkı sağlar. Bu nedenle, dolgu duvarların etkilerinin yapısal analizlerde dikkate alınması, yapı performansının doğru değerlendirilmesi ve hatalı tasarımların önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır [54-55] Taşıyıcı sistemin performansına dolgu duvarların sağladığı etkiler, Şekil 1.10 aracılığıyla görsel olarak ortaya konulmuştur.

DOLGU DUVARLARIN TAŞIYICI SİSTEM ÜZERİNDEKİ KATKILARI	
RİJİTLİK VE DAYANIM ETKİLERİ Dolgu duvarlar, taşıyıcı sisteme ilave rijitlik ve dayanım kazandırarak yapısal davranışı önemli ölçüde etkiler. Dolgu duvarların varlığı, taban kesme kuvvetlerinde artışa yol açarken, ilk plastik mafsall oluşumunu geciktirir. Bu durum, sistemin daha rijit ve sünek bir şekilde davranmasını sağlar.	YATAY YER DEĞİŞTİRME VE GÖRELİ KAT ÖTELENMESİ ETKİLERİ Dolgu duvarlar, yapı rijitliğini artırarak yatay yer değiştirme ve kat ötelemesini azaltır. Bu sayede yapı daha kararlı davranır, sünekliği artar ve depremde enerjiyi daha etkili tüketir.
PLASTİK MAFSAL OLUŞUMUNDA DEĞİŞİKLİKLER Dolgu duvarlar, taşıyıcı sistemin plastik mafsall oluşum sırasını ve yerini değiştirir. Duvarsız çerçevelerde mafsallar genelde kiriş uçlarında oluşurken, duvarlı sistemlerde ilk plastikleşme duvar temas bölgelerinde başlar, ardından kolonlar etkilenir. Bu durum, kiriş hasarını azaltarak yapı elemanlarının rijitliğini daha uzun süre korumasını sağlar.	TAŞIMA KAPASİTESİ VE PLASTİK DÖNMELER Dolgu duvarların taşıma kapasitesini hesaba katmak, taban kesme kuvvetini ve rijitliği artırır; plastik mafsall dönme taleplerini azaltarak yapının daha kontrollü, dayanıklı ve hasarı sınırlayan bir performans göstermesini sağlar.
YAPININ PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ Dolgu duvarlı sistemler, deprem yükleri altında daha düşük deformasyon seviyeleri ve artan dayanım kapasitesi sergilemektedir. Bu sistemler, dolgu duvarsız yapılara kıyasla elastik ötesi davranışta daha üstün performans göstermekte olup, yapının genel sünekliğini ve enerji sönümleme kapasitesini artırmaktadır.	ANALİZ SONUÇLARINA ETKİLERİ Dolgu duvarların yapısal analize dahil edilmesi, kapasite eğrileri, plastik mafsall oluşum sıralamaları ve sistemin deprem yüklerine karşı davranışında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Dolgu duvarların ihmal edilmesi durumunda ise analiz sonuçları gerçek durumu yansıtmayabilir ve yapının deprem performansı yanlış değerlendirilerek güvenlik riski oluşabilir.

Şekil 1. 10 Dolgu duvarların taşıyıcı sistem üzerindeki katkıları

Dolgu duvarlar taşıyıcı sisteme rijitlik ve dayanım yönünden katkı sağlasa da uygun şekilde tasarlanmadıklarında veya yapısal analizlerde dikkate

alınmadıklarında yapının sismik güvenliğini olumsuz etkileyebilirler. Özellikle düzensiz yerleşimleri, alt katlardaki eksiklikleri ve kırılma davranışları, yumuşak kat oluşumu gibi ciddi yapısal problemlere yol açabilmektedir. Deprem sırasında dolgu duvarlarda ani kırılmalar meydana gelebilmekte, bu da yük transferinde değişikliklere ve taşıyıcı elemanlarda beklenmeyen iç kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, dolgu duvarların yanal yük kapasitesine katkılarının doğru tahmin edilememesi, sistem performansının hatalı değerlendirilmesine ve güvenlik risklerinin artmasına yol açmaktadır. Ülkemizde meydana gelen büyük depremler sonrası bu duvarlardaki hasarların onarımı hem zor hem de maliyetlidir. Yumuşak kat düzensizliği nedeniyle hasar gören bir yapı Şekil 1.11’te sunulmaktadır.



Şekil 1. 11 Yumuşak kat düzensizliği

Dolgu duvarların yapısal modellemesi, bu elemanların taşıyıcı sistem içerisindeki gerçek davranışlarının analitik ortama doğru şekilde aktarılmasını amaçlamakta olup, bu doğrultuda farklı modelleme yaklaşımları geliştirilmektedir. Bu yöntemler:

Dolgu Duvarsız Modelleme (Ayrık Çerçeve Yaklaşımı): Dolgu duvarların yapısal analizde dikkate alınmadığı ve yalnızca çerçeve elemanları (kolon ve kirişler) üzerinden değerlendirme yapılan analiz yaklaşımıdır. Bu yöntemde dolgu duvarların rijitlik ve dayanım katkısı ihmal edildiğinden, deprem etkisi altındaki yapı davranışı gerçeği tam olarak yansıtmaz. Özellikle kısa kolon etkisi gibi kritik davranışların göz

ardı edilmesine neden olur. Ancak hesaplama ve modelleme kolaylığı sunduğu için, genellikle yalnızca çerçeve sisteminin performansının incelendiği basitleştirilmiş analizlerde tercih edilmektedir.

Eşdeğer Basınçlı Diyagonal Yaklaşımı: Dolgu duvarlar, çerçeve sistemi içerisinde eşdeğer diyagonal basınç çubuğu şeklinde idealize edilerek modellenmektedir. Bu yaklaşımda duvarın rijitlik ve dayanım değerleri, malzeme özellikleri ile geometrik boyutlarına bağlı olarak tanımlanır. Her ne kadar bu yöntem, dolgu duvarların yapısal sisteme olan katkısını basit şekilde modele dahil etme imkânı sunsa da doğrusal olmayan davranışları ve karmaşık kırılma mekanizmalarını özellikle yatay ve düşey yüklerin birleşik etkisi altındaki davranışı tam olarak yansıtamamaktadır. Bununla birlikte, sade yapısıyla hesap ve uygulama kolaylığı sunduğu için, dolgu duvarların rijitlik ve dayanım katkısının yaklaşık olarak değerlendirilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Makro Modelleme Yaklaşımı: Dolgu duvarlar, bu modelleme yaklaşımında rijit plak gibi genişletilmiş elemanlar olarak temsil edilmektedir. Duvarın rijitlik, dayanım ve enerji sönmeme özellikleri, tanımlı formülasyonlar aracılığıyla sisteme dahil edilmekte ve yapının genel davranışı üzerinde etkili olacak şekilde modele yansıtılmaktadır. Bu yöntem, özellikle modal analiz ve rijitlik dağılımı çalışmalarında başarılı sonuçlar sunmakta; dolgu duvarların küresel sistem davranışı üzerindeki etkilerini genel düzeyde temsil edebilmektedir. Ancak, yerel hasar mekanizmalarını, kesme kuvvetlerini ve moment etkilerini ayrıntılı biçimde analiz edememesi, yöntemin önemli bir sınırlılığıdır.

Mikro Modelleme Yaklaşımı: Dolgu duvarlar, tuğla veya blok birimleri ile harç tabakasının fiziksel ve mekanik özelliklerini içeren ayrıntılı mikro modellerle temsil edilmektedir. Bu modelleme yaklaşımı sayesinde, dolgu duvarların doğrusal olmayan davranışı, çatlama ve kırılma mekanizmaları, yük aktarımı ve deformasyon modları detaylı biçimde analiz edilebilmektedir. Ancak, yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle bu yöntem büyük ölçekli yapılar için pratik olmayabilir ve genellikle yerel incelemeler veya küçük örnek yapılarla sınırlı kalmaktadır.

Hibrit Modeller: Yukarıda açıklanan modelleme yaklaşımlarının birleştirilmesiyle oluşturulan karma analiz yöntemleri hem dolgu duvarın hem de

ereve sisteminin davranışını daha kapsamlı ve gerçekçi biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, örneğın eşdeğer diyagonal modelleme, mikro modelleme teknikleriyle entegre edilerek hem pratik hem de detaylı analiz sonuçları elde edilebilmektedir. Her ne kadar bu tür birleştirilmiş yaklaşımlar modelleme ve analiz süreci açısından daha karmaşık olsa da farklı ölçeklerdeki yapılar için daha güvenilir sonuçlar sunmakta ve dolgu duvarların yapısal sistem üzerindeki etkilerinin çok boyutlu olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 MATERYAL

2.1.1 Çimento Esaslı İnce Kompozitler

Kompozit panel malzemeler, çeşitli liflerin çimento esaslı ya da benzeri bağlayıcı matrisler içine gömülmesiyle üretilen çok fazlı sistemlerdir. Yapısal bileşenlerle uyumluluk, uygulama kolaylığı, stoklana bilirlilik ve erişilebilirlik gibi avantajları nedeniyle kullanımları son yıllarda artış göstermektedir. Şantiyede kuru imalat olanağı sunmaları, işçilik ihtiyacını ve buna bağlı olası kaza risklerini azaltarak bu eğilimi desteklemektedir. Uygulamada kompozit paneller çoğunlukla kaplama ve tamamlayıcı eleman olarak tercih edilmektedir. Yeni nesil kompozit malzemeler arasında yer alan tekstil donatılı kompozitler (TRM/FRCM), başta yapısal olmayan dış cephe kaplamaları ve sandviç panel cephe sistemleri olmak üzere, hafiflik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, çatlak köprüleme ve durabilite avantajları sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Yeni nesil kompozit malzemeler arasında yer alan tekstil donatılı kompozitler (TRM/FRCM), başta yapısal olmayan dış cephe kaplamaları ve sandviç panel cephe sistemleri olmak üzere, hafiflik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, çatlak köprüleme ve durabilite avantajları sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [56].

Çimento esaslı kompozitlerde lif donatı kullanımı, malzemenin dayanım ve durabilitesini artırarak daha ince kesitlerin üretimine olanak tanır. Yüksek durabilite, kompozitin mekanik/fiziksel özelliklerini uzun süre korumasını ve uygulandığı yapının dış etkilere karşı hizmet ömrünün uzamasını sağlar. Lif donatılı kompozitlerin performansı başlıca lif geometrisi, boyu, narinlik oranı ve karışımdaki hacim/pay oranına bağlıdır; bu parametreler taşıma kapasitesi, çatlak kontrolü ve enerji sönümleme davranışını belirleyici niteliktedir [57]. Önceki çalışmalar, lif boyunun betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Uzun liflerin oluşan çatlaklarla kesişme olasılığı görece düşük olduğundan, çatlak ilerlemesini etkin biçimde sınırlandıramayabilir. Buna karşılık kısa lifler, çatlak yüzeyleriyle daha yüksek

olasılıkla etkileşerek köprüleme etkisini artırır; böylece çatlak genişliği kontrolünü iyileştirir, taşıma kapasitesi ile dayanıklılığı yükseltir. Kısa liflerin kullanımı, eşdeğer lif hacmi için çatlakları köprüleyen etkin lif sayısını artırarak kompozitin çatlak kontrolü ve taşıma kapasitesini iyileştirir. Bununla birlikte, kırılmış lifli kompozitlerde lif oranının yükselmesi, taze halde karıştırma ve kalıplama zorluklarına özellikle matriste lif topaklanmasına yol açabilir; bu durum yerel kusurlar oluşturarak performansı olumsuz etkiler. Topaklanmayı sınırlamak amacıyla (i) ince agrega kullanımına, (ii) lif narinlik oranının belirli bir sınırı aşmamasına, (iii) liflerin karışım kuru iken ilavesine, (iv) uygun dozda süper akışkanlaştırıcı kullanımına dikkat edilmesi önerilir [58].

FRCM kompozitler, betonarme elemanların ve yığma duvarların mekanik özelliklerini belirgin biçimde iyileştirir. Yüksek sıcaklık dayanımı, FRCM'nin başlıca üstünlüklerinden biridir. Yüksek dayanımlı betonların yanı sıra, uygulamada FRCM üretiminde ultra yüksek performanslı matrisler (UHPC) de kullanılmakta; bu sistemlerde yüksek süneklik ve tokluk düzeylerine ulaşmak amacıyla çoğunlukla ayırık lif takviyesinden yararlanılmaktadır [59] (Şekil 2.2).

B-FRCM (Basalt Fiber Reinforced Cementitious Matrix) bazalt güçlendirme sistemi, taşıyıcı elemanların dayanım ve süneklik özelliklerini artırmaya yönelik olarak geliştirilen, çelik ve betonarme sistemlerin çalışma prensiplerine benzer şekilde işleyen bir yapısal güçlendirme yöntemidir. Ancak bu sistemin kullanım alanı yalnızca modern yapılarla sınırlı değildir. Kireç esaslı bağlayıcı içeren güçlendirme harcı ile kullanılan bazalt donatı filesi, tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerine müdahalede de uygun bir çözüm sunmakta; bu sayede kültürel miras niteliği taşıyan yapılarda, malzeme uyumu ve müdahalenin geri alınabilirliği gibi koruma ilkeleri gözetilerek güçlendirme yapılabilir.

Mevcut yapılarda, özellikle zaman içerisinde oluşan yapısal bozulmalar ve uygulama kaynaklı hatalar sonucu çeşitli düzeylerde hasarlar meydana gelebilmektedir. B-FRCM güçlendirme sistemleri, çağdaş inşaat standartlarına yakın performans özellikleri sunarak bu tür hasarların onarımı ve taşıyıcı sistem davranışının iyileştirilmesi amacıyla yaygın şekilde uygulanmaktadır (Şekil 2.1.).



(a)



(b)



(c)

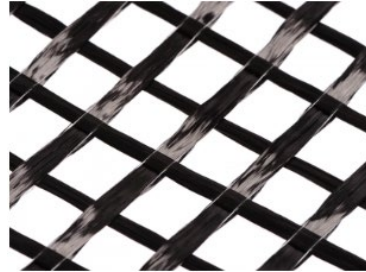


(d)

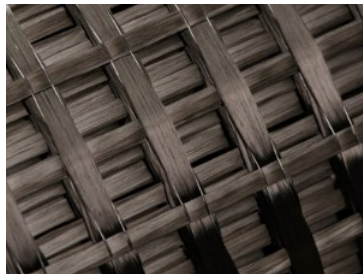
Şekil 2. 1. Yapısal kullanılan çimentolu kompozitlere örnekler



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. 2. Bazalt lif ağı örnekleri

Tablo 2. 1. Cam elyaf esaslı b-frem ağının teknik özellikleri

Yoğunluk	1,80 gr/cm ³
Genişliği	100 cm
Kaplamalı m ² ağırlık	240
Mesh aralığı (mm)	20x20
Çekme Dayanımı	5500 MPa
Gerilim Hasarı	%1,8
Bazalt Fiber Elastisite Modülü	240 GPa
Lif Çapı (µm)	7

2.1.2 Çimento Bazlı Kompozit Malzeme

Çimento bazlı güçlendirme harcı; çimento esaslı, polimer modifiyeli, tiksotropik yapıya sahip ve elyaf ile silis dumanı katkılı, EN 1504-3 standardına göre R4 sınıfında yer alan yüksek dayanımlı bir yapı tamir malzemesidir (Şekil 2.4). Malzemenin içeriğinde yer alan katkıları sayesinde hem mekanik hem de kimyasal dayanım özellikleri önemli ölçüde artırılmıştır.

Performans Nitelikleri

- **Yüksek mekanik mukavemet:** R4 sınıfı ile uyumlu olarak yüksek basınç ve eğilme dayanımı sunar.
- **Tiksotropik davranış:** Malzemenin düşey ve baş üstü uygulamalarda sarkma yapmadan uygulanabilmesine olanak tanır.
- **Yüksek aderans:** Beton, donatı çeliği ve B-FRCM donatı fileleri ile güçlü yapışma özelliği gösterir.
- **Durabilite:** Aşınma, donma-çözülme çevrimleri, klor ve sülfat gibi kimyasal etkiler ile deniz ve yer altı suyu koşullarına karşı dayanıklıdır.
- **Yangına dayanım:** A1 sınıfı yanmazlık özelliğine sahiptir.
- **Uygulama kolaylığı:** Tek bileşenli olup yalnızca su ile karıştırılarak mala veya püskürtme yöntemiyle uygulanabilir.

Kullanım Alanları

- Betonarme yapı elemanlarının yapısal onarımı,
- Karot boşlukları ve tij deliklerinin doldurulması,

- B-FRCM (Basalt Fiber Reinforced Cementitious Matrix) sistemleriyle birlikte yapısal güçlendirme uygulamaları,
- Kimyasal aşındırıcı çevre koşullarına (klor, sülfat, yer altı ve deniz suyu) maruz kalan yapıların korunması,
- Tarihi ve modern yapıların hem yüzeysel hem de derinlemesine tamirat ve rehabilitasyonu.

Teknik Özellikler

Tablo 2. 2. Çimento bazlı güçlendirme harcı

Basınç Dayanımı (EN 12190)	28 Gün> 60 MPa
Elastisite Modülü (EN 13142)	28 Gün> 20000 MPa
Yapışma Dayanımı (EN 1542)	28 Gün> 2,0 MPa
Yangın Dayanımı	A1
Kapiller Su Absorpsiyonu (EN 13057)	<0,5 kg m ² h-0,5
Kullanım Süresi (+20 °C)	40 Dakika
Tam Kurlenme Süresi (+20 °C)	28 Gün



Şekil 2. 3. Bazalt lif ağı ve çimento bazlı sıva harcının uygulaması



Şekil 2. 4. Çimento bazlı sıva harcı

2.1.3 Tuğla

Çalışmada kullanılan dolgu duvar örnekleri, boyutları $19,5 \times 19,5 \times 8,5$ cm olan yatay delikli tuğlalar ile inşa edilmiştir.

2.1.4 Hidrolik Kireç Esaslı Güçlendirme Harcı

Hidrolik esaslı güçlendirme harcı, bağlayıcı olarak hidrolik kireç, puzolanlar veya özel çimento türleri içeren, suyla karıştırıldığında hem hava hem de su altında priz alabilen bir yapı malzemesidir. Özellikle taş, tuğla ve yığma yapıların taşıyıcı veya dolgu elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılır.

FRP, TRM veya diğer yüzey kaplama sistemleriyle birlikte yapının taşıyıcı duvarlarına uygulanarak bağlayıcı görev görür. B-FRCM güçlendirme sisteminde güçlendirme donatıları ile birlikte yapıların güçlendirilmesinde kullanılır.

Tablo 2. 3. Hidrolik kireç esaslı güçlendirme harcı basınç dayanımı

Basınç Dayanımı (MPa)	28 gün > 10
Elastisite Modülü (MPa)	28 gün > 16000 MPa
Su Buharı Geçirimsizliği (μ)	<35 μ
Yangın Dayanımı	A1
Yoğunluk (gr/cm^3)	1,82
Karışım Yoğunluğu	1,95-2,05 gr/cm^3

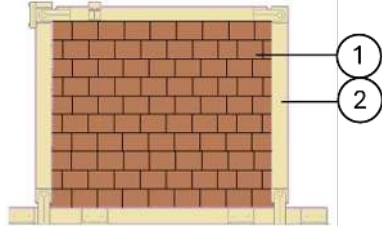
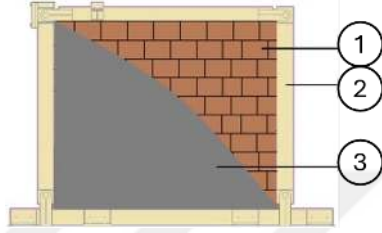
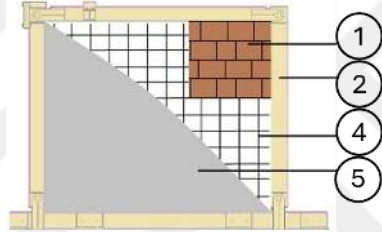
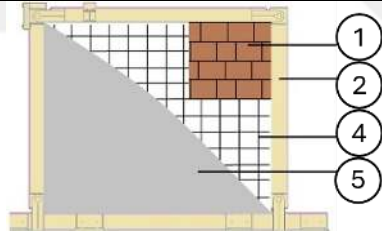
2.2 YÖNTEM

2.2.1 Deneysel Numunelerin Özellikleri

B-FRCM ve çimento bazlı kompozit malzeme (CBSM) ile güçlendirilmiş çelik çerçeve sistemine yerleştirilen dört adet dolgu duvar elemanı üzerinde, tersinir ve tekrarlı yatay yükler altında deneysel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Numunelerden biri yalın tuğla dolgu duvar malzemesi ile test edilmiş, tuğla dolgu duvar üzerine geleneksel sıva yapılarak yüke maruz bırakılmış, bir diğeri tuğla dolgu duvarın iki yüzü B-FRCM malzemesi ile kaplanarak hidrolik kireç esaslı malzeme ile sıvanarak test edilmiş, sonuncu numune de çimento bazlı kompozit malzeme ile güçlendirilerek deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar, Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne bağlı Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda, tek açıklığa ve tek kata sahip, 1/1 ölçekli bir çelik çerçeve sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, tek katlı, tek açıklıklı ve 1/1 ölçekli çelik çerçeve içerisinde iki adet numune referans kabul edilmiş 2 adet numune de çeşitli güçlendirme tekniği ile güçlendirilerek deprem sırasındaki davranışları gözlemlenmiştir. Numune detayları ve isimlendirmeleri Tablo 2.4'de sunulmuştur.

Tablo 2. 4. Deneysel numuneler, değişkenleri ve detayları

No	İsim	Model	Açıklama
1	REF 1		Geleneksel tuğla duvar
2	REF 2		Geleneksel kaba sıvalı tuğla duvar
3	FRCM-2		B-FRCM takviyeli hidrolik kireç esaslı güçlendirme harç sıvalı tuğla duvar
4	FRCM+CBSM		B-FRCM takviyeli çimento esaslı güçlendirme harç sıvalı tuğla duvar

2.2.2 Deneysel Numunelerin Detayları ve Üretimleri

Bu çalışma kapsamında toplam dört adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneysel uygulamalar, dört noktadan mafsallı bağlantılarla oluşturulmuş bir çelik çerçeve sistemi içerisinde yürütülmüştür. Kullanılan çelik çerçevenin toplam net yüksekliği 2,75 metre, toplam net genişliği ise 3.00 metredir. Yatay yük uygulaması, reaksiyon duvarına sabitlenmiş bir hidrolik aktüatör aracılığıyla sağlanmış ve bu yükler çelik çerçevenin kiriş elemanının orta noktasından uygulanmıştır. Çerçevenin tabana ankrajı, rijit döşemeye 16 noktadan çelik tijler ile yapılmıştır. Deney düzeneğine ilişkin detaylı görseller Şekil 2.5'te sunulmaktadır.



Şekil 2. 5. Deney düzeneği

2.3 Deney Düzeneği, Ölçüm Tekniği, Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında, tek açıklıklı ve tek katlı olarak tasarlanmış, 1/1 ölçekli çelik çerçeve sistemi içerisine yerleştirilen tuğla duvarlı dört adet numune üzerinde çeşitli güçlendirme yöntemleri uygulanarak, bu tekniklerin yapısal davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çok sayıda deneyin ardışık şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla, çerçeve sistemi betonarme yerine çelik elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Deney süresince, tüm numunelere deprem etkilerini temsil eden tersinir ve tekrarlayan yatay yükler uygulanmıştır. Yükleme işlemi, 1000 kN kapasiteli hidrolik aktüatör yardımıyla, çatlak oluşumlarının ve yayılımlarının gözlemlenmesine imkân tanıyacak şekilde, adım adım ve kontrollü bir hızda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, bilgisayar destekli veri toplama sistemleri

aracılığıyla yük ve yer değiştirme ölçümleri 1 Hz. frekansla kaydedilmiş ve sistematik olarak arşivlenmiştir.

2.3.1 Deney Düzenegi

Deneyler, laboratuvar koşullarında yer alan rijit bir platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu platform, betonarme elemanlardan oluşan dayanıklı bir duvar ve döşeme sisteminden oluşmaktadır. Reaksiyon duvarı olarak tanımlanan bu sağlam yapı elemanı, 8 x 5 m boyutlarında bir yüzey alanına sahiptir ve 35 adet ankraj kutusunu içermektedir (Şekil 2.6). Her bir ankraj kutusunda, bağlantı elemanlarının yerleştirilebilmesine olanak tanıyan dört adet delik yer almakta olup, bu yapı sayesinde hidrolik aktüatörün hem yatay hem de düşey düzlemlerde farklı konumlarda kullanılabilmesi mümkün hale gelmiştir. Rijit döşeme ise 8 x 14 m yüzey ölçülerine ve 1,10 m kalınlığa sahiptir. Döşeme üzerinde her biri dört ankraj kutusundan oluşan toplam 50 bağlantı grubu (200 bağlantı noktası) bulunmaktadır. Yapım sürecinde, ankraj kutularının çevresi özel olarak tasarlanmış donatılarla güçlendirilmiş olup, beklenmedik çekme etkileri sonucu meydana gelebilecek hasarların önlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. 6. Reaksiyon duvarı

2.3.2 Ölçüm Tekniği

Deneylerde uygulanan yatay yüklerin ölçümü, 500 kN kapasiteli bir yük hücresi (load-cell) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerindeki yatay, düşey ve çapraz yer değiştirme değerleri ise, mekanik ve ipli sistemlere sahip potansiyometrik cetveller (PC) aracılığıyla belirlenmiştir. Yük hücreleri ve PC'lerden elde edilen veriler, bilgisayar destekli veri toplama sistemleriyle anlık olarak dijital ortama aktarılmıştır. Elde edilen tüm veriler, daha sonra analiz amacıyla Excel formatına dışa aktarılmıştır.

2.3.3 Yük Ölçümleri

Deneyisel çalışmalarda, bir adet yük hücresi (Load-Cell) kullanılmıştır (Şekil 2.7). Yük hücresi, uygulanan yük sırasında basınca maruz kalarak çıkış ucunda belirli bir gerilim sinyali üretmektedir. Bu sinyal, veri toplama sistemi aracılığıyla ölçülerek karşılık gelen yük birimlerine dönüştürülmüştür. Yük hücresi, hidrolik aktüatörün ucuna özel olarak tasarlanmış bir bağlantı detayı ile monte edilmiştir. Hem çekme hem de basınç yönündeki yüklemeler sırasında bu hücreden ölçüm alınmıştır. Elde edilen veriler, veri toplama cihazı üzerinden bilgisayara aktarılmış; deney süresince bu veriler ve ilgili grafikler bilgisayar ekranında gerçek zamanlı olarak izlenebilecek şekilde yapılandırılmıştır.



Şekil 2. 7. Yük hücresi

2.3.4. Yer Değiştirmelerin Ölçölmesi

Numuneler üzerinde meydana gelen yer değiştirmeler, yer değiştirme miktarını ölçmeye yönelik mekanik ve ipli potansiyometrik cetveller kullanılarak ölçölmüştür. Bu deplasman ölçerler (şekil 2.8.), merkez milin hareketine bağlı olarak çıkış ucunda bir gerilim sinyali üretir. Üretilen bu sinyal, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayara iletilir. Alınan gerilim verileri, önceden yapılan kalibrasyon işlemleri doğrultusunda yer değiştirme (mm) birimine çevrilerek kaydedilmiştir. Bu çalışmalarda, 200 mm ölçüm aralığına sahip mekanik PC'ler ile 1800 mm kapasiteli ipli potansiyometrik cetveller tercih edilmiştir.



şekil 2. 8. Deplasman ölçerler

2.3.5 Yük ve Yer Değiştirme Ölçömlerinin Bilgisayar Ortamına Aktarılması

Yük hücreleri ile deplasman ölçüm cihazlarının çıkış uçlarında üretilen gerilim sinyalleri, ara bağlantı kutuları aracılığıyla veri toplama sistemi (data logger) ile entegre edilmektedir (şekil 2.9). Her bir ölçüm elemanının çıkışı, veri toplama cihazındaki ilgili kanallara bağlanmakta ve bilgisayar ile veri toplama sistemi arasındaki arabirim cihazı üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Deney süresince, Testlab Basic yazılımı kullanılarak her 125 milisaniyede bir veri kaydı yapılabilmektedir. Ölçüm kanallarından elde edilen gerilim sinyalleri, bilgisayara bağlı olan doğru akım kartına yönlendirilmekte; bu kart aracılığıyla alınan sinyaller belirli bir hassasiyet düzeyinde değerlendirilerek yazılım üzerinde anlık olarak görselleştirilmektedir. Kullanılan kanallar aracılığıyla tüm veriler eş zamanlı olarak kaydedilmekte, deney sırasında istenilen kanallar yardımıyla anlık grafiksel analizler yapılabilmekte ve deney süreci bu verilerle etkin şekilde takip edilebilmektedir. Kaydedilen veriler, analiz kolaylığı sağlamak amacıyla Excel uyumlu formatta dışa aktarılabilmektedir.



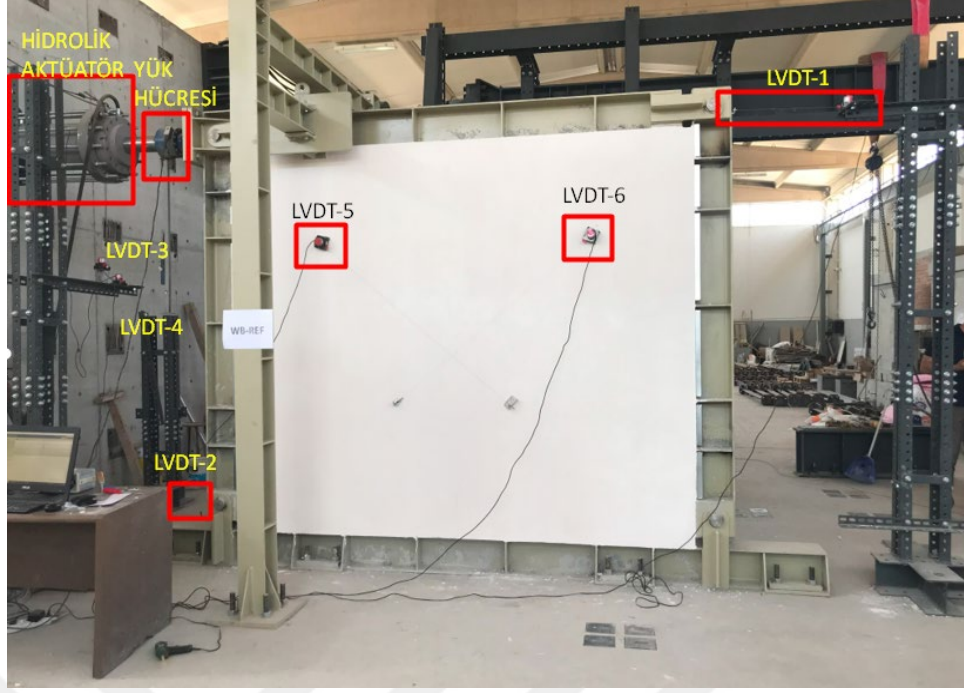
Şekil 2. 9. Veri toplama cihazları

2.3.6 Ölçüm Düzenegi

Deneysel çalışmalarda, ölçüm ekipmanı olarak yük hücresi ve deplasman ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yatay yüklerin itme ve çekme yönlerinde hassas şekilde ölçülebilmesi amacıyla, yük hücresi hidrolik aktüatörün uç kısmına monte edilmiştir. Yer değiştirmelerin izlenebilmesi için toplam beş adet deplasman ölçer sisteme entegre edilmiştir. Tüm ölçümlerin toplanması ve dijital ortama aktarılması amacıyla bir adet veri toplama cihazı kullanılmıştır.

Kiriş seviyesinde meydana gelen yatay ötelenmeleri gözlemlemek üzere, iki adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir. Bu ölçerlerden biri hidrolik aktüatör hizasına konumlandırılmış, diğeri ise bu sistemin ters yönünde yer alacak şekilde düzenlenmiştir. Hidrolik aktüatörün deplasman kontrollü yükleme kapasitesi, 500 mm ölçüm aralığına sahip bir deplasman ölçer yardımıyla sağlanmıştır. Numunenin yatay yükleme altındaki yer değiştirme davranışı ise, temel seviyesinde yatay doğrultuda yerleştirilen mekanik PC ile izlenmiştir.

Ayrıca, numunelerin ön yüzeylerine çapraz yerleştirilen PC'ler aracılığıyla, kesme kapasitesindeki değişimlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ölçüm düzenegini temsil eden örnek bir model Şekil 2.10'da sunulmuştur.



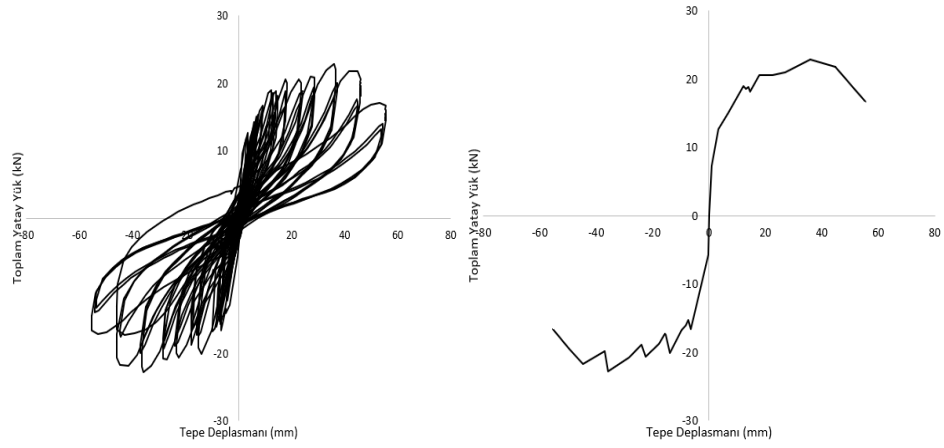
Şekil 2. 10. Tipik bir ölçüm düzeneği

2.3.7 Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Deney numunelerinin yapısal davranış özellikleri, ölçüm sisteminde kullanılan yük hücreleri ve deplasman ölçüm cihazlarından elde edilen veriler doğrultusunda analiz edilmiştir. Bu kapsamda, her bir numune için yük-deplasman histerezis eğrileri ile yük-deplasman zarf eğrileri oluşturulmuştur. Bu bölümde, söz konusu grafiklerin elde edilmesine yönelik veri işleme ve analiz adımları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.3.8 Zarf Eğrisi ve Histerezis Eğrileri

Deney numunelerine uygulanan yüklemeler sonucunda, ölçüm cihazları tarafından kaydedilen veriler, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve ardından Excel ortamına aktarılmıştır. Elde edilen yük ve bu yüke karşılık gelen deplasman verileri kullanılarak histerezis eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğrilerin koordinat bilgileri, Excel ortamında tanımlanan özel bir formül aracılığıyla AutoCAD yazılımının koordinat sistemine uygun hale getirilmiş ve ilgili koordinatlar AutoCAD programına aktarılmıştır. AutoCAD ortamında oluşturulan histerezis eğrilerinin tepe noktalarının birleştirilmesiyle zarf eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2.11’de bu sürece ait bir örnek sunulmaktadır.



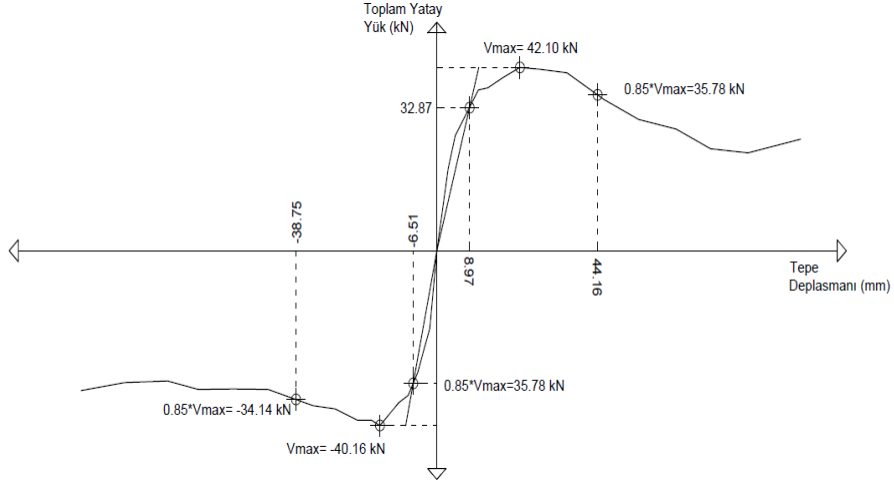
Şekil 2. 11. Histerezis ve zarf eğrisinin çizdirilmesi

2.3.9 Sistem Süneklik Grafikleri

Süneklik, bir yapının taşıma kapasitesinde belirgin bir düşüş meydana gelmeden ulaşabildiği en büyük yer değiştirmenin, akma noktasındaki yer değiştirmeye oranıdır [60]. Tersinir ve tekrarlı yükleme koşullarında, malzeme ve yapısal elemanların sünekliği kritik bir öneme sahiptir. Sistem sünekliğinin belirlenebilmesi için, her numunenin yükleme süreci boyunca veri toplama cihazları aracılığıyla elde edilen ölçümler bilgisayara kaydedilmiş ve Excel ortamına aktarılmıştır. Excel’de, her deney için yük–deplasman verileri belirli bir formül yardımıyla AutoCAD’in koordinat formatına dönüştürülmüştür. Koordinata çevrilen bu veriler AutoCAD’e aktarılmış ve yük–deplasman eğrileri çizdirilmiştir.

Eğriler üzerinde, "Line" komutu kullanılarak tepe noktalar belirlenmiş ve birbirine bağlanarak zarf eğrisi oluşturulmuştur. Zarf eğrisi üzerinde hem ileri hem de geri çevrimlerde yatay doğrultudaki maksimum yük (V_{max}) işaretlenmiştir. Ardından, maksimum yükün %15 azaldığı ($0.85 V_{max}$) noktalar belirlenmiştir [61]. İleri ve geri çevrimlerde taşıma kapasitesinin %80 seviyesine düştüğü noktalardan geçirilen sekant eğrisi, maksimum yatay yük ile kesiştiği noktada işaretlenmiştir.

Bu kesişim noktasının yatay eksene olan uzaklığı akma deplasmanı (δ_y) olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde, $0.85 V_{max}$ değerinin yatay eksene karşılık gelen deplasmanı, maksimum kopma deplasmanı (δ_u/δ_y) olarak kabul edilmiştir. δ_y oranı hesaplanarak sistemin süneklik değeri elde edilmiştir ve Şekil 2.12’de sunulmuştur.



Şekil 2. 12. Sistem sünekliğinin belirlenmesi

Bu çalışmada, bölme duvarların yük–deplasman eğrisinde doğrusal davranıştan sapmanın başladığı ve sistem rijitliğinde belirgin bir azalma gözlemlenen nokta, referans olarak kabul edilmiş ve “akma noktası” şeklinde, maksimum yükün %85’inin altına düştüğü nokta ise “göçme noktası” olarak adlandırılmıştır. Süneklik ve enerji tüketim değerleri bu noktalar kapsamında ele alınmıştır.

2.3.10 Rijitlik Azalım Grafikleri

Yatay doğrultuda uygulanan tersinir ve tekrarlı yüklemeler sırasında, plastik mafsall oluşumu nedeniyle deney numunelerinin rijitliklerinde azalma gözlenmektedir. Deney verileri analiz edilerek, her çevrim için yük–deplasman eğrisinin eğimi hesaplanmış ve bu şekilde rijitlik değerleri belirlenmiştir. Her çevrimde yük–deplasman grafiğinden okunan yatay yük değerleri F_1 ve F_2 , yatay deplasman değerleri ise δ_1 ve δ_2 olarak tanımlanırsa, ilgili çevrimin rijitliği (ϕ) Denklem 3.2’de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

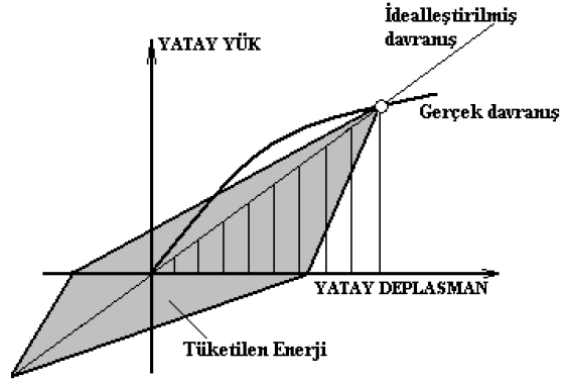
$$Rijitlik(\phi) = \frac{(|F_1| + |F_2|)}{(|\delta_1| + |\delta_2|)} \quad (\text{Denklem 2. 1})$$

Hesaplanan rijitlik değerlerinin, kat deplasmanının kat yüksekliğine oranı ile ilişkisi grafik üzerinde gösterilerek rijitlik azalımını ifade eden grafikler oluşturulmuştur (Şekil 3.52).

2.3.11 Tüketilen Enerji Grafikleri

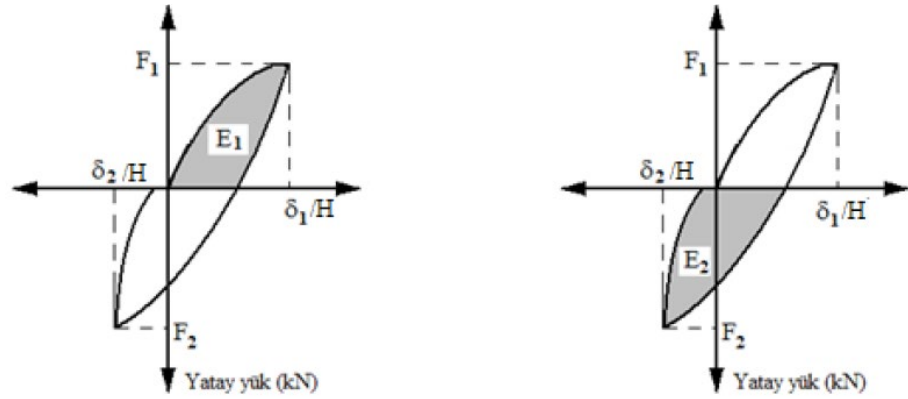
Deneyssel çalışmada, tersinir-tekrarlı yatay yükler altında numuneler, enerjinin bir kısmını şekil değiştirerek (deformasyon yoluyla) sönümler. Dinamik yükleme koşullarında bu enerji tüketimi oldukça önemlidir. Enerji, yapılan iş miktarıyla

ilişkilidir ve iş, kuvvet ile kat edilen yolun çarpımı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, numunelerin tükettiği enerji, çevrimler sırasında oluşan yük–deplasman eğrisinin altında kalan alan ile ifade edilir (Şekil 3.54) [62].



Şekil 2. 13. Tüketilen enerji [43]

Sistem tarafından tüketilen enerji, her çevrim için ileri (E_1) ve geri (E_2) yükleme sırasında oluşan enerji alanlarının hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Bu iki alanın toplamı, ilgili çevrimde harcanan enerjiyi vermektedir. Her çevrimde elde edilen enerji değerleri, bir sonraki çevrimlerin değerlerine eklenerek toplam kümülatif enerji hesaplanmıştır (Şekil 2.14). Çalışmada, deney numunelerinin her çevrimde tükettikleri enerji miktarlarını ve bu enerjilerin kümülatif değerlerini gösteren grafikler ayrı ayrı sunulmuştur.

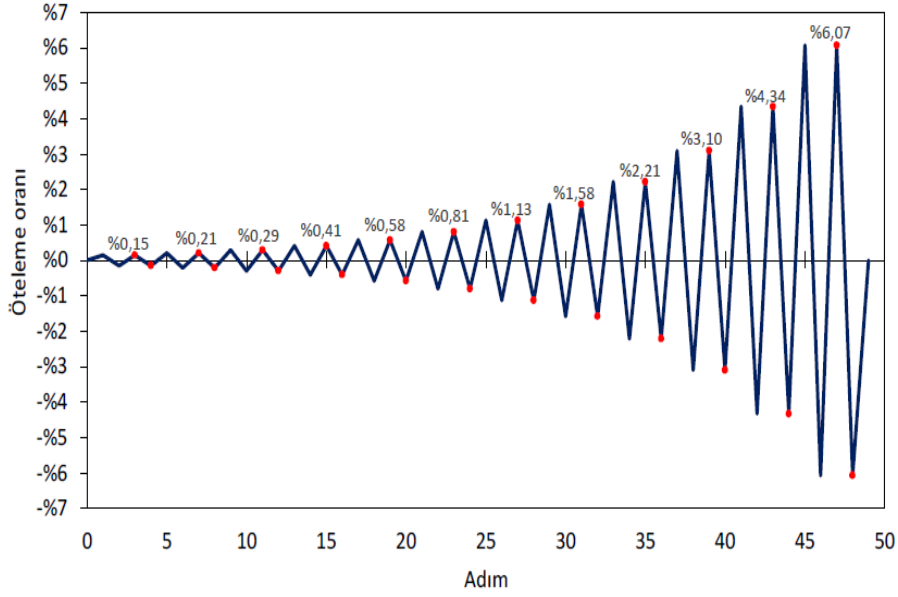


Şekil 2. 14. Toplam tüketilen enerji değerinin hesaplanması [63]

2.3.12 Yükleme Protokolünün Belirlenmesi

Deneylerde uygulanan yükleme senaryosu, deplasman kontrollü olacak şekilde tasarlanmıştır. Quasi-statik analizlerde güvenilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesi açısından, yükleme protokolü seçimi temel parametrelerden biridir. Literatürde çeşitli yükleme protokolleri önerilmiş olup, uygun protokol seçimi hem

hidrolik aktüatörün kapasitesi hem de test edilecek numunenin yapısal özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu çalışmada, benzer araştırmalarda yaygın olarak tercih edilen ve uluslararası geçerliliğe sahip olan FEMA 461 protokolünün en uygun seçenek olduğu değerlendirilmiş ve deneylerde bu protokol esas alınmıştır. FEMA 461'e ait yükleme protokolü Şekil 2.15'te sunulmaktadır.



Şekil 2. 15. Yükleme Protokolü (FEMA 461)

Şekil 2.15'te sunulan yükleme protokolü, başlangıçta %0,15 öteleme oranıyla başlamakta olup, her adımda yaklaşık 1,4 kat artacak şekilde %6,07 öteleme oranına kadar ilerlemektedir. Her bir öteleme seviyesinde iki tam çevrim uygulanmış ve ardından bir sonraki öteleme seviyesine geçilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.15'te belirtildiği üzere, her öteleme oranının ikinci itme ve çekme çevrimleri sonrasında deney süreci durdurularak numunelerde oluşan hasar durumu detaylı şekilde gözlemlenmiştir.

3.DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

Bu bölümde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, 4 adet deney numunesi 4 noktadan mafsallı çelik çerçeve sistemi içerisine yerleştirilmiş ve tersinir–tekrarlı yanal yükler altında test edilmiştir. Tüm numuneler, malzeme ve işçilik özellikleri açısından özdeş olacak şekilde imal edilmiş; yalnızca sıva kaplama tipi, deney parametresi olarak farklılaştırılmıştır.

Deney numunelerinin tanımları şu şekildedir:

- REF-2: Herhangi bir sıva tabakasına sahip olmayan yalın duvar. Bu numune, sıva varlığının yapısal davranış üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla referans olarak seçilmiştir.
- REF: Her iki yüzeyi geleneksel çimento–kum karışımı harç ile sıvanmış duvar. Bu numune, sıva uygulamasının yapısal performansa katkısını değerlendirmek üzere test edilmiştir.
- FRCM-2: Dolgu duvarların güçlendirilmesi amacıyla, her iki yüzeyi B-FRCM (Basalt Fabric-ReinforcedCementitiousMatrix) sistemi ile kaplanmış, kaplama malzemesi olarak sektörde özellikle tarihi yapılarda yaygın kullanılan hidrolik kireç esaslı onarım harcı tercih edilmiştir.
- CBSM-FRCM: FRCM-2 ile aynı güçlendirme sistemine sahip olup tek fark olarak kaplama malzemesi çimento esaslı onarım harcıdır. Bu numune, sıva tipinin B-FRCM güçlendirme performansına etkisini belirlemek üzere test edilmiştir.

Deneysel çalışmalardan maksimum veri çeşitliliği sağlamak amacıyla, her numuneye farklı noktalara yerleştirilmiş yük hücreleri ve deplasman ölçerler bağlanmıştır. Yükleme, uluslararası geçerliliğe sahip FEMA-461 yükleme protokolü kullanılarak, deplasman kontrollü biçimde uygulanmıştır. Testler, numunelerin yapısal elemanlarında belirgin ve ilerleyici hasarlar oluşana kadar sürdürülmüştür.

Deneyler sırasında, yükleme protokolündeki her çevrimde ölçülen yük–deplasman değerleri ile bu değerlere karşılık gelen hasar durumları ayrıntılı olarak

kayıt altına alınmıştır. Böylece, her numunenin göçme sürecini ortaya koyan ayrıntılı hasar tablosu oluşturulmuş ve ilgili numune başlığı altında sunulmuştur.

Yüklemeler adım adım uygulanmış, yükleme hızı ise çatlak oluşum ve ilerleme sürecinin gözlenebileceği şekilde ayarlanmıştır. Her çevrim sonunda numune detaylı olarak incelenmiş, yeni oluşan veya mevcut çatlaklarında ilerleme gözlenen bölgeler tespit edilmiştir. Çatlaklar, farklı renklerde işaretleyiciler kullanılarak belirgin hale getirilmiş, olduğu çevrim numune üzerine işaretlenmiştir. Deney süresince video kayıtları alınmış, her çevrimde oluşan hasarlar fotoğraflanarak arşivlenmiştir.

Elde edilen verilerin daha iyi analiz edilebilmesi ve numuneler arasındaki performans farklarının net olarak ortaya konulabilmesi amacıyla, her numune için aşağıdaki grafik ve tablolar hazırlanmıştır:

- Yatay yük–kat deplasman grafikleri (zarf eğrileri ve histerezis eğrileri)
- Rijitlik azalım grafikleri
- Sistem süneklik değerleri tabloları
- Tüketilen enerji grafikleri

3.1. Deney Sonuçları

3.1.1. REF-2 (Yalın duvar numunesi)

REF-2 numunesi, herhangi bir güçlendirme uygulaması veya sıva tabakası içermeyen yalın dolgu duvar olarak tasarlanmıştır. Numuneye ait genel görünüşler Şekil 3.1’de sunulmuştur.



(a) Ön yüz



(b) Arka yüz

Şekil 3. 1. REF-2 numunesi

REF-2 numunesi, laboratuvar ortamında deprem etkilerini benzeştiren tersinir ve tekrarlı yatay yükler altında yarı-statik olarak test edilmiştir. Deney süresince gözlemlenen hasar gelişimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



(a) Ön yüz



(b) Arka yüz

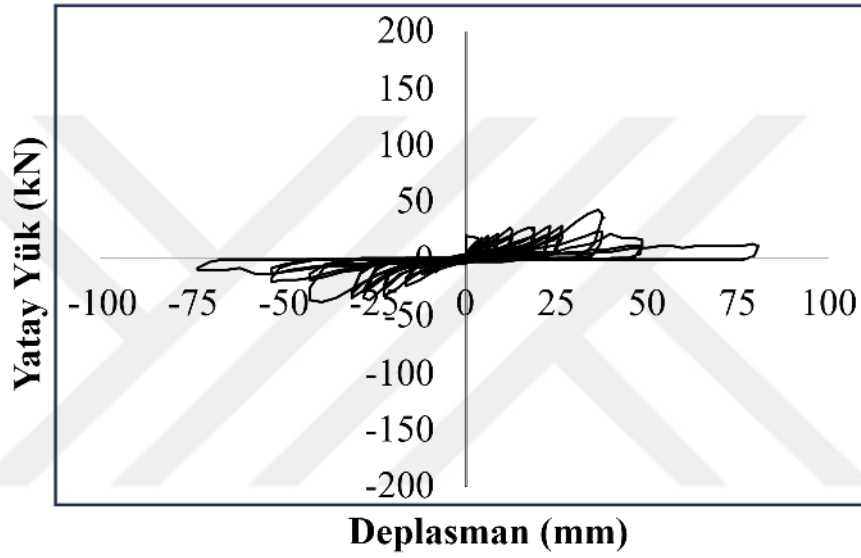
Şekil 3. 2. REF-2 numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar

Uygulanan yükleme protokolü kapsamında, deney boyunca numune üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarından elde edilen veriler kullanılarak çeşitli yapısal

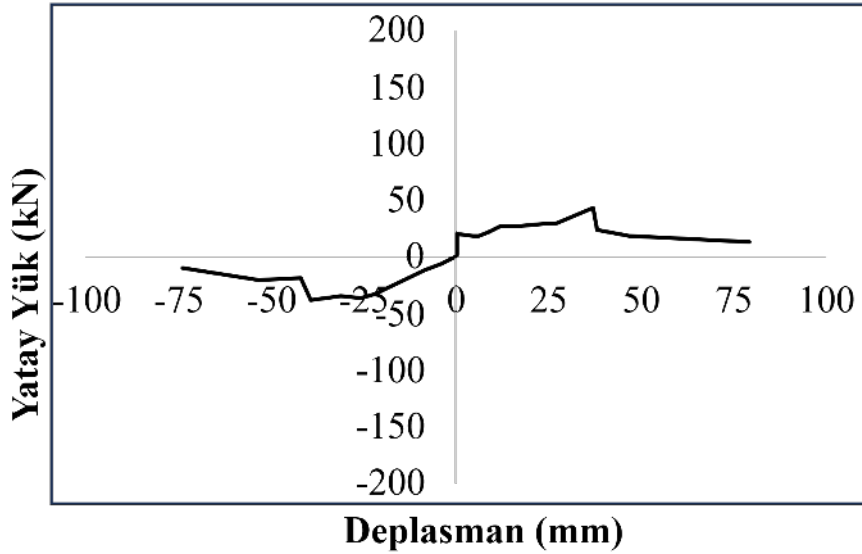
davranış grafik ve tabloları oluşturulmuştur. Bu kapsamda elde edilen grafikler aşağıda belirtilmiştir:

- Yük–Deplasman grafiği (Histerezis eğrisi) – Şekil 3.3
- Yük–Deplasman grafiği (Zarf eğrisi) – Şekil 3.4
- Sistem rijitlik azalım grafikleri – Şekil 3.5
- Tüketilen enerji grafikleri – Şekil 3.6

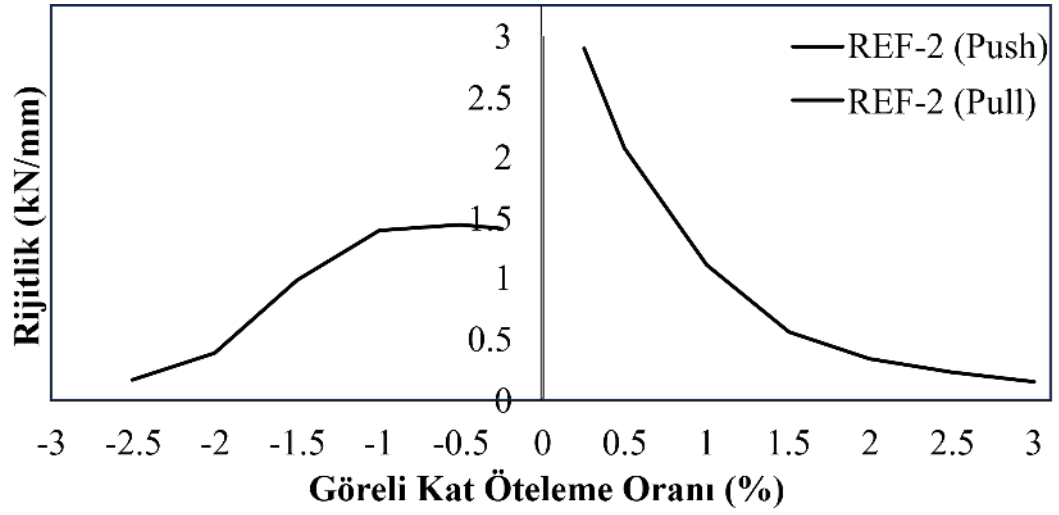
Bu grafiklerden elde edilen bulgular ve diğer numuneler ile karşılaştırmalı değerlendirmeler Bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.



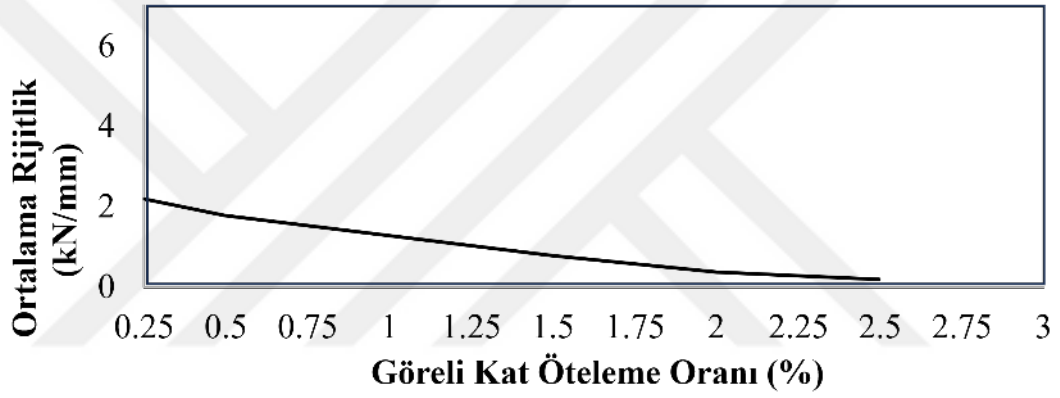
Şekil 3. 3. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)



Şekil 3. 4. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)

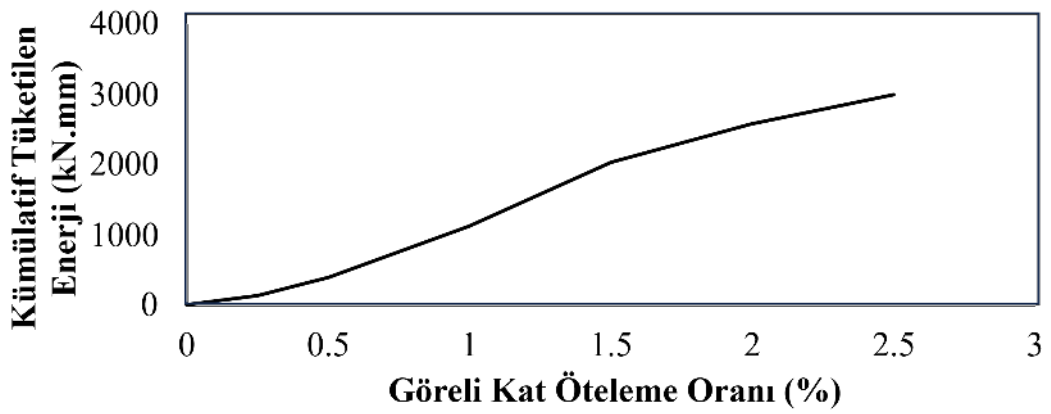


a) Rijitlik-1

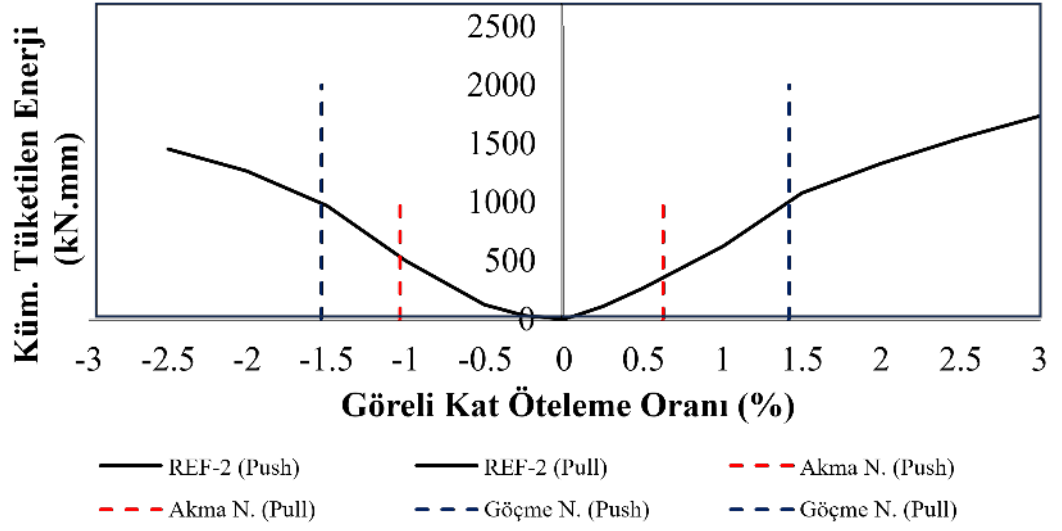


b) Rijitlik-2

Şekil 3. 5. Sistem rijitlik azalım grafikleri



a) Kümülatif enerji tüketimi-1



b) Kümülatif enerji tüketimi-2

Şekil 3. 6. Enerji tüketim grafikleri

3.1.2. REF (Geleneksel harç sıvalı duvar numunesi)

REF numunesi, her iki yüzeyi geleneksel çimento-kum harcı ile sıvanmış dolgu duvar örneğidir. Numuneye ait genel görünüşler Şekil 3.7’de sunulmuştur.



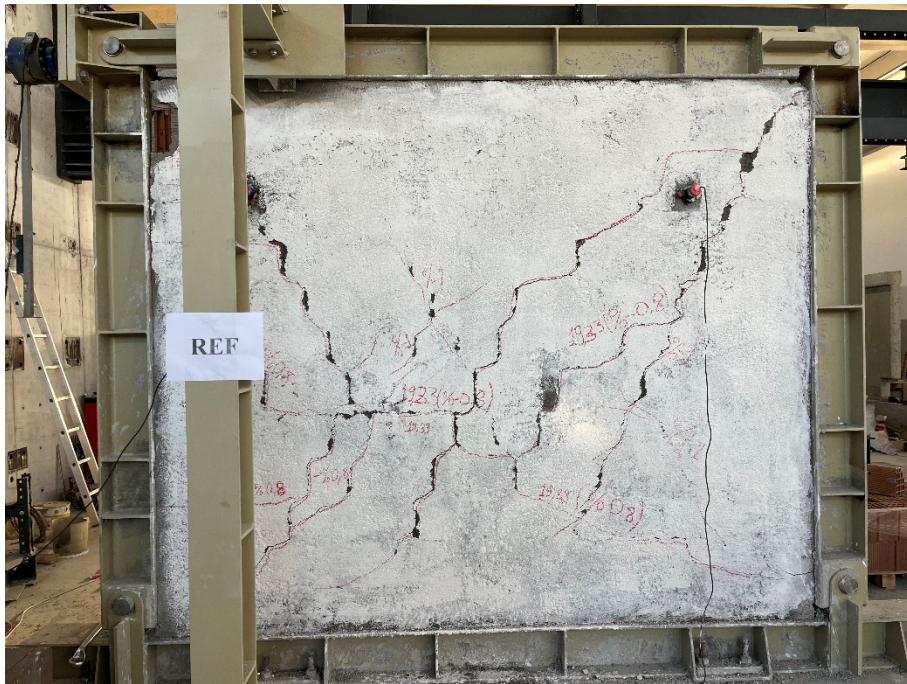
(a) Ön yüz



(a) Arka yüz

Şekil 3. 7. REF numunesi

REF numunesi, laboratuvar ortamında deprem etkilerini benzeştiren tersinir ve tekrarlı yatay yükler altında yarı-statik olarak test edilmiştir. Deney süresince gözlemlenen hasar gelişimi Şekil 3.8’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



(a) Ön yüz



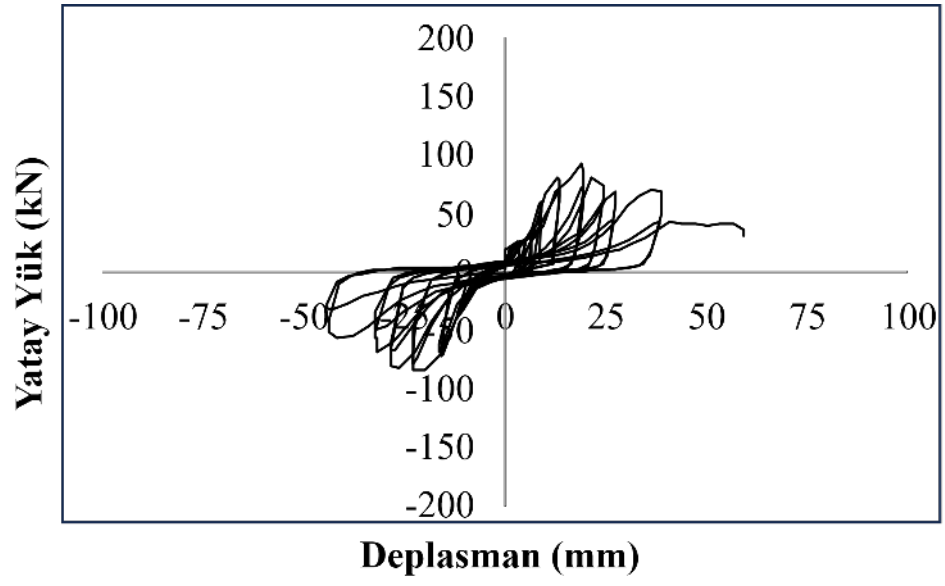
(a) Arka yüz

Şekil 3. 8. REF numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar

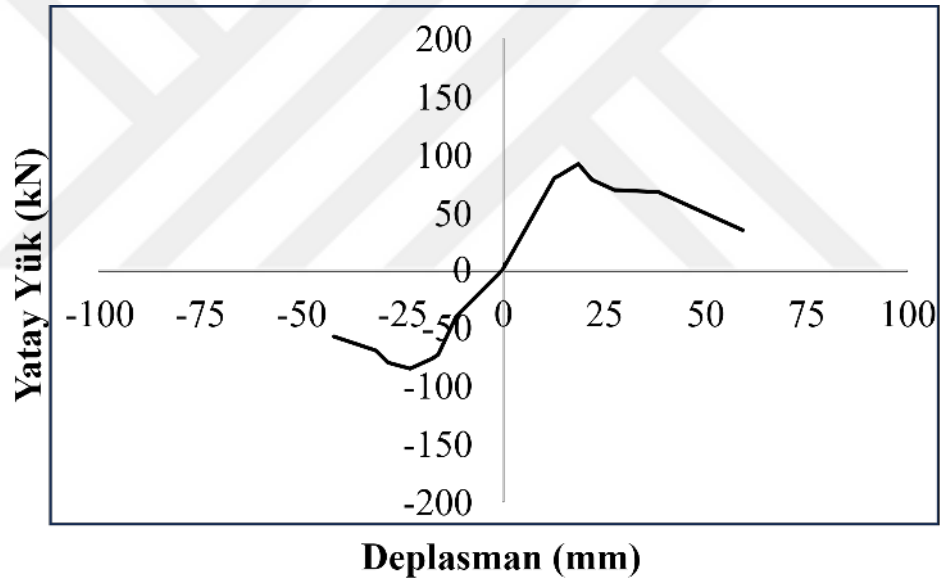
Uygulanan yükleme protokolü kapsamında, deney boyunca numune üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarından elde edilen veriler kullanılarak çeşitli yapısal davranış grafik ve tabloları oluşturulmuştur. Bu kapsamda elde edilen grafikler aşağıda belirtilmiştir:

- Yük–Deplasman grafiği (Histerezis eğrisi) – Şekil 3.9
- Yük–Deplasman grafiği (Zarf eğrisi) – Şekil 3.10
- Sistem rijitlik azalım grafikleri – Şekil 3.11
- Tüketilen enerji grafikleri – Şekil 3.12

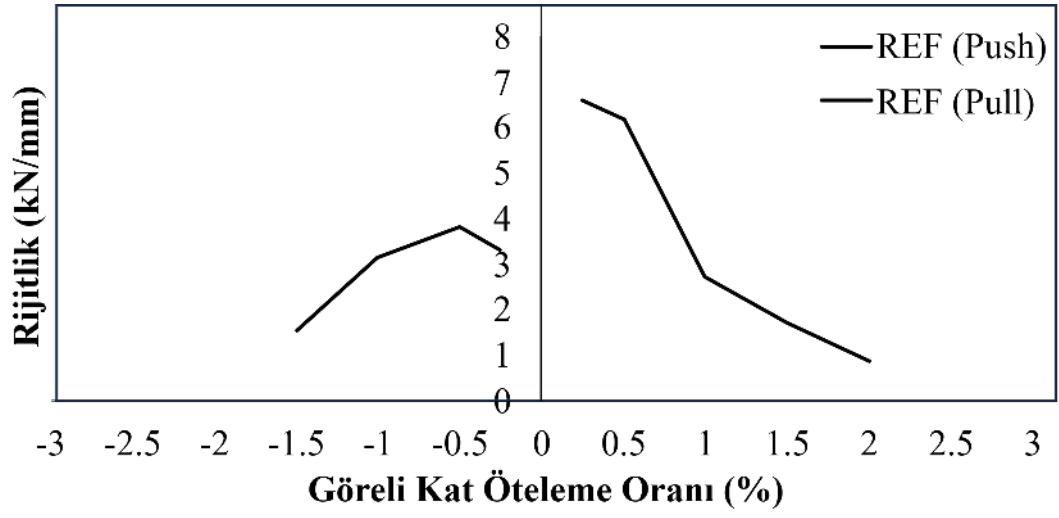
Bu grafiklerden elde edilen bulgular ve diğer numuneler ile karşılaştırmalı değerlendirmeler Bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.



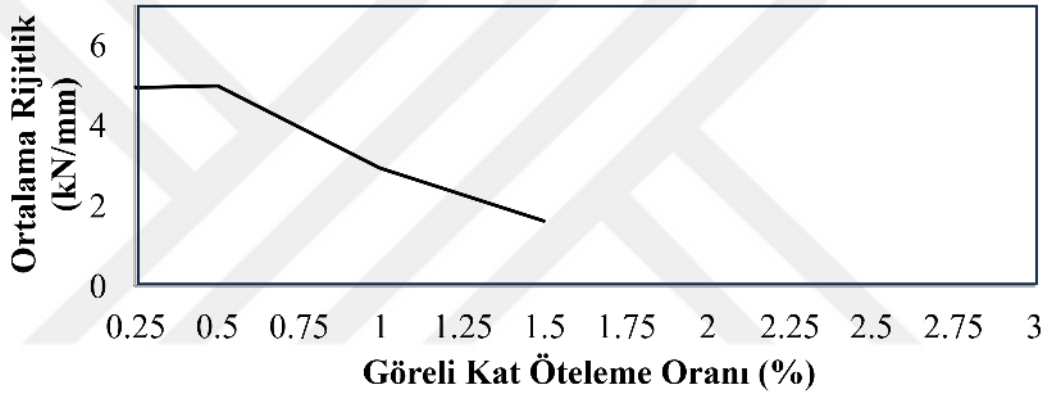
Şekil 3. 9. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)



Şekil 3. 10. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)

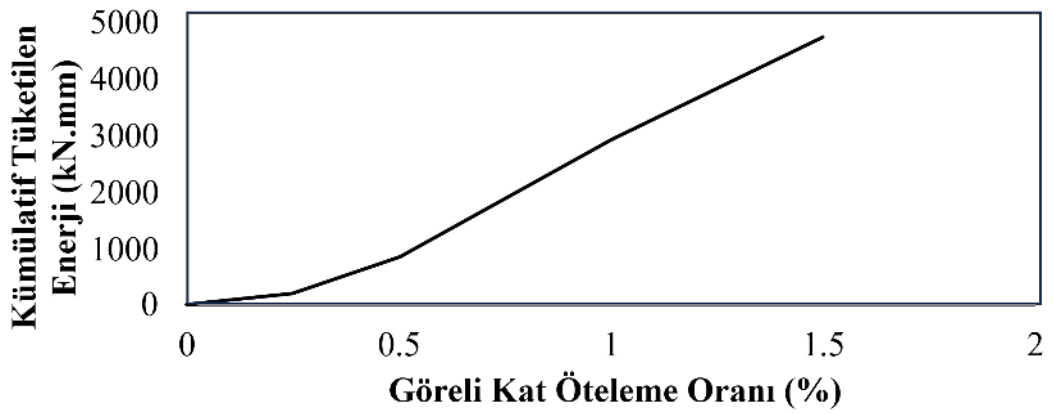


c) Rijitlik-1

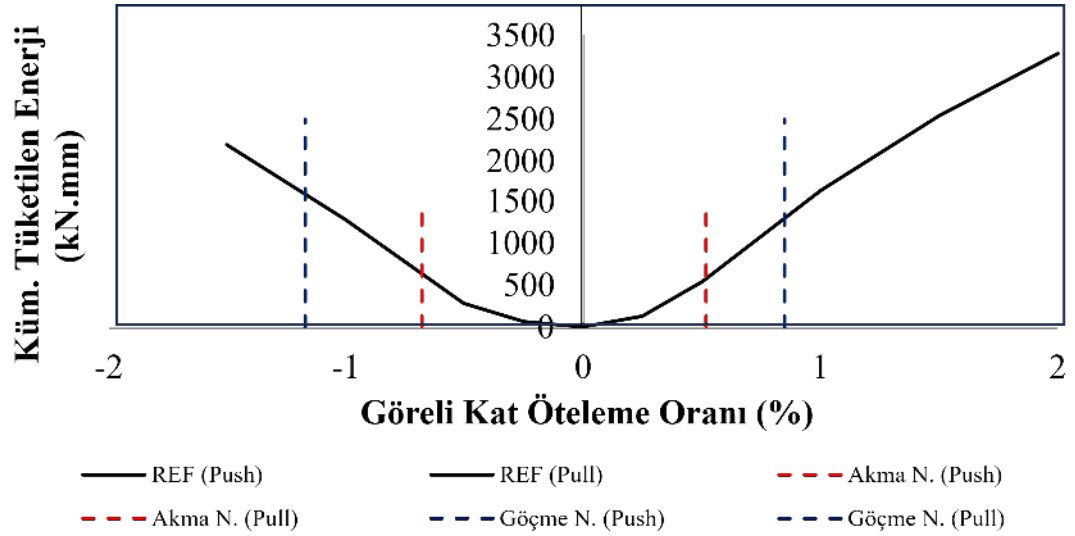


d) Rijitlik-2

Şekil 3. 11. Sistem rijitlik azalım grafikleri



c) Kümülatif enerji tüketimi-1



d) Kümülatif enerji tüketimi-2

Şekil 3. 12. Enerji tüketim grafikleri

3.1.3. FRM-2 (B-FRCM + Hidrolik kireç esaslı onarım harçlı sıva)

FRM-2 numunesi, duvarın her iki yüzüne B-FRCM tipi malzeme uygulanarak güçlendirilmiş ve kaplama olarak sektörde, özellikle tarihi yapıların onarımında yaygın biçimde tercih edilen hidrolik kireç esaslı onarım harcı ile sıvanmış örnektir. Numuneye ait genel görünüşler Şekil 3.13’de sunulmuştur.



(a) Ön yüz



(b) Arka yüz

Şekil 3. 13. FRCM-2 numunesi

FRCM-2 numunesi, laboratuvar ortamında deprem etkilerini benzeştiren tersinir ve tekrarlı yatay yükler altında yarı-statik olarak test edilmiştir. Deney süresince gözlemlenen hasar gelişimi Şekil 3.14’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



(a) Ön yüz



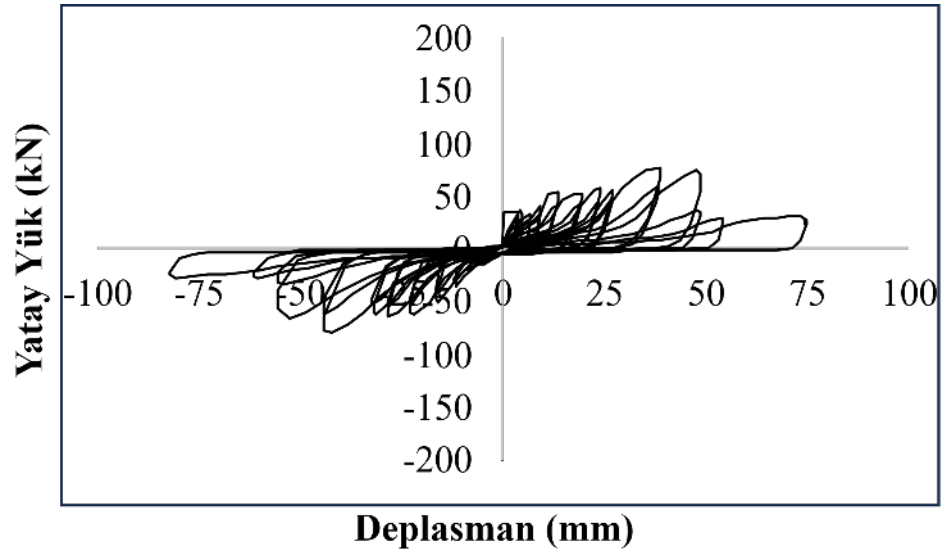
(b) Arka yüz

Şekil 3. 14. FRCM-2 numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar

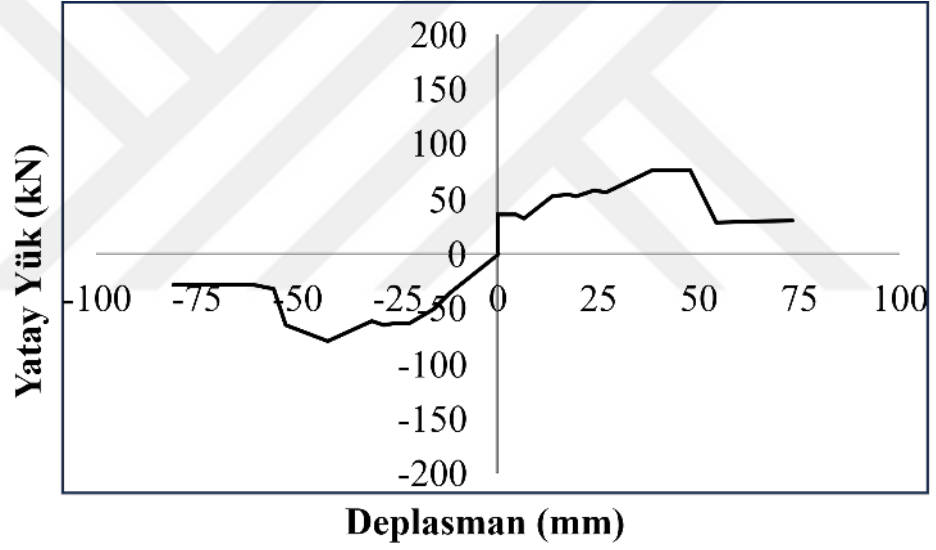
Uygulanan yükleme protokolü kapsamında, deney boyunca numune üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarından elde edilen veriler kullanılarak çeşitli yapısal davranış grafik ve tabloları oluşturulmuştur. Bu kapsamda elde edilen grafikler aşağıda belirtilmiştir:

- Yük–Deplasman grafiği (Histerezis eğrisi) – Şekil 3.15
- Yük–Deplasman grafiği (Zarf eğrisi) – Şekil 3.16
- Sistem rijitlik azalım grafikleri – Şekil 3.17
- Tüketilen enerji grafikleri – Şekil 3.18

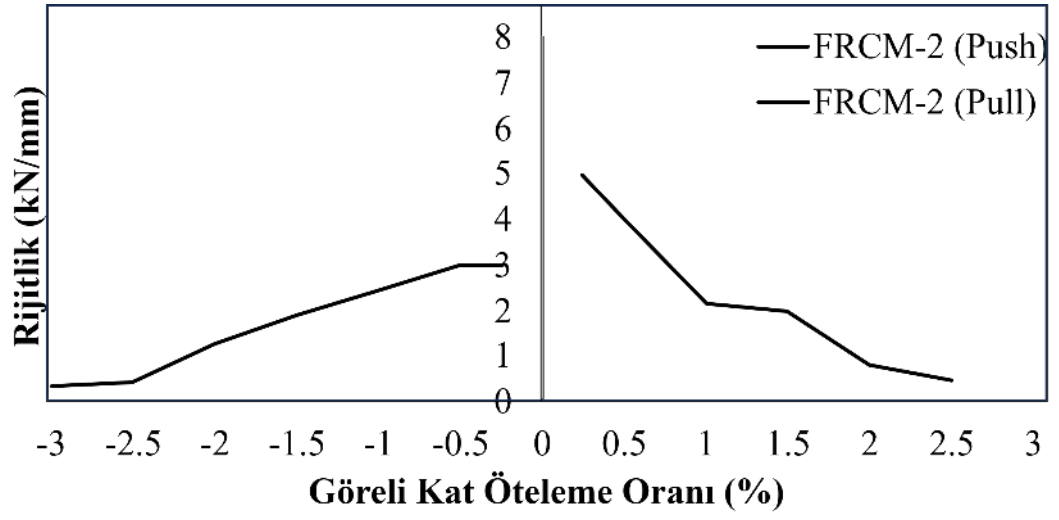
Bu grafiklerden elde edilen bulgular ve diğer numuneler ile karşılaştırmalı değerlendirmeler Bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.



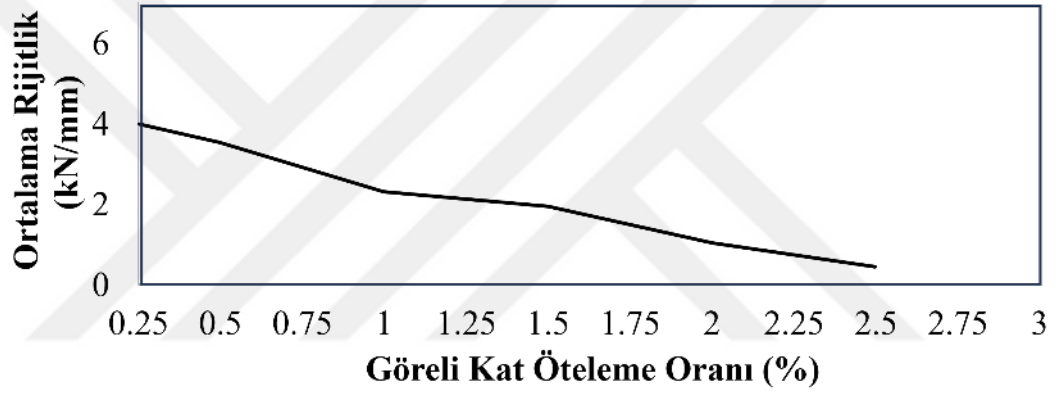
Şekil 3. 15. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)



Şekil 3. 16. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)

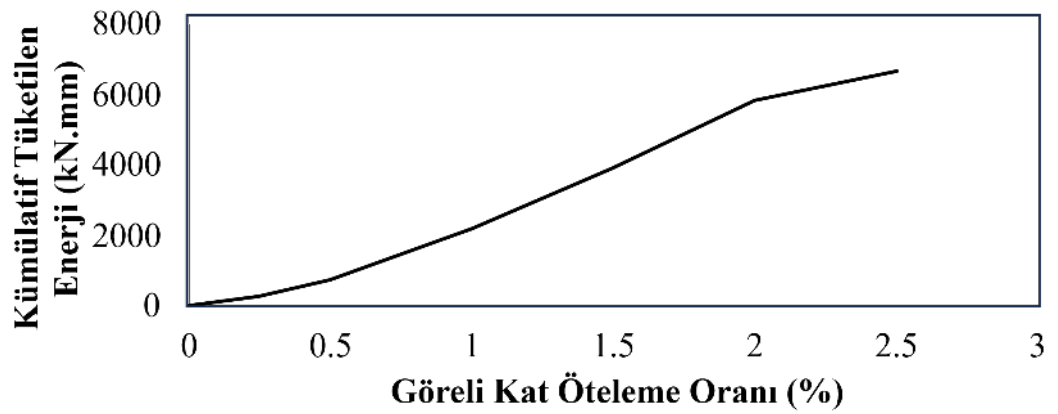


e) Rijitlik-1

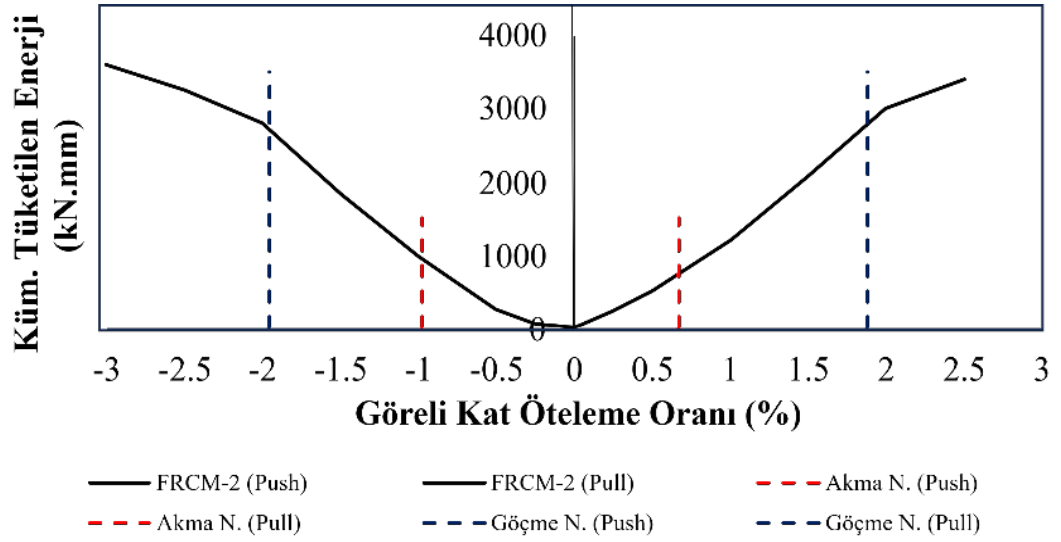


f) Rijitlik-2

Şekil 3. 17. Sistem rijitlik azalım grafikleri



e) Kümülatif enerji tüketimi-1



f) Kümülatif enerji tüketimi-2

Şekil 3. 18. Enerji tüketim grafikler

3.1.4. CBSM-FRCM (B-FRCM + Çimento esaslı onarım harçlı sıva)

CBSM-FRCM numunesi, duvarın her iki yüzeyine B-FRCM tipi malzeme uygulanarak güçlendirilmiş ve kaplama olarak çimento esaslı onarım harcı kullanılmış örnektir. Numuneye ait genel görünüşler Şekil 3.19’da sunulmuştur.



(a) Ön yüz



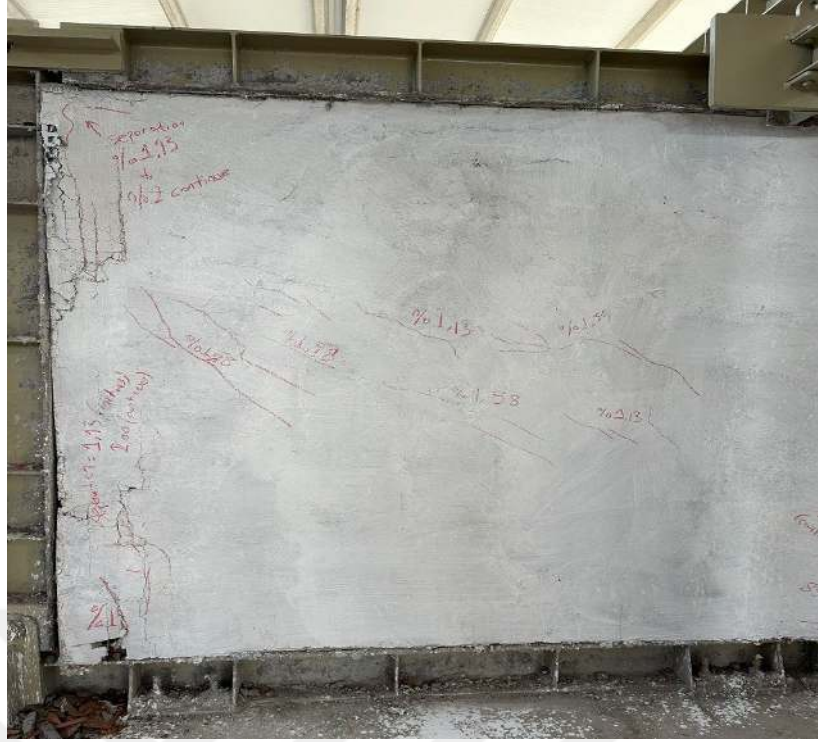
(b) Arka yüz

Şekil 3. 19. CBSM-FRCM numunesi

CBSM-FRCM numunesi laboratuvar ortamında depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deney esnasında gözlemlenen hasar gelişimi Şekil 3.20’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.



(a) Ön yüz

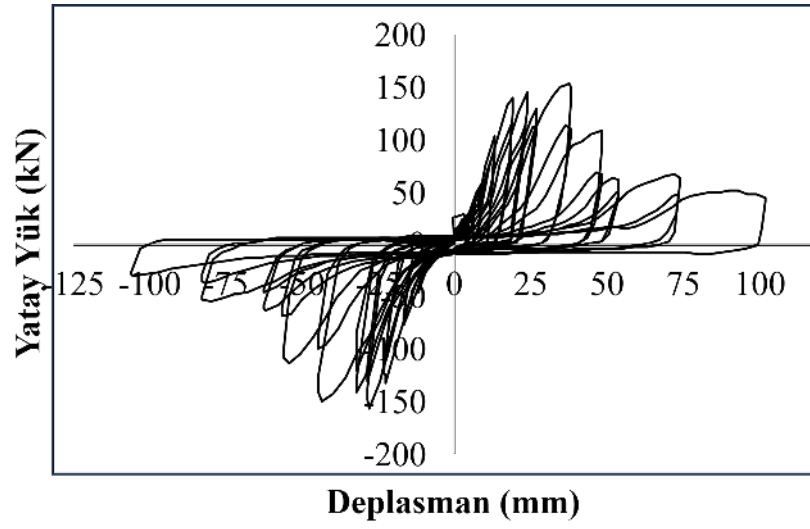


(b) Arka yüz

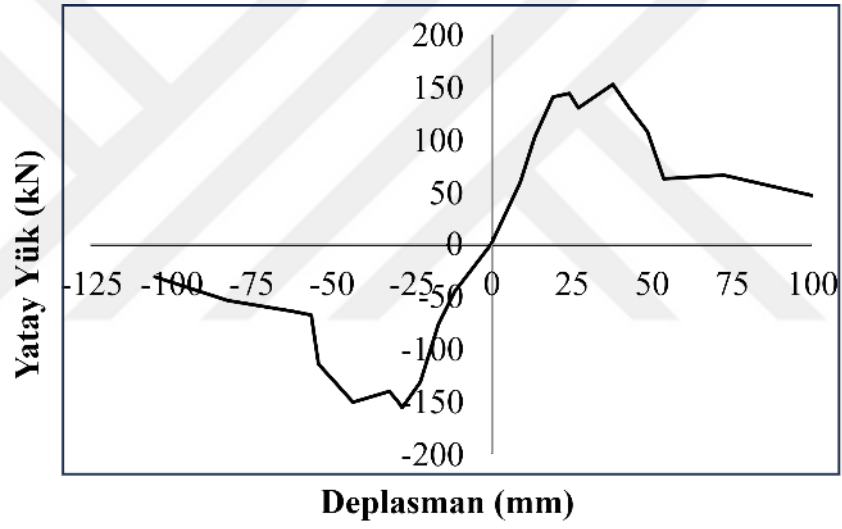
Şekil 3. 20. CBSM-FRCM numunesinin deney anında ve sonrasında çekilen hasarlar

Tersinir ve tekrarlanır yatay yükleme altında deneyi yapılan numuneye bağlı ölçüm cihazlarından elde edilen veriler kullanılarak aşağıda sırayla verilen grafikler elde edilmiştir. Grafiklerden elde edilen bulgular ve bu bulguların diğer numunelerle karşılaştırılması Bölüm 4.2’de verilmiştir.

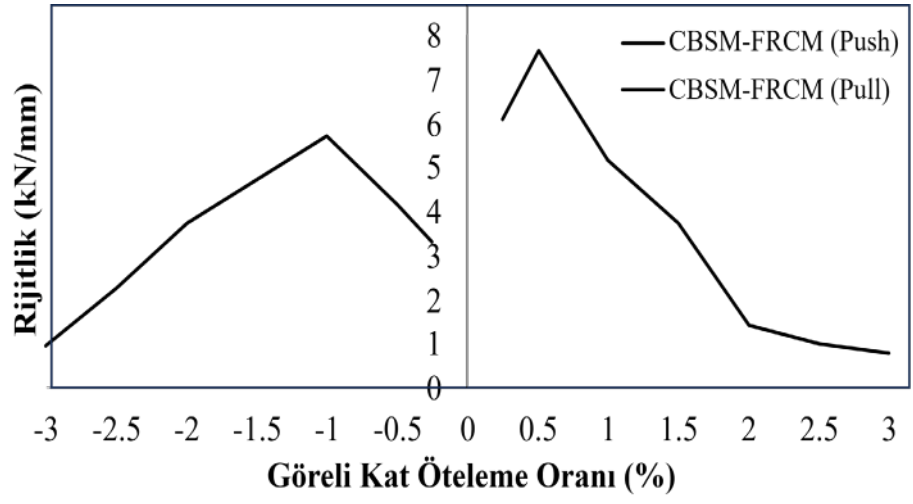
- 1- Yük- Deplasman grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.21’de
- 2- Yük- Deplasman grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.22’de
- 3- Sistem rijitlik azalım grafikleri Şekil 3.23’te
- 4- Tüketilen enerji grafikleri Şekil 3.24’te



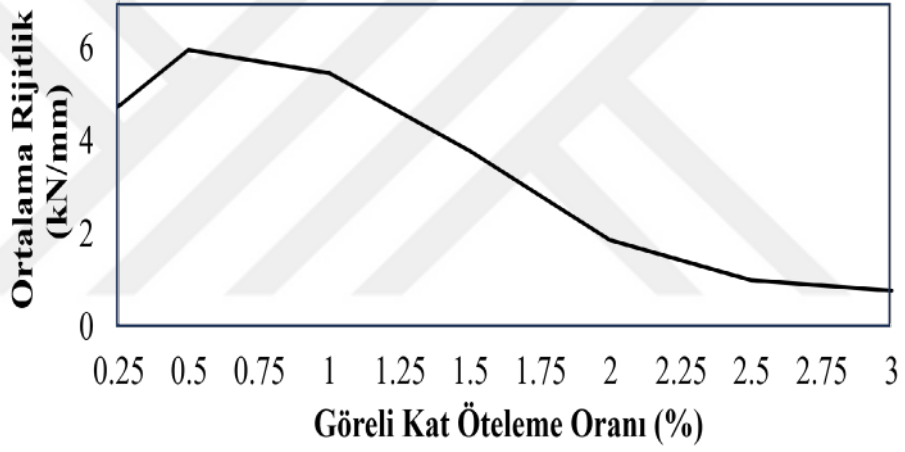
Şekil 3. 21. Yük – Deplasman Grafiği (Histerezis Eğrisi)



Şekil 3. 22. Yük – Deplasman Grafiği (Zarf Eğrisi)

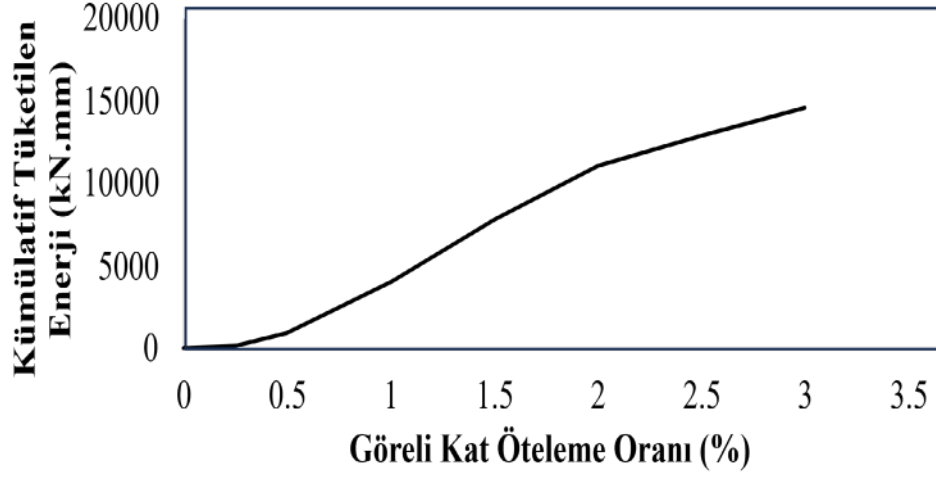


g) Rijitlik-1

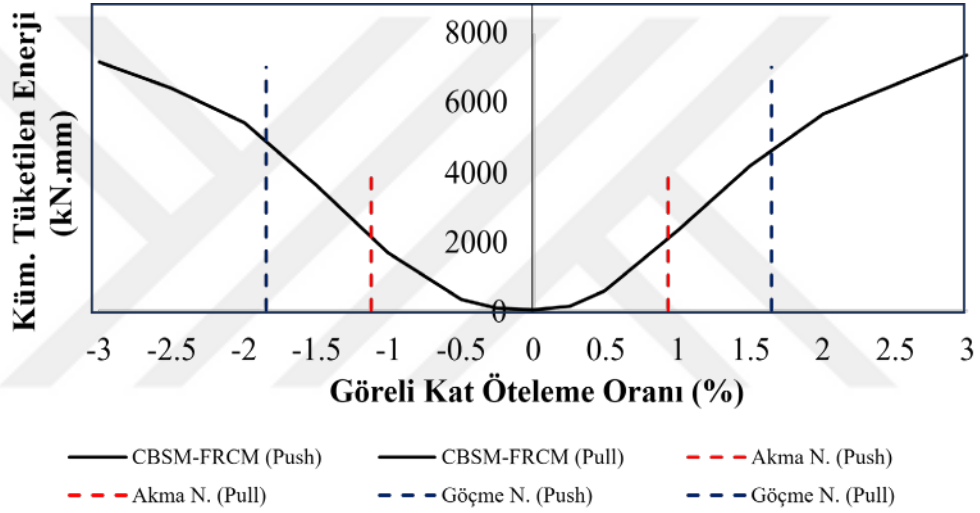


h) Rijitlik-2

Şekil 3. 23. Sistem rijitlik azalım grafikleri



g) Kümülatif enerji tüketimi-1



h) Kümülatif enerji tüketimi-2

Şekil 3. 24. Enerji tüketim grafikleri

3.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen dört farklı deneyden elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Numunelere ait kısaltmalar ve açıklamalar Tablo 3.1’de verilmiştir. Değerlendirme sürecinde, özellikle sıva tipinin ve sıva varlığının duvar davranışı üzerindeki etkileri ile B-FRCM güçlendirme sistemlerinin performansa katkıları temel bulgular olarak ele alınmıştır.

Deney numunelerinden REF-2, herhangi bir güçlendirme veya sıva tabakası içermeyen yalın duvarı temsil etmektedir. REF numunesi ise geleneksel çimento–kum harcı ile sıvanmış, ancak güçlendirme uygulanmamış bir duvardır. Bu iki numune arasındaki karşılaştırmalar, sıvanın varlığının yapısal davranışa olan etkilerini ortaya koymakta; sıvasız duvarların performansındaki yetersizlikler

belirlenerek hem mevcut hem de yeni inşa edilecek yapılar için teknik çıkarımlar ve öneriler sunulmaktadır.

B-FRCM güçlendirme uygulamalarında ise sektörde yaygın olarak kullanılan hidrolik kireç esaslı onarım harcı ile çimento esaslı onarım harcı karşılaştırılmış; her iki harcın üstün ve zayıf yönleri belirlenerek mühendislik uygulamaları açısından önemli değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, bu tip güçlendirmelerin hem geleneksel harçlı hem de sıvasız duvarlara kıyasla sağladığı avantajlar ve olası kısıtları da tespit edilmiştir.

Karşılaştırma ve değerlendirmeler, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş grafikler ve tablolar üzerinden yürütülmüştür. Bu kapsamda incelenen başlıca veri setleri şunlardır:

- Toplam yatay yük–tepe deplasmanı zarf eğrileri
- Rijitlik azalım grafiği
- Enerji tüketim grafikleri
- Sistem süneklik değerleri
- Yatay yük taşıma kapasitelerinin artış oranlarını gösteren tablolar
- Sistem süneklik artış oranları tabloları
- Maksimum yükteki rijitlik değerleri ve rijitlik oranları tabloları
- Kümülatif toplam enerji tüketim değerleri ve oranları tabloları

Tablo 3. 1. Deneysel numune kısaltmaları ve açıklamaları

Numune	Açıklama
REF-2	Yalın-sıvasız duvar
REF	Geleneksel harçla sıvalı duvar
FRCM-2	B-FRCM + Hidrolik kireç esaslı onarım harcı ile sıvalı duvar
CBSM-FRCM	B-FRCM + Çimento esaslı onarım harcı ile sıvalı duvar

3.2.1. Yatay Yük Taşıma Kapasitesi

Numuneler, tekrarlı ve tersinir yatay yükler altında kiriş hizasından yük ve deplasman ölçümleri yapılarak test edilmiştir. Deneysel prosedür kapsamında her yükleme çevrimine ait yük–deplasman histerezis eğrileri elde edilmiş, çevrimlerde ulaşılan pik noktalar işaretlenmiş ve bu noktalar kullanılarak yük–deplasman zarf eğrileri oluşturulmuştur. Numunelere ait zarf eğrileri Şekil 3.25’de sunulmaktadır.

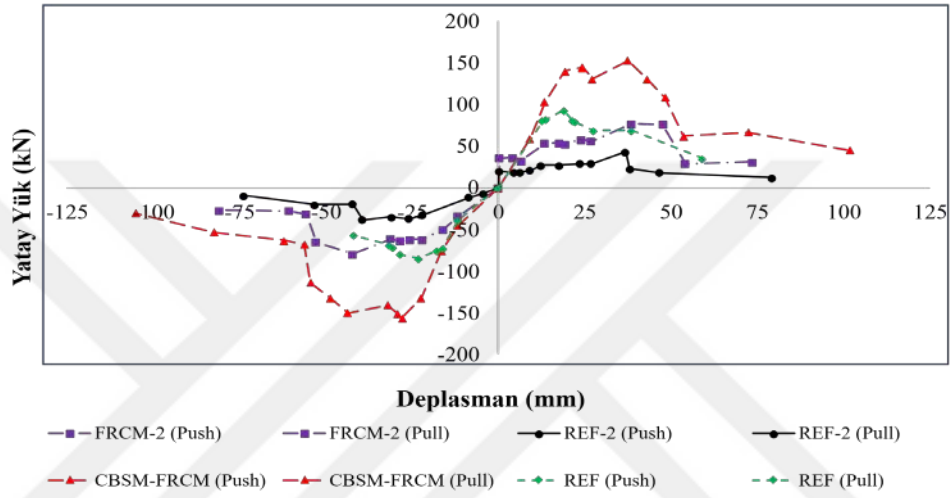
Elde edilen veriler, yalın-sıvasız duvar (REF-2) ile karşılaştırıldığında hem geleneksel harç ile sıvalı duvarın (REF) hem de B-FRCM esaslı güçlendirilmiş duvarların (FRCM-2 ve CBSM-FRCM) yatay yük taşıma kapasitelerinde belirgin artışlar olduğunu göstermektedir. Tablo 3.2’de numunelerin itme ve çekme yönlerindeki maksimum yatay yük değerleri, bu yüklerin meydana geldiği tepe deplasmanları ve REF-2’ye göre yüzdesel değişim oranları sunulmaktadır. REF-2 numunesi, 43.1 kN (itme) ve 38.5 kN (çekme) maksimum yatay yük kapasitesine ulaşmıştır. Geleneksel harç sıvalı REF numunesi, REF-2’ye kıyasla itme yönünde %115.5, çekme yönünde ise %119.7 oranında artış göstermiştir. Bu artış, geleneksel harç sıvanın taşıma kapasitesine anlamlı bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

FRCM-2 numunesi, itme yönünde %78.9, çekme yönünde ise %106.8 oranında kapasite artışı sağlamıştır. Hidrolik kireç esaslı sıva, özellikle çekme yönünde REF numunesine yakın bir performans göstermiş, ancak itme yönünde REF’e kıyasla daha düşük bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte, FRCM-2 numunesinin tepe deplasman değerleri REF’e göre daha yüksek olup, bu durum güçlendirme sonrası deformasyon kapasitesinin arttığını göstermektedir.

CBSM-FRCM numunesi ise tüm numuneler arasında en yüksek performansı sergileyerek itme yönünde %255.5 ve çekme yönünde %305.2 oranında artış elde etmiştir. CBSM-FRCM ile FRCM-2 numuneleri arasındaki temel farkın yalnızca kullanılan sıva türüdür. FRCM-2’de hidrolik kireç esaslı sıva tercih edilmişken, CBSM-FRCM’de çimento esaslı sıva uygulanmıştır. Bu durum, sıva tipinin yatay yük taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Aynı B-FRCM güçlendirme sistemi kullanılmış olmasına rağmen, çimento esaslı sıva hidrolik kireç esaslı sıvaya kıyasla hem itme hem de çekme yönünde yaklaşık iki katına varan kapasite artışı sağlamıştır. Bu fark, çimento esaslı sıvanın daha yüksek basınç ve aderans dayanımı ile açıklanabilir; böylece duvarın yük aktarımı ve hasar kontrolü daha etkin bir şekilde gerçekleşmiştir.

REF, FRCM-2 ve CBSM-FRCM numuneleri karşılaştırıldığında; REF ile FRCM-2’nin çekme yönündeki kapasitelerinin birbirine yakın olduğu, ancak CBSM-FRCM’nin her iki yönde de belirgin şekilde daha yüksek kapasiteye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle CBSM-FRCM, yalnızca sıva türü farkıyla FRCM-2’ye kıyasla önemli bir performans avantajı sağlamıştır. Bu sonuç, güçlendirme tasarımında sıva malzemesinin doğru seçiminin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 3.25’deki zarf eğrilerinin karşılaştırılması, REF-2 numunesinin düşük yük seviyelerinde görece daha rijit bir davranış sergilediğini ancak artan deplasmanla birlikte kapasitesinin hızlı bir şekilde düştüğünü göstermektedir. Güçlendirilmiş numunelerde ise hem tepe yük kapasitesinin belirgin şekilde arttığı hem de yüksek deplasman bölgelerinde yük taşıma kararlılığının korunduğu görülmektedir. Özellikle CBSM-FRCM numunesi, tepe yük seviyesine kadar hızlı bir kapasite artışı göstermiş ve sonrasında da yüksek yük seviyesini nispeten sabit tutabilmiştir.



Şekil 3. 25. Numunelerin deneysel zarf eğrileri

Tablo 3. 2. Numunelerinin deneysel maksimum yük ve deplasman değerleri

Numune	Max. yatay yük tepe deplasmanı (mm)		Toplam yatay yüke göre			
			Max. yatay yük (kN)		Yatay yük taşıma artış oranları (%)	
	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme
REF-2	36.8	39.3	43.1	38.5	-	-
REF	18.8	23.1	92.9	84.6	115.5	119.7
FRCM-2	38.6	42.1	77.1	79.6	78.9	106.8
CBSM-FRCM	37.6	27.9	153.2	156	255.5	305.2

Şekil 3.25 ve Tablo 3.2, numunelerin farklı görelî kat öteleme oranlarında sergiledikleri ortalama yatay yük değerlerini ve bu değerlerin REF-2 numunesine göre yüzdesel değişimlerini göstermektedir

REF-2 numunesi, 0.50% görelî kat ötelemesinde 23.2 kN’lık bir yük taşımış ve bu değer 1.00% ötelemede 32.9 kN ile maksimuma ulaşmıştır. Daha yüksek

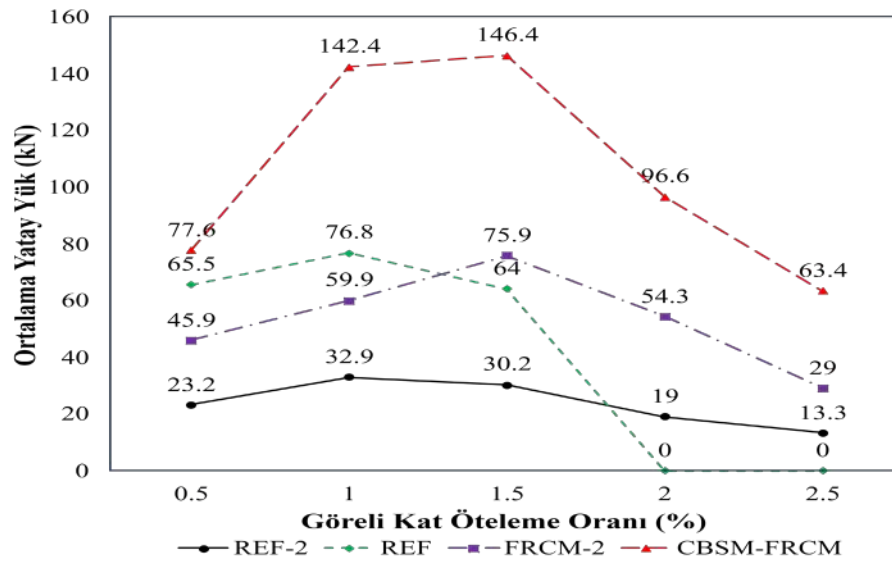
öteleme seviyelerinde ise kapasite düşmüş, 2.50% ötelemede 13.3 kN seviyesine kadar gerilemiştir. Bu durum, yalın-sıvasız duvarın sınırlı bir deformasyon kapasitesine sahip olduğunu ve daha düşük öteleme seviyelerinden sonra yük taşıma kapasitesini hızla kaybettiğini ortaya koymaktadır.

REF numunesi, 0.50% ötelemede 65.5 kN, 1.00% ötelemede ise 76.8 kN ile maksimum kapasitesine ulaşmıştır. 1.50% ötelemede hafif bir düşüş ile 64.0 kN seviyesine inmiş, 2.00% ve 2.50% öteleme seviyelerinde ise taşıma kapasitesi korunamamıştır. Bu davranış, geleneksel harç sıvanın düşük öteleme seviyelerinde ciddi bir kapasite artışı sağladığını ancak yüksek öteleme seviyelerinde dayanımın korunmasında sınırlı kaldığını göstermektedir.

FRCM-2 numunesi, 0.50% ötelemede 45.9 kN yük taşımış, 1.50% ötelemede 75.9 kN ile tepe kapasitesine ulaşmıştır. 2.00% ve 2.50% öteleme seviyelerinde kapasite azalarak sırasıyla 54.3 kN ve 29.0 kN'a düşmüştür. Bu sonuçlar, hidrolik kireç esaslı B-FRCM sıvanın deformasyon kapasitesini artırma konusunda başarılı olduğunu, ancak yüksek öteleme seviyelerinde yük taşıma kapasitesinde belirgin kayıplar yaşadığını göstermektedir.

CBSM-FRCM numunesi, tüm numuneler içinde en yüksek performansı sergileyerek 0.50% ötelemede 77.6 kN ile başlamış, 1.50% ötelemede 146.4 kN ile tepe değerine ulaşmıştır. Daha sonra kapasite kademeli olarak azalmış, 2.50% ötelemede bile 63.4 kN seviyesinde kalmıştır. Bu durum, çimento esaslı B-FRCM sıvanın yüksek deformasyon seviyelerinde dahi yük taşıma yeteneğini koruma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Tüm numuneler karşılaştırıldığında, CBSM-FRCM'nin en yüksek yatay yük kapasitesine sahip olduğu, REF'in ise FRCM-2'den daha yüksek başlangıç yükleri elde ettiği görülmektedir. Ancak öteleme seviyesi arttıkça FRCM-2, REF'e kıyasla daha uzun süre yüksek yük seviyelerini koruyabilmiştir.



Şekil 3. 26. Görelü kat öteleme oranlarında ortalama yatay yük değerleri

Tablo 3. 3. Görelü kat öteleme oranlarında ortalama yatay yük değerleri ve farklar

Numune	Görelü kat öteleme oranları (%)									
	Yatay yük değeri (kN)					Fark (%)				
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
REF-2	23.2	32.9	30.2	19.0	13.3	-	-	-	-	-
REF	65.5	76.8	64.0	-	-	182.3	133.4	111.9	-	-
FRCM-2	45.9	59.9	75.9	54.3	29.0	97.8	82.1	151.3	185.8	118.1
CBSM-FRCM	77.6	142.4	146.4	96.6	63.4	234.5	332.8	384.8	408.4	376.7

3.2.2. Süneklik

Tablo 3.4’de numunelerin süneklik hesaplamaları için kullanılan temel parametreler verilmiştir. Bu parametreler; $0.85P_{max}$ olarak tanımlanan göçme anındaki yük ve deplasman değerleri ile akma bölgesindeki yük ve deplasman değerleridir. Göçme deplasmanının akma deplasmanına oranı, itme ve çekme yönleri için süneklik değerlerini vermektedir. Tablonun son sütununda yer alan ortalama değerler ise sistemin genel sünekliğini ifade etmekte olup, Şekil 3.27’de görsel olarak sunulmuştur.

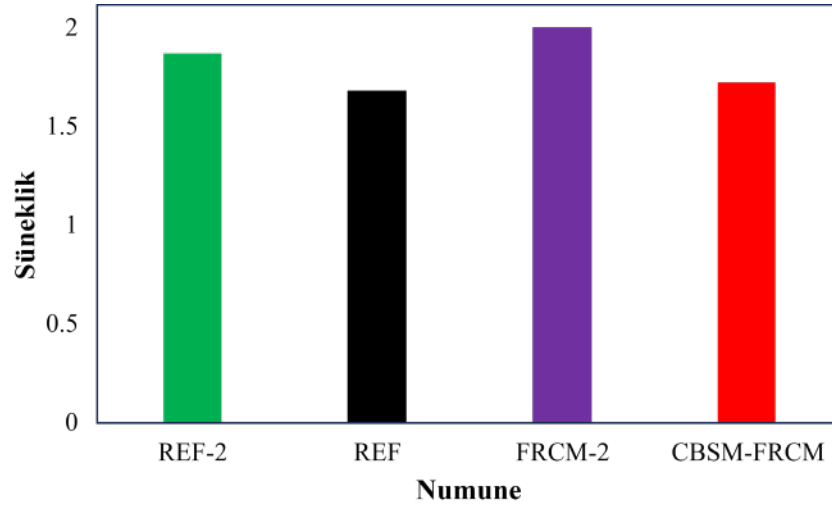
Göçme yükleri incelendiğinde, REF-2 numunesi itme yönünde 36.6 kN, çekme yönünde ise 32.7 kN değerlerine ulaşmıştır. Geleneksel harç sıvalı REF numunesi bu değerleri neredeyse iki katına çıkararak itmede 79.0 kN, çekmede ise

71.9 kN'a ulaşmıştır. FRCM-2 numunesi ise hem itme (65.5 kN) hem çekme (67.7 kN) yönlerinde REF-2'ye kıyasla anlamlı artış göstermiş ancak REF numunesinin itme yönündeki kapasitesine ulaşamamıştır. CBSM-FRCM numunesi, 130.2 kN (itme) ve 132.6 kN (çekme) ile tüm numuneler arasında en yüksek göçme yüklerine ulaşmıştır. Bu fark, CBSM-FRCM ile FRCM-2 arasındaki tek değişkenin sıva türü olmasına rağmen çimento esaslı sıvanın yük taşıma kapasitesini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir.

Akma yükleri incelendiğinde, REF-2 numunesi itmede 27.3 kN, çekmede 36.4 kN değerlerine ulaşırken, REF numunesi sırasıyla 81.7 kN ve 75.7 kN ile ciddi bir artış göstermiştir. FRCM-2, itmede 54.2 kN ve çekmede 61.9 kN ile REF-2'nin üzerinde ancak REF'in altında değerler elde etmiştir. CBSM-FRCM ise itmede 144.1 kN ve çekmede 151.0 kN ile hem göçme hem akma yüklerinde en yüksek performansı sergilemiştir.

Deplasman değerleri açısından, REF-2 numunesi göçme anında 37.2 mm (itme) ve 40.2 mm (çekme) deformasyon yapabilmiş, akma anında ise 16.5 mm (itme) ve 26.9 mm (çekme) seviyelerinde kalmıştır. REF numunesi, sıvanın sağladığı rijitlik nedeniyle akma deplasmanlarını düşürmüştür (13.6 mm itme, 17.8 mm çekme). FRCM-2, göçme deplasmanlarında 49.2 mm (itme) ve 51.0 mm (çekme) ile en yüksek deformasyon kapasitesine ulaşmış, bu da hidrolik kireç esaslı sıvanın sünekliği artırma etkisini ortaya koymaktadır. CBSM-FRCM ise göçme deplasmanlarında 43.1 mm (itme) ve 48.5 mm (çekme) ile yüksek deformasyon kapasitesi sergilemiş, ancak FRCM-2'nin altında kalmıştır.

Süneklik değerleri incelendiğinde, en yüksek ortalama süneklik 2.4 ile FRCM-2 numunesinde elde edilmiştir. REF-2 numunesi 1.87 ortalama süneklik ile ikinci sırada yer alırken, CBSM-FRCM 1.72 ve REF 1.68 değerleriyle daha düşük süneklik göstermiştir. CBSM-FRCM'nin yüksek dayanımına rağmen sünekliğinin nispeten düşük olması, çimento esaslı sıvanın daha rijit bir yapı oluşturması ve bu nedenle deformasyon kabiliyetini kısmen sınırlamasıyla açıklanabilir. REF numunesinin ise hem dayanım hem de süneklik açısından diğer güçlendirilmiş numunelere kıyasla daha düşük performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 3. 27. Süneklik değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 3. 4. Süneklik değerleri

	0.85Pmax				Akma Bölgesi				Süneklik		
	Pozitif (İtme)		Negatif (Çekme)		Pozitif (İtme)		Negatif (Çekme)				
	Yük	Deplasman	Yük	Deplasman	Yük	Deplasman	Yük	Deplasman	Pozitif (İtme)	Negatif (Çekme)	Ort.
REF-2	36.6	37.2	32.7	40.2	27.3	16.5	36.4	26.9	2.25	1.49	1.87
REF	79	22.3	71.9	30.7	81.7	13.6	75.7	17.8	1.64	1.72	1.68
FRCM-2	65.5	49.2	67.7	51	54.2	17.6	61.9	25.6	2.8	1.99	2.4
CBSM-FRCM	130.2	43.1	132.6	48.5	144.1	24.4	151	29.3	1.77	1.66	1.72

3.2.3. Rijitlik

Numunelerin farklı görelî kat öteleme seviyelerindeki yük ve deplasman değerlerinden yararlanılarak rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.28’de itme ve çekme yönleri için ayrı ayrı rijitlik değişimleri verilmiş, Şekil 3.29’da ise aynı görelî kat öteleme oranındaki itme ve çekme yönü rijitliklerinin ortalaması alınarak elde edilen ortalama rijitlik değerleri gösterilmiştir. Bu ortalama değerler Tablo 3.5’de verilmiştir ve REF-2 numunesine göre yüzdesel değişim oranları da tabloya eklenmiştir.

REF-2 numunesi, tüm öteleme seviyelerinde en düşük rijitlik değerlerine sahip olmuştur. %0.50 ötelemede 1.8 kN/mm olan rijitlik, %1.50’de 0.8 kN/mm’ye, %2.50’de ise 0.2 kN/mm’ye kadar düşmüştür. Bu hızlı azalma, yalın-sıvasız duvarın ilk çatlak oluşumundan sonra rijitliğini hızla kaybettiğini ve yapısal bütünlüğünü koruyamadığını göstermektedir.

REF numunesi, başlangıçta 5.0 kN/mm rijitlik ile REF-2’ye göre %177.8 daha yüksek bir rijitliğe sahiptir. Ancak bu değer %1.00 ötelemede 2.9 kN/mm’ye,

%1.50'de ise 1.6 kN/mm'ye düşmüştür. Rijitlikteki bu hızlı azalma, geleneksel harç sıvanın çatlak sonrası yatay yük taşıma kapasitesinin yüksek deformasyon seviyelerinde belirgin biçimde azaldığını göstermektedir.

FRCM-2 numunesi, başlangıçta 3.5 kN/mm ile REF'e göre daha düşük fakat REF-2'ye göre %94.4 daha yüksek başlangıç rijitliği sergilemiştir. %1.50 ötelemede 1.9 kN/mm, %2.50'de ise 0.4 kN/mm değerlerine gerilemiştir. Rijitlik azalımı REF'e göre daha dengeli hale gelmiştir.

CBSM-FRCM numunesi ise tüm öteleme seviyelerinde en yüksek rijitlik değerlerini korumuştur. Başlangıçta 5.9 kN/mm olan rijitlik, %1.50'de 3.7 kN/mm, %2.50'de ise 0.9 kN/mm olarak ölçülmüştür. Özellikle %1.50 öteleme seviyesine kadar diğer numunelerden belirgin biçimde daha yüksek rijitlik değerleri koruması, çimento esaslı B-FRCM sıvanın yüksek aderans ve basınç dayanımı sayesinde hasar gelişimini etkin şekilde sınırladığını ortaya koymaktadır.

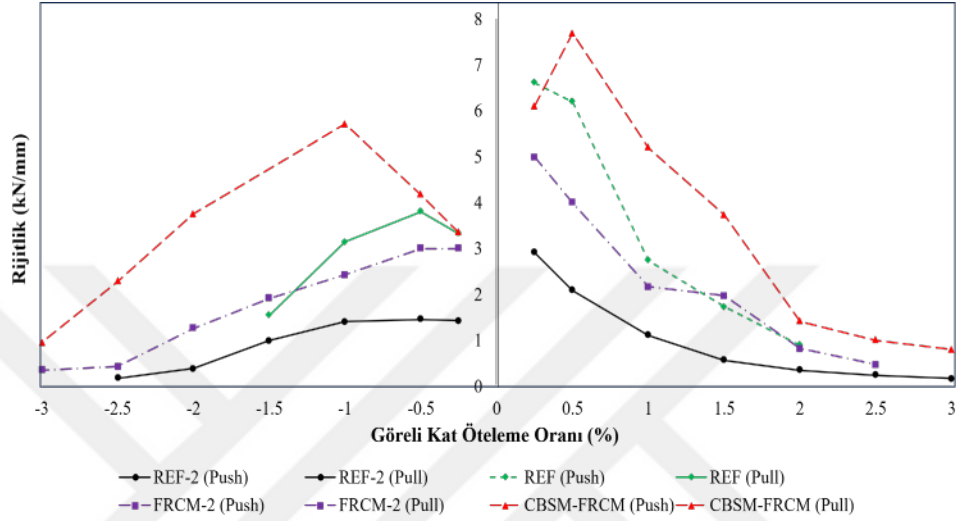
Numunelerin başlangıç rijitliği (1. çevrim) ve maksimum yük anındaki rijitliği Tablo 3.6'da verilmiştir. REF-2 numunesi başlangıçta 2.9 kN/mm (itme) ve 1.4 kN/mm (çekme) rijitlik değerlerine sahipken, maksimum yükte bu değerler 1.17 kN/mm ve 1.0 kN/mm'ye düşmüştür. REF numunesi ise başlangıçta 6.6 kN/mm (itme) ve 3.3 kN/mm (çekme) değerleriyle REF-2'ye göre sırasıyla %127.6 ve %135.7 daha yüksek rijitlik göstermiş, maksimum yükte ise 4.93 kN/mm (itme) ve 3.7 kN/mm (çekme) değerleriyle %321.4 ve %270.0'lık artış elde etmiştir.

FRCM-2 numunesi başlangıçta 5.0 kN/mm (itme) ve 3.0 kN/mm (çekme) ile REF-2'ye göre sırasıyla %72.4 ve %114.3 daha yüksek rijitlik göstermiştir. Maksimum yükte ise 2.0 kN/mm (itme) ve 1.9 kN/mm (çekme) değerleriyle artış oranları %70.9 ve %90.0 seviyesinde kalmıştır. Bu durum, FRCM-2'nin başlangıç sertliğinin yüksek olmasına rağmen maksimum yük anında daha düşük rijitlik koruyabildiğini göstermektedir.

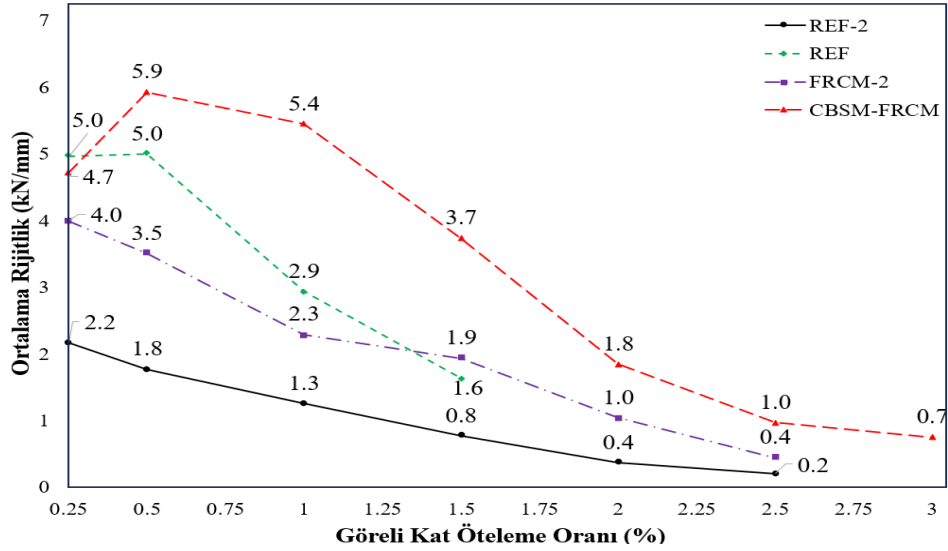
CBSM-FRCM numunesi, başlangıçta 6.1 kN/mm (itme) ve 3.3 kN/mm (çekme) ile REF-2'ye göre sırasıyla %110.3 ve %135.7 artış sağlamıştır. Maksimum yükte ise 4.1 kN/mm (itme) ve 5.6 kN/mm (çekme) değerleriyle %250.4 ve %460.0 gibi çok yüksek artış oranlarına ulaşmıştır.

Genel karşılaştırmada, düşük öteleme seviyelerinde CBSM-FRCM ve REF numuneleri başlangıçta en yüksek rijitlikleri sergilerken, yüksek öteleme

seviyelerinde CBSM-FRCM diğer numunelere kıyasla oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. FRCM-2, öteleme oranı ilerledikçe REF' kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu da sıva tipi hidrolik kireç esaslı olmasına rağmen FRCM malzemesinin uzun vadeli rijitlik koruma açısından avantajlı olduğunu göstermiştir. REF-2 ise hem başlangıçta hem maksimum yükte en düşük rijitlik değerlerine sahip olmuştur.



Şekil 3. 28. Rijitlik azalım eğrileri-1



Şekil 3. 29. Rijitlik azalım eğrileri-2

Tablo 3. 5. Farklı görelî kat öteleme oranlarında ortalama rijitlik değeri ve farklar

Numune	Görelî kat öteleme oranları (%)									
	Rijitlik değeri (kN/mm)					Fark (%)				
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
REF-2	1.8	1.3	0.8	0.4	0.2	-	-	-	-	-
REF	5.0	2.9	1.6	-	-	177.8	123.1	100.0	-	-
FRCM-2	3.5	2.3	1.9	1.0	0.4	94.4	76.9	137.5	150.0	100.0
CBSM-FRCM	5.9	5.4	3.7	1.8	0.9	227.8	315.4	362.5	350.0	350.0

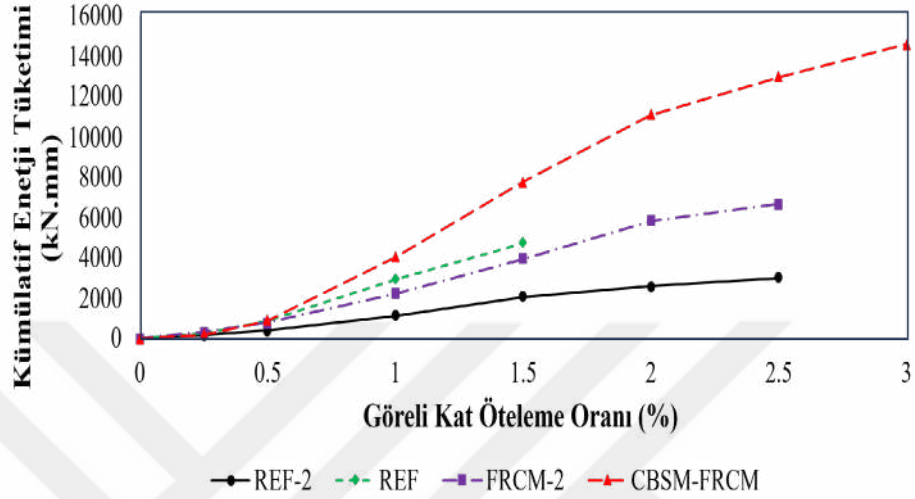
Tablo 3. 6. Başlangıç ve maksimum yükteki rijitlik değeri

Numune	Rijitlik Değeri (kN/mm)				Rijitlik değeri (%)			
	1. çevrimdeki		Max. Yükteki		1. çevrimdeki		Max. Yükteki	
	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme
REF-2	2.9	1.4	1.17	1.0	-	-	-	-
REF	6.6	3.3	4.93	3.7	127.6	135.7	321.4	270.0
FRCM-2	5.0	3.0	2.0	1.9	72.4	114.3	70.9	90.0
CBSM-FRCM	6.1	3.3	4.1	5.6	110.3	135.7	250.4	460.0

3.2.4 Enerji Tüketim Kapasitesi

Numunelerin enerji tüketim performansları, farklı görelî kat öteleme seviyelerindeki kümülatif enerji tüketimleri, akma ve göçme yüklerine kadar olan enerji tüketimleri ile hem itme hem çekme yönleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.30 ve Tablo 3.7 incelendiğinde, tüm numunelerde görelî kat öteleme oranı arttıkça kümülatif enerji tüketiminin artış gösterdiği, ancak artış oranlarının numuneye bağılı olarak değiştiği görülmektedir. REF-2 numunesi, 0.50% görelî kat ötelemesinde 386.1 kN.mm enerji tüketirken, bu değeri CBSM-FRCM

numunesinde aynı öteleme seviyesinde 894.3 kN·mm olarak ölçülmüş, yani %131,6'lık bir artış sağlanmıştır. Göçme öncesindeki son öteleme seviyelerinde ise CBSM-FRCM numunesi, diğer tüm numunelerden belirgin şekilde yüksek enerji tüketmiştir. Özellikle 2.50% görelî kat ötelemesinde CBSM-FRCM numunesi, REF-2'ye göre %332,6 daha fazla enerji tüketmiştir.



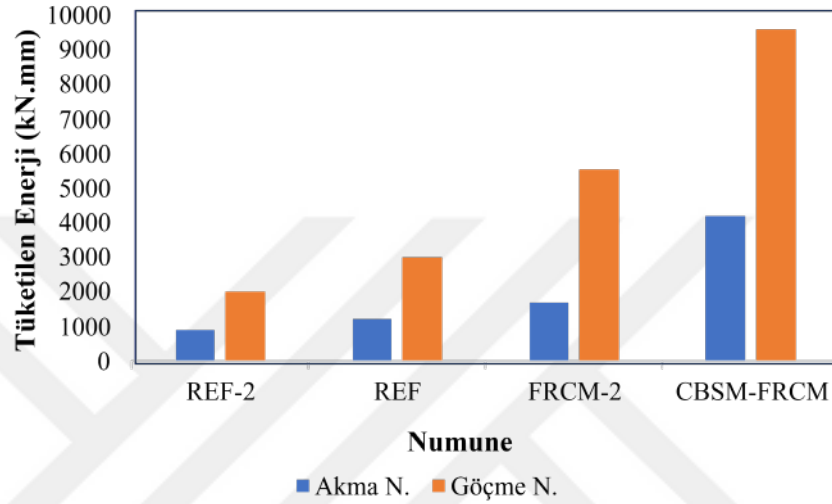
Şekil 3. 30. Kümülatif enerji tüketimleri

Tablo 3. 7. Farklı görelî kat öteleme oranlarında kümülatif enerji tüketimi ve farklar

Numune	Görelî kat öteleme oranları (%)									
	Enerji tüketimi (kN.mm)					Fark (%)				
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
REF-2	386.1	1128.4	2044.8	2585.3	2994.2	-	-	-	-	-
REF	845.2	2930.1	4733.0	-	-	118.9	159.7	131.5	-	-
FRCM-2	760.7	2203.9	3927.6	5815.4	6664.3	97.0	95.3	92.1	124.9	122.6
CBSM-FRCM	894.3	4006.9	7763	11088.1	12953	131.6	255.1	279.6	328.9	332.6

Şekil 3.30 ve Tablo 3.7 verileri incelendiğinde, akma yüküne kadar olan enerji tüketiminin elastik bölgede, göçme yüküne kadar olan kısmın ise plastik bölgede tüketilen enerji olduğu görülmektedir. REF-2 numunesinde toplam enerjinin

%43,9'u elastik, %56,1'i plastik bölgede tüketilmiştir. REF numunesinde elastik bölge oranı %40,0, FRCM-2'de %30,7, CBSM-FRCM'de ise %43,6 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, FRCM-2 numunesinin toplam enerji tüketiminin daha büyük bir bölümünü plastik bölgede gerçekleştirdiğini, yani göçme sonrası deformasyon kabiliyetinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. CBSM-FRCM numunesi ise hem elastik hem de plastik bölgede açık ara en yüksek enerji tüketimine sahiptir.



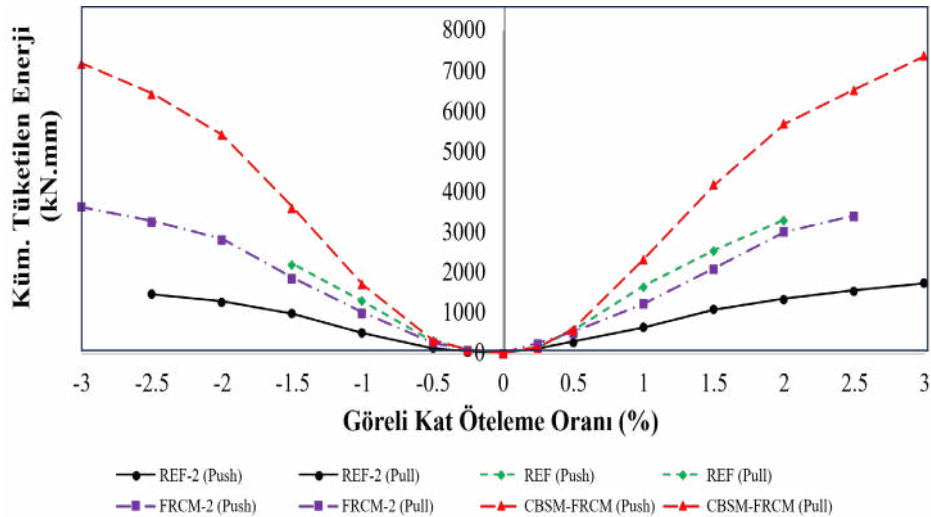
Şekil 3. 31. Akma ve göçme yüküne kadar kümülatif enerji tüketimleri

Tablo 3. 8. Kümülatif tüketilen enerji değerleri ve oranları

Numune	Kümülatif toplam tüketilen enerji (kN.mm)		Tüketilen Enerji Oranları	
	Akma yüküne kadar	Göçme yüküne kadar	Akma yükünde	Göçme yükünde
REF-2	890.9	2026.8	-	-
REF	1199.5	2994.5	34.6	47.7
FRCM-2	1702.6	5542.4	91.1	173.5
CBSM-FRCM	4193.4	9616.9	370.7	374.5

Şekil 3.31, Tablo 3.9 ve Tablo 3.10 birlikte incelendiğinde, itme ve çekme yönlerindeki enerji tüketimlerinin genellikle benzer eğilimler sergilediği, ancak CBSM-FRCM numunesinde her iki yönde de belirgin üstünlük sağlandığı görülmektedir. İtme yönünde CBSM-FRCM numunesi, akma yüküne kadar REF-2'ye göre %459,1, göçme yüküne kadar ise %360,7 oranında daha fazla enerji tüketmiştir. Çekme yönünde ise bu artış oranları sırasıyla %309,1 ve %388,3 olmuştur.

Numuneler kendi içlerinde değerlendirildiğinde, REF-2 numunesinin enerji tüketim kapasitesi sınırlı olup, özellikle plastik bölgede hızlı bir düşüş eğilimi göstermektedir. REF numunesi, geleneksel harç sıvası sayesinde REF-2'ye kıyasla belirgin bir iyileşme göstermiş, ancak yüksek deformasyon seviyelerinde enerji tüketimi CBSM-FRCM ve FRCM-2'nin gerisinde kalmıştır. FRCM-2 numunesi, hidrolik kireç esaslı onarım harcı ve B-FRCM takviyesi ile hem elastik hem plastik bölgede önemli kazanımlar sağlamış, ancak CBSM-FRCM'nin performansına ulaşamamıştır. CBSM-FRCM numunesi, çimento esaslı onarım harcının sağladığı yüksek aderans ve dayanım sayesinde tüm öteleme seviyelerinde en yüksek enerji tüketim kapasitesini göstermiş, bu da hem elastik hem de plastik bölgede enerji sönmüleme kabiliyetinin üstün olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3. 32. İtme ve çekme yönünde kümülatif enerji tüketimleri

Tablo 3. 9. İtme yönü kümülatif toplam tüketilen enerji değerleri ve enerji oranları

Numune	Kümülatif toplam tüketilen enerji (kN.mm)		Tüketilen Enerji Oranları	
	Akma yüküne kadar	Göçme yüküne kadar	Akma yükünde	Göçme yükünde
REF-2	366.0	1017.3	-	-
REF	597.7	1353.5	63.3	33.0
FRCM-2	745.6	2824.6	103.7	177.7
CBSM-FRCM	2046.2	4687.4	459.1	360.7

Tablo 3. 10. Çekme yönü kümülatif toplam tüketilen enerji ve enerji oranları

Numune	Kümülatif toplam tüketilen enerji (kN.mm)		Tüketilen Enerji Oranları	
	Akma yüküne kadar	Göçme yüküne kadar	Akma yükünde	Göçme yükünde
REF-2	524.9	1009.5	-	-
REF	601.8	1641.0	14.7	62.6
FRCM-2	957.0	2717.8	82.3	169.2
CBSM-FRCM	2147.2	4929.5	309.1	388.3

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, dolgu duvarlarda sıva tipinin ve B-FRCM tipi malzeme ile güçlendirme uygulamasının yapısal davranış üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Gerçek ölçekli dört adet duvar numunesi üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı tersinir yükleme testleri ile elde edilen veriler; yatay yük taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik ve enerji tüketimi parametreleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

CBSM-FRCM numunesi, tüm numuneler arasında en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve hem itme hem çekme yönlerinde FRCM-2'ye kıyasla yaklaşık iki katına varan kapasite artışı sağlamıştır. Bu durum, yalnızca sıva tipinin değiştirilmesiyle önemli performans farklarının ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Çimento esaslı sıva, hidrolik kireç esaslı sıvaya kıyasla çok daha yüksek aderans ve basınç dayanımı sağlayarak yük aktarımını ve hasar gelişimini iyileştirmiştir. Geleneksel sıvalı REF numunesi, yalın REF-2'ye göre anlamlı iyileşme sağlamış olsa da, yüksek deformasyon seviyelerinde kapasite koruma konusunda sınırlı kalmıştır.

En yüksek ortalama süneklik değeri 2.4 ile FRCM-2 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, hidrolik kireç esaslı B-FRCM sıvanın deformasyon kapasitesini artırma konusunda etkili olduğunu göstermektedir. CBSM-FRCM yüksek dayanımına rağmen daha düşük süneklik sergilemiş, bu da çimento esaslı sıvanın daha rijit bir davranış ortaya koyduğunu göstermektedir. Geleneksel harç sıvalı REF numunesi ise hem dayanım hem süneklik açısından güçlendirilmiş numunelere kıyasla geride kalmıştır.

Başlangıç rijitliği açısından CBSM-FRCM ve REF numuneleri öne çıkmıştır. Ancak öteleme oranı arttıkça CBSM-FRCM, yüksek rijitlik değerlerini diğer numunelere göre çok daha uzun süre korumuştur. FRCM-2 numunesi ise başlangıçta REF'ten daha düşük rijitliğe sahip olmasına rağmen, deformasyon ilerledikçe rijitlik kaybı daha dengeli olmuştur. REF-2 numunesi, hem başlangıçta hem de maksimum yükte en düşük rijitlik değerlerini göstermiştir.

CBSM-FRCM, hem elastik hem de plastik bölgede en yüksek enerji tüketim kapasitesine ulaşmıştır. REF-2 numunesi toplam enerjinin yaklaşık %44'ünü elastik bölgede tüketirken, FRCM-2 numunesi bu oranı %31'e kadar düşürmüş ve daha büyük bir kısmı plastik bölgede tüketmiştir. Bu durum, FRCM-2'nin akma sonrası deformasyon kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir. İtme ve çekme yönleri ayrı değerlendirildiğinde, CBSM-FRCM her iki yönde de belirgin üstünlük sağlamıştır. Özellikle itme yönünde akma yüküne kadar REF-2'ye göre %459, çekme yönünde ise %309 daha fazla enerji tüketmiştir.

Genel Değerlendirme

- Sıva tipi, duvarların yapısal performansı üzerinde kritik etkiye sahiptir. Çimento esaslı sıva, özellikle dayanım ve enerji tüketimi açısından hidrolik kireç esaslı sıvaya kıyasla belirgin üstünlük sağlamıştır.
- B-FRCM güçlendirme, hem deformasyon kapasitesi hem de enerji sönümleme yeteneğini artırmıştır.
- CBSM-FRCM numunesi genel olarak en yüksek taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji tüketim değerlerini sunarken; FRCM-2 en yüksek sünekliği sağlamıştır.
- Geleneksel sıva uygulaması, yalın duvarlara kıyasla belirgin iyileşmeler sağlamış olsa da, güçlendirilmiş sistemlerin performansına ulaşamamıştır.

Öneriler

- Çimento esaslı onarım harcı, yüksek aderans ve basınç dayanımı sayesinde hem dayanım hem de enerji tüketim kapasitesi açısından üstün sonuçlar vermiştir. Özellikle yüksek deprem taleplerine maruz kalabilecek yapılarda bu tür sıva malzemelerinin tercih edilmesi önerilmektedir.
- Tarihi yapılarda veya nem transferinin önemli olduğu durumlarda hidrolik kireç esaslı harçlar tercih edilmeli, bu durumda performans artırıcı ek önlemler düşünülmelidir.
- FRCM güçlendirme, süneklik ve deformasyon kapasitesi açısından önemli kazanımlar sağlamıştır. Hem elastik hem plastik bölgede enerji sönümleme

yeteneğini artırdığı için deprem performansı iyileştirilmek istenen dolgu duvarlarda uygulanması tavsiye edilmektedir.

- Tasarım sürecinde sıva malzemesinin mekanik özellikleri, aderans kapasitesi ve kullanım amacına uygunluğu mutlaka dikkate alınmalıdır.
- Farklı B-FRCM sistemleri ile sıva kombinasyonlarının karşılaştırıldığı, çevresel etkilerin ve açıklık konumlarının performansa etkisinin incelendiği, ayrıca sahada uygulanmış güçlendirme sistemlerinin uzun süreli izlenerek laboratuvar sonuçlarının doğrulandığı kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.
- Deneysel sonuçlar, B-FRCM ile güçlendirilmiş bölme duvarlarda B-FRCM malzemesinin duvarın yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve deformasyonları sınırladığını ortaya koymuştur. Bu durum, sınırlı seviyede deformasyona uğramış duvar elemanlarının yeniden B-FRCM ile güçlendirilerek yapısal olarak tekrar kullanılabilir hale gelebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ehsani vd., (1997), Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays
- [2] Kolsch (1998), Carbon fibre cement matrix (CFCM) overlay system for masonry strengthening
- [3] Hamid vd., (2005) Behavior of composite unreinforced masonry–fiber-reinforced polymer wall assemblages under in-plane loading.
- [4] Yuksel vd., (2006), Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames
- [5] Prota vd., (2006), Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites
- [6] ElGawady vd., (2007), Shear strength of URM walls retrofitted using FRP
- [7] Lignola vd., (2009), Design rules for in-plane shear strengthening of masonry with FRCM
- [8] Özkaynak (2010), CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin sismik performansı: Deneysel ve kuramsal bir inceleme.
- [9] Arslan ve Celebi (2019), An experimental study on cyclic behavior of aerated concrete block masonry walls retrofitted with different methods. Construction and Building Materials,
- [10]Ökten (2013), Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deneysel İncelenmesi.
- [11]Onar (2007), CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin sismik performansı: Deneysel ve kuramsal bir inceleme (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [12]Samuel (2016), Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers.
- [13]Korany and Drysdale (2006), Rehabilitation of Masonry Walls Using Unobtrusive FRP Techniques for Enhanced Out-of-Plane Seismic Resistance
- [14]Martins vd., (2015), Experimental assessment of an innovative strengthening material for brick masonry infills
- [15]Deng vd., (2019), Shaking table tests of a half-scale 2-storey URM building retrofitted with a high ductility fibre reinforced concrete overlay system
- [16]Bernat-Maso vd., (2014), Experimental Study of Brick Masonry Walls Strengthened with Textile Reinforced Mortar
- [17]Reboul vd., (2018), Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials
- [18]Kouris ve Triantafillou (2018), Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials
- [19]Mustafaraj ve Yardim (2019), Retrofitting damaged unreinforced masonry using external shear strengthening techniques
- [20]Yacila vd., (2019), Multi-criteria analysis of five reinforcement options for Peruvian confined masonry walls
- [21]Cai, G. (2019). Effect of infills on seismic performance of reinforced concrete frame structures: A full-scale experimental study (Yüksek lisans tezi, Harbin Institute of Technology). Harbin Institute of Technology Thesis Repository.
- [22]Akin, A. Önüretimli Beton Panellerle Güçlendirilmiş Dolgulu Betonarme Çerçevelerin Deprem Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. 2011. Selçuk Üniversitesi.

- [23]Haspolatlı (2012), Türkiye'de deprem gerçeği ve yapı güvenliği.
- [24]Evsen, A. (2013). Deprem tehlikesi ve riski açısından Türkiye'nin değerlendirilmesi
- [25]TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018. 417.
- [26]Türkiye Deprem Bölgesi Haritası Bayındırlık ve İskân Bakanlığı 1996
- [27]ŞENOL, A.F, Akbaş, A, ÇALIŞKAN, Ö. Türkiyede son yüzyılda (1923-2023) meydana gelen yıkıcı depremler ve kullanılan Deprem yönetmelikleri.
- [28]ABYYHY (1997) Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik.
- [29]TDBYBHY (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
- [30]Yapı Denetimi Hakkında Kanun (Kanun No: 4708, Kabul Tarihi: 29.06.2001).
- [31]Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun (Kanun No: 6306, Kabul Tarihi: 16.05.2012).
- [32]El-Dakhakhni, W. W., Hamid, A. A., Hakam, Z. H. R., & Elgaaly, M. (2006). Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. *Composite Structures*, 73(4), 458–477.
- [33]Middle East Technical University, Earthquake Engineering Research Center (METU EERC). (2011). 9 November 2011 Van Earthquake Report. METU, Ankara, Turkey.
- [34]Kappos, A. J. (2000). Seismic design and performance assessment of masonry infilled RC frames. In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (Paper No. [eğer varsa]). International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Tokyo, Japan.
- [35]Calvi, G. M., Bolognini, D., & Penna, A. (2004). Seismic performance of masonry-infilled RC frames – Benefits of slight reinforcements. In *Proceedings of SISMICA 2004: 6° Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, Portugal.
- [36]KAPLAN, S.A, Dolgu duvarların betonarme taşıyıcı sistem performansına etkisi
- [37]Hashemi, A., & Mosalam, K. M. (2006). Shake-table experiment on a reinforced concrete structure containing a masonry infill wall. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(14), 1827–1852.
- [38]Kose, M.M., Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls. *Engineering Structures*, 2009. 31(1): p. 93-102.
- [39]Crowley, H. and R. Pinho, Period-Height Relationship for Existing European Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004. 8: p. 93-119.
- [40]Masi, A. and M. Vona. Estimation of the Period of Vibration of Existing RC Building Types Based on Experimental Data and Numerical Results. 2009. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [41]TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, in Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar. 2018: Ankara. p. 1-416.
- [42]ASCE7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures in Seismic Design Requirements for Building Structures 2017: Structural Engineering Institute. p. 89-121.
- [43]UBC-1997, Structural Design Requirements in Earthquake Design. 1997. p. 9-22.
- [44]ATC-3-06, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings 1982.
- [45]NBCC, National Building Code of Canada. 2005.
- [46]CEN, Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004: Brussels.

- [47]Hong, L.L. and W.L. Hwang, Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000. 29(3): p. 327-337.
- [48]Goel, R.K. and A.K. Chopra, Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 1997. 123(11): p. 1454-1461.
- [49]EC8, Design of structures for earthquake resistance in Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.
- [50]Leissa, A.W., The historical bases of the Rayleigh and Ritz methods. *Journal of Sound and Vibration*, 2005. 28(4): p. 961-978.
- [51]Akbaş.A.-ÇALIŞKAN, Ö. (2024) Dolgu Duvarların Taşıyıcı Sisteme Katkısı.
- [52]Topçu, A. (2024). Betonarme Ders notları, Eskişehir, OGU (mmf2. ogu.edu.tr/atopcu).
- [53]İlki, A., Demir, C., Cömert, M., & Halıcı, Ö. F. (2023). Betonarme ve yığma binalarda deprem kaynaklı hasarlar ve hasar tespiti. Geliş tarihi Haziran, 15, 2023
- [54]Korkmaz, A., & Uçar, T. (2006). Betonarme Binaların Deprem Davranışında Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 101-108
- [55]Çavdar, Ö., Köse, G., & Sunca, F. (2020). Betonarme Binaların Deprem Performanslarına Dolgu Duvarların Etkisinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 465-484
- [56]Sağlıyan, S. (2018). Dolgu Duvarların Modellenme Yaklaşımlarının Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 165-174.
- [57]ACI 549.4-R20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2020.
- [58]Kurt G., Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006
- [59]Betterman L.R., Quyang C., and Shah S.P., Fiber-matrix interaction in microfiberreinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials (Adv. Cem. Bas. Mater)*, 2, 5361, 1995.
- [60]Pekmezci B.Y, Çimento Esaslı İnce Kompozitler.
- [61]Yüksel, İ., Polat, Z. Betonarme çerçeve sistemlerinde sistem akma parametrelerinin tespiti. *Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*. 2002.
- [62]Park, R., Paulay, T. Reinforced concrete structures. 1991. John Wiley & Sons.
- [63]Arslan, M.H. Kolonları çekme kırılması gösteren sünek olmayan betonarme çerçevelerin dış perde duvar ile güçlendirilmesi. 2007.