İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOLGU DUVARLI ÇERÇEVELERİN KARBON LİFLİ KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Halit COZA

Anabilim Dalı : Mimarlık

Programı : Yapı Bilimleri

ŞUBAT 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOLGU DUVARLI ÇERÇEVELERİN KARBON LİFLİ KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Halit COZA
(502032603)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ağustos 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Şubat 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kaya ÖZGEN (İTÜ)
Eş Danışman : Doç. Dr. Cem YALÇIN (BOUN)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Turgut KOCATÜRK (YTÜ)
Prof. Dr. Nihal Arıoğlu (İTÜ)
Prof. Dr. Hakkı Önel (YTÜ)
Doç. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)
Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK (İTÜ)

ŞUBAT 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösteren, değerli katkılarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her konuda bilgi ve deneyimini benimle paylaşan değerli hocalarım ve tez danışmanlarım Prof. Dr. Kaya ÖZGEN ve Doç. Dr. Cem YALÇIN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Bana her zaman destek olan ve tercihlerimi doğru belirleme imkanını yaratan aileme, tez sürecinde hep yanımda olan nişanlım Dr. İlke Karaçay ve bu çalışmanın ortaya çıkma sürecinde yardımlarını esirgemeyen Dr. Haluk Sesigür, İngilizce öğretmeni Feride Coza, değerli Boğaziçi Üniversitesi asistanları Dr. Osman Kaya, Dr. Selçuk Altay, Dr. Savaş Atmaca, İnşaat Müh. İbrahim Topçu, teknikerler Hasan Şenel ve Hamdi Ayar ile, deney numunelerinin üretilmesinde katkılarından ötürü Dr. Mahmut Köse ve İnşaat Müh. Ünal Mutlu'ya çok teşekkür ediyorum.

Ağustos 2009

Halit COZA

Y. Mimar

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ... **iii**
İÇİNDEKİLER ... **v**
KISALTMALAR ... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xi**
SEMBOL LİSTESİ ... **xvii**
ÖZET ... **xix**
SUMMARY ... **xxi**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı ... 2
1.2 Yapıların Güçlendirilmesi ... 3
1.2.1 Güçlendirme kavramı ... 3
1.2.2 Dolgu duvarların yapı davranışına etkisi ve güçlendirilmesi ... 4
1.2.3 CFRP malzeme ile güçlendirme ... 7
2. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR ... **13**
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ... **29**
3.1 Deney Numunelerinin Belirlenmesi ... 29
3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri ... 30
3.3 Numunelerin Üretimi ... 35
3.4. Deney Düzeneği ... 41
3.5 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ... 45
3.5.1 Beton ... 45
3.5.2 Donatı çeliği ... 46
3.5.3 Harç ve sıva malzemesi ... 47
3.5.4 Delikli tuğla ... 48
3.5.5 Karbon elyaf malzeme ... 49
4. DENEY SONUÇLARI ... **51**
4.1 Numune 1 – Boş Çerçeve Deneyi ... 51
4.2 Numune 2 – Dolgu Duvarlı Tek Yüzü Sıvalı Çerçeve ... 60
4.3 Numune 3 – Dolgu Duvarlı Çift Yüzü Sıvalı Çerçeve ... 71
4.4 Numune 4 – Dolgu Duvarlı Tek Yüzü Sıvalı Tek Yüzü CFRP'li Çerçeve… 85
4.5 Numune 5 – Dolgu Duvarlı Çift Yüzü Sıvalı Tek Yüzü CFRP'li Çerçeve… 102
4.6 Numune 6 – Dolgu Duvarlı Çift Yüzü Sıvalı Çift Yüzü CFRP'li Çerçeve… 117
4.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ... 130
4.7.1 Hasar oluşumu ve göçme şekli ilişkileri ... 130
4.7.2 Yatay yük taşıma kapasitesi ilişkileri ... 134
4.7.3 Enerji yutma kapasitesi ilişkileri ... 138
4.7.4 Rijitlik ilişkileri ... 139

5. ANALİTİK ÇALIŞMA **143**
5.1 Dolgu Duvarlı Çerçeveler İçin Kullanılan Matematik Modeller 143
5.2 Doğrusal Olmayan Statik Yöntem ile Yapı Performansının Belirlenmesi.... 144
5.2.1 Plastik mafsal teorisi..... 146
5.2.1.1 Plastik mafsal şekildeğiştirme sınır durumları..... 147
5.2.2 Eşdeğer basınç Çubuğu modeli..... 153
5.3 Modelleme Sonuçları..... 166
5.3.1 Numune 1- boş çerçeve..... 167
5.3.2 Numune 2- dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçeve..... 169
5.3.3 Numune 3- dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çerçeve..... 171
5.3.4 Numune 4- dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı/CFRP'li çerçeve..... 173
5.3.5 Numune 5- dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı/tek yüz CFRP'li çerçeve..... 175
5.3.6 Numune 6- dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı/çift yüz CFRP'li çerçeve..... 177
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME..... **179**
KAYNAKLAR **185**
ÖZGEÇMİŞ **193**

KISALTMALAR

mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
km	: Kilometre
˚C	: Santigrat derece
T.S	: Türk Standartları
N	: Newton
kg	: Kilogram
C	: Beton sınıfı
kN	: Kilo Newton
ACI	: American Concrete Institute
kg	: Kilogram
Mpa	: Megapaskal
cm^3	: Santimetreküp
CFRP	: Karbon lif takviyeli polimer
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Numunelerin genel özellikleri 31
Çizelge 3.2 : Harç ve sıva malzemesi karışım oranları 39
Çizelge 3.3 : C25 Beton karışım oranları. 46
Çizelge 3.4 : Duvar harcı basınç dayanımları. 48
Çizelge 3.5 : Sıva harcı basınç dayanımları. 48
Çizelge 3.6 : Tuğla duvar basınç ve kayma dayanımları. 49
Çizelge 3.7 : Karbon elyaf malzeme özellikleri. 49
Çizelge 3.8 : Epoksi malzeme teknik özellikleri. 50
Çizelge 4.1 : Numune 1 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 57
Çizelge 4.2 : Numune 2 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 69
Çizelge 4.3 : Numune 3 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 83
Çizelge 4.4 : Numune 4 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 100
Çizelge 4.5 : Numune 5 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 115
Çizelge 4.6 : Numune 6 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu. 128
Çizelge 4.7 : Numunelerde ilk çatlakların gözlendiği yük ve çevrimler. 134
Çizelge 4.8 : İlk 3 numunenin maksimum yatay yük-ötelenme değerleri 136
Çizelge 4.9 : Tüm deney numunelerinin yatay yük-ötelenme değerleri 137
Çizelge 5.1 : Karbon lif dayanım artırma katsayısı değerleri 160
Çizelge 5.2 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 167
Çizelge 5.3 : Numune 1-Plastik mafsal noktaları özellikleri. 168
Çizelge 5.4 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 169
Çizelge 5.5 : Numune 2-Plastik mafsal noktaları özellikleri 170
Çizelge 5.6 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 171
Çizelge 5.7 : Numune 3-Plastik mafsal noktaları özellikleri 173
Çizelge 5.8 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 173
Çizelge 5.9 : Numune 4-Plastik mafsal noktaları özellikleri 175
Çizelge 5.10 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 175
Çizelge 5.11 : Numune 5-Plastik mafsal noktaları özellikleri 177
Çizelge 5.12 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri. 177
Çizelge 5.13 : Numune 6-Plastik mafsal noktaları özellikleri 178

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dolgu duvarlarda deprem etkisiyle oluşan kesme çatlağı..... 6
Şekil 1.2 : Dolgu duvarlarda deprem etkisiyle oluşan X çatlağı..... 6
Şekil 1.3 : Karbon elyaf malzeme örneği 9
Şekil 3.1 : Numune temel detay çizimleri 30
Şekil 3.2 : Numune detay çizimleri……..... 33
Şekil 3.3 : Donatı detayları 34
Şekil 3.4 : Temel ve kolon-kiriş enine donatısı..... 35
Şekil 3.5 : Temel ve kolon donatılarının hazırlanması..... 36
Şekil 3.6 : Temel kalıp resimleri 36
Şekil 3.7 : Numunelerin nakliyesi için bırakılan delikler 36
Şekil 3.8 : Hazırlanan kalıplara donatıların yerleştirilmesi 37
Şekil 3.9 : Kalıpların sökülmesi işlemi 38
Şekil 3.10 : Üretimi tamamlanan betonarme çerçevelerin görünümü 38
Şekil 3.11 : Tuğla örneği 39
Şekil 3.12 : Dolgu duvarlı çerçeve ve sıva uygulaması..... 39
Şekil 3.13 : Boya uygulaması tamamlanmış numune..... 40
Şekil 3.14 : Üretimi tamamlanan numunenin deney düzeneğine 40
yerleştirilmesi
Şekil 3.15 : Deney düzeneği 41
Şekil 3.16 : Yük aktivatörü ve reaksiyon duvarı..... 42
Şekil 3.17 : Şekildeğiştirme ölçerler ve veri toplama sistemi..... 42
Şekil 3.18 : Deney düzeneği 43
Şekil 3.19 : Numunelere yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer örneği..... 44
Şekil 3.20 : Şekildeğiştirme ölçerlerin şematik görünümü..... 44
Şekil 3.21 : Yükleme protokolü 45
Şekil 3.22 : Beton basınç deneyi 46
Şekil 3.23 : Çelik çekme deneyi 47
Şekil 3.24 : Duvar harcı ve sıva basınç deneyi 47
Şekil 3.25 : Tuğla basınç ve kayma testleri..... 48
Şekil 4.1 : Numune 1- İlk çatlakların gözlendiği 6. çevrim 51
Şekil 4.2 : Numune 1 - Yatay yük - ötelenme eğrisi 52
Şekil 4.3 : Numune 1- 10. çevrim sonrası numunenin durumu 53
Şekil 4.4 : Numune 1-12. çevrim sonrası numunedeki çatlak durumu 53
Şekil 4.5 : 15. çevrimde oluşan kolon alt bölgesindeki kesme çatlakları 54
Şekil 4.6 : 15. çevrim sonrası numunedeki çatlak oluşumu 54
Şekil 4.7 : 16. çevrim sonrası kolon mesnet bölgelerinin durumu 55
Şekil 4.8 : 17. çevrim sonrası numunedeki hasar durumu 56
Şekil 4.9 : Deney sonrası kolon alt bölgeleri hasar durumu 56
Şekil 4.10 : Numune 1 yatay yük–yerdeğiştirme eğrisi 58
Şekil 4.11 : Numune 1-Eğrilik-ötelenme eğrisi 59

Şekil 4.12 : Numune 1-Rijitlik-ötelenme eğrisi 59
Şekil 4.13 : Numune 2-İlk çatlakların gözlendiği 5. çevrim 60
Şekil 4.14 : Numune 2-Dolgu duvarda gözlenen kesme çatlakları..... 61
Şekil 4.15 : Numune 2-6. çevrim sonrası hasar durumu 61
Şekil 4.16 : Numune 2-Yatay yük - ötelenme eğrisi 62
Şekil 4.17 : Numune 2-Duvarda kesme çatlakları sonucu sıvada dökülmeler. 63
Şekil 4.18 : Numune 2-13. çevrim sonrası hasar durumu 63
Şekil 4.19 : Numune 2-14. çevrim sonrası numune arka yüz hasar durumu.... 64
Şekil 4.20 : Numune 2-Sağ kolon-kiriş birleşim bölgesinde duvarda ezilme.. 64
Şekil 4.21 : Numune 2-Kolon alt bölgesinde de oluşan kesme çatlağı 65
Şekil 4.22 : Numune 2-Tuğla duvarda dökülmeler 65
Şekil 4.23 : Numune 2-Kolon alt bölgedeki kesme çatlakları 66
Şekil 4.24 : Numune 2-17. çevrim sonrası numune hasar durumu 66
Şekil 4.25 : Numune 2-Kolon alt bölgesinde donatı burkulmaları 67
Şekil 4.26 : Deneyler sonrası Numune 2 hasar durumu 67
Şekil 4.27 : Deneyler sonrası tuğla duvarların durumu 68
Şekil 4.28 : Numune 2-Yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi 68
Şekil 4.29 : Numune 2-Eğrilik-ötelenme eğrisi 70
Şekil 4.30 : Numune 2-Rijitlik-ötelenme eğrisi 70
Şekil 4.31 : Numune 3-Deney sırasında gözlenen ilk eğilme çatlakları 71
Şekil 4.32 : Numune 3-Yatay yük-ötelenme eğrisi 72
Şekil 4.33 : Numune 3-Sağ kolon dış yüzeyde gözlenen eğilme çatlakları 73
Şekil 4.34 : Numune 3-Dolgu duvar-betonarme çerçeve birleşim bölgesi..... 73
çatlakları
Şekil 4.35 : Numune 3-10. çevrim sonrası hasar durumu 74
Şekil 4.36 : Numune 3-Sıvada kabarma ve kopmalar 74
Şekil 4.37 : Numune 3-Dolgu duvarda oluşan kesme çatlakları ve hasar..... 75
durumu
Şekil 4.38 : Numune 3-12. çevrim sonrası numune hasar durumu 75
Şekil 4.39 : Numune 3-Sağ ve sol kolonda görülen eğilme çatlakları 76
Şekil 4.40 : Numune 3-Duvar köşelerinde gözlenen sıva kopmaları 76
Şekil 4.41 : Numune 3-14. çevrim sonrası numune hasar durumu 77
Şekil 4.42 : Numune 3-Duvar köşelerinde gözlenen sıva kopmaları 77
Şekil 4.43 : Numune 3-Duvar köşelerinde gözlenen tuğla düşmeleri 78
Şekil 4.44 : Numune 3-Sağ kolon alt bölgede oluşan kesme çatlağı 78
Şekil 4.45 : Numune 3-Kolon-kiriş birleşim bölgesinde gözlenen kesme..... 79
çatlakları
Şekil 4.46 : Numune 3-Duvar köşelerinde, tuğla duvarda kesme kırılmaları.. 79
Şekil 4.47 : Numune 3-Kolon alt bölgelerinde kesme kırılmaları 80
Şekil 4.48 : Numune 3-Kirişe paralel çatlakların görünümü 80
Şekil 4.49 : Deneyler sonrası numune 3 hasar durumu 81
Şekil 4.50 : Numune 3-Kolon alt bölgesinde donatı burkulmaları 81
Şekil 4.51 : Numune 3-Kolon üst bölgede kesme kırılması 81
Şekil 4.52 : Numune 3-Yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi 82
Şekil 4.53 : Numune 3-Eğrilik-ötelenme eğrisi 84
Şekil 4.54 : Numune 3-Rijitlik-ötelenme eğrisi 84
Şekil 4.55 : Numune 4-Karbon elyaf uygulama detay çizimleri 85
Şekil 4.56 : Numune 4-Karbon elyaf uygulanacak bölgelerin belirlenmesi.... 86
Şekil 4.57 : Numune 4-Ankraj deliklerinin açılması ve temizliği 86
Şekil 4.58 : Numune 4-Karbon elyaf ankrajlar 87

Şekil 4.59 : Numune 4-Diyagonal CFRP bantların yapıştırılması 88
Şekil 4.60 : Numune 4-5. çevrim sırasında gözlenen ilk çatlaklar 89
Şekil 4.61 : Numune 4-Yatay yük-ötelenme eğrisi 89
Şekil 4.62 : Numune 4-6. çevrim sırasında oluşan çatlaklar 90
Şekil 4.63 : Numune 4-Sıvada ve CFRP bantta kabarmalar 90
Şekil 4.64 : Numune 4-Dolgu duvarda oluşan kesme çatlakları 91
Şekil 4.65 : Numune 4-Tuğla duvarda kopmalar 91
Şekil 4.66 : Numune 4-11. çevrim sonrası sıva kopmaları 92
Şekil 4.67 : Numune 4-12. çevrim sonrası kolonda eğilme çatlakları 92
Şekil 4.68 : Numune 4-12. çevrim sonrası duvar sıvasında kabarmalar 93
Şekil 4.69 : Numune 4-13. çevrim sonrası CFRP bantların durumu 93
Şekil 4.70 : Numune 4-14. çevrim sonrası CFRP bantların durumu 94
Şekil 4.71 : Numune 4-14. çevrim sırasında CFRP yatay bantta ayrışma 94
Şekil 4.72 : Numune 4-15. çevrim sırasında CFRP bantın koptuğu an..... 95
Şekil 4.73 : Numune 4-16. çevrim sırasında tuğlalarda dökülmeler..... 95
Şekil 4.74 : Numune 4-16. çevrim sırasında kolonlardaki kesme çatlakları..... 96
Şekil 4.75 : Numune 4-17. çevrim sırasında kolonlardaki kesme çatlakları.... 96
Şekil 4.76 : Numune 4-17. çevrim sırasında tuğlalarda dökülmeler 97
Şekil 4.77 : Numune 4-18. çevrim sonrası kolonlardaki kesme çatlakları..... 97
Şekil 4.78 : Numune 4-Deney sonrası çerçevenin görünümü..... 98
Şekil 4.79 : Numune 4-Deney sonrası kolon alt bölgelerinin görünümü..... 98
Şekil 4.80 : Numune 4-Deney sonrası CFRP çapraz bantların görünümü..... 98
Şekil 4.81 : Numune 4-Yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi 99
Şekil 4.82 : Numune 4-Eğrilik-ötelenme eğrisi 101
Şekil 4.83 : Numune 4-Rijitlik-ötelenme eğrisi 101
Şekil 4.84 : Numune 5-Karbon elyaf uygulama detay çizimleri 103
Şekil 4.85 : Numune 5-Karbon elyaf uygulanacak bölgelerin belirlenmesi.... 104
Şekil 4.86 : Numune 5-Diyagonal CFRP bantların yapıştırılması 104
Şekil 4.87 : Numune 5-Köşe bölgelere CFRP bantların yapıştırılması 105
Şekil 4.88 : Numune 5-CFRP ankrajların görünümü 105
Şekil 4.89 : Numune 5-Deney sırasında gözlenen ilk çatlaklar 106
Şekil 4.90 : Numune 5-Yatay yük-ötelenme grafiği 107
Şekil 4.91 : Numune 5-8. çevrim sonrası numunede çatlak oluşumu 117
Şekil 4.92 : Numune 5-11. çevrim sırasında duvardan sıva kopmaları 108
Şekil 4.93 : Numune 5-12. çevrim sonrası numune hasar durumu 109
Şekil 4.94 : Numune 5-CFRP bantların koptuğu bölgeler 109
Şekil 4.95 : Numune 5-CFRP bantın koptuğu ankraj noktası 110
Şekil 4.96 : Numune 5-15. çevrim sırasında kolon orta bölgesinde oluşan..... 110
kesme çatlakları
Şekil 4.97 : Numune 5-17. çevrim sırasında kolonlarda kesme çatlakları 111
Şekil 4.98 : Numune 5-17. çevrim sonrası çerçevenin görünümü..... 112
Şekil 4.99 : Numune 5-Deney sonrası numunenin görünümü 112
Şekil 4.100 : Numune 5-Deney sonrası kolon alt bölgelerinin görünümü 113

Şekil 4.101 : Numune 5-Deney sonrası kolon alt bölgelerinde CFRP..... 113
malzemenin görünümü
Şekil 4.102 : Numune 5-Deney sonrası kolon-kiriş birleşim bölgelerinin..... 114
görünümü
Şekil 4.103 : Numune 5-Yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi..... 114
Şekil 4.104 : Numune 5-Eğrilik-ötelenme eğrisi..... 116

Şekil 4.105 : Numune 5-Rijitlik-ötelenme eğrisi..... 116
Şekil 4.106 : Numune 6-Karbon elyaf uygulama detay çizimleri..... 118
Şekil 4.107 : Numune 6-8. çevrim sonrası duvar iki yüzündeki kesme..... 119
çatlakları
Şekil 4.108 : Numune 6-Yatay yük-ötelenme eğrisi..... 120
Şekil 4.109 : Numune 6-10. çevrim sonrası numune hasar durumu..... 120
Şekil 4.110 : Numune 6-CFRP bantların koptuğu bölgeler 121
Şekil 4.111 : Numune 6-CFRP bantın koptuğu ankraj noktaları..... 122
Şekil 4.112 : Numune 6-CFRP bantın koptuğu kesişim noktası..... 122
Şekil 4.113 : Numune 6-15. çevrim sonrası CFRP çapraz bantta açılma..... 123
Şekil 4.114 : Numune 6-16. çevrim sırasında numune hasar durumu..... 124
Şekil 4.115 : Numune 6-17. çevrim sırasında kolon alt bölgesinde kesme..... 124
çatlakları
Şekil 4.116 : Numune 6-17. çevrim sonrası çerçevenin görünümü..... 125
Şekil 4.117 : Numune 6-18. çevrim sırasında beton pas paylarının dökülmesi. 125
Şekil 4.118 : Numune 6-Deney sonrası numune genel görünümü..... 126
Şekil 4.119 : Numune 6-Deney sonrası kolonlarda görülen donatı..... 126
burkulmaları
Şekil 4.120 : Numune 6-Yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi..... 127
Şekil 4.121 : Numune 6-Eğrilik-ötelenme eğrisi..... 129
Şekil 4.122 : Numune 6-Rijitlik-ötelenme eğrisi..... 129
Şekil 4.123 : Yatay yük-ötelenme zarf eğrisi..... 135
Şekil 4.124 : Enerji sönümleme-ötelenme eğrisi..... 139
Şekil 4.125 : Rijitlik-ötelenme eğrileri..... 140
Şekil 4.126 : Tüm ötelenme oranlarını gösteren rijitlik-ötelenme eğrisi..... 141
Şekil 5.1 : Yatay yük etkisindeki dolgu duvar-betonarme çerçeve..... 144
Şekil 5.2 : Plastik mafsal kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi..... 148
Şekil 5.3 : Kesit hasar bölgeleri..... 149
Şekil 5.4 : M3 mafsalı moment-dönme ilişkisi..... 149
Şekil 5.5 : Çerçevedeki M3 mafsalları moment-eğrilik ilişkisi..... 150
Şekil 5.6 : Çerçeve numuneleri için tanımlanan plastik mafsal noktaları..... 151
Şekil 5.7 : Beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi..... 152
Şekil 5.8 : Donatı çeliği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi..... 152
Şekil 5.9 : Eşdeğer basınç çubuğu modeli..... 154
Şekil 5.10 : Rijit uç bölgeleri..... 155
Şekil 5.11 : Dolgu duvar gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi..... 157
Şekil 5.12 : Dolgu duvarlı çerçeve parametreleri..... 158
Şekil 5.13 : Karbon lif kaplama düzenleri..... 159
Şekil 5.14 : Eşdeğer çubuk modelinin çerçeve ile yatay ve düşey temas..... 160
genişlikleri
Şekil 5.15 : Fardis'in önerdiği dolgu duvar yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi... 164
Şekil 5.16 : El-Dakhakhni tarafından önerilen dolgu duvar modeli..... 165
Şekil 5.17 : Numune 1-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 167
Şekil 5.18 : Numune 1-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması 168
Şekil 5.19 : Numune 2-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 169
Şekil 5.20 : Numune 2-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması..... 170
Şekil 5.21 : Numune 3-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 171
Şekil 5.22 : Numune 3-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması 172
Şekil 5.23 : Numune 4-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 173
Şekil 5.24 : Numune 4-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması 174

Şekil 5.25 : Numune 5-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 175
Şekil 5.26 : Numune 5-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması176
Şekil 5.27 : Numune 6-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları..... 177
Şekil 5.28 : Numune 6-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması178

SEMBOL LİSTESİ

b : Kirişin faydalı yüksekliği
h : Kolonun gözönüne alınan deprem doğrultusundaki enkesit boyutu
C : Çimento
$\mathbf{l_b}$: Çekme donatısı için verilen kenetlenme boyu
$\mathbf{b_w}$: Kiriş gövde genişliği
I : Bina önem katsayısı
Ø : Donatı çapı
R : Deprem yükü azaltma katsayısı
% : Yüzdelik değer
δ : Tepe yerdeğiştirme
$\mathbf{f_c}$: Beton basınç dayanımı
$\mathbf{f_{cc}}$: Sargılı beton basınç dayanımı
$\boldsymbol{\varepsilon_{cc}}$: Beton birim kısalması
$\boldsymbol{\varepsilon_{cu}}$: Beton maksimum birim kısalması
$\boldsymbol{\varepsilon_{sp}}$: Beton dağılma birim kısalması
$\boldsymbol{\varepsilon_y}$: Donatı akma şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$: Kopma uzaması
$\mathbf{f_y}$: Donatı akma dayanımı
$\mathbf{f_{ck}}$: Beton karakteristik basınç dayanımı
$\boldsymbol{\varepsilon_e}$: Akma durumuna karşı gelen birim uzama
E : Donatı elastisite modülü
$\boldsymbol{\sigma_e}$: Donatı çeliği akma gerilmesi
$\mathbf{h_{inf}}$: Dolgu duvar yüksekliği
$\mathbf{h_{kolon}}$: Kolon yüksekliği
$\mathbf{E_{fe}}$: Çerçeve malzemesinin elastisite modülü
$\mathbf{E_{me}}$: Dolgu duvar malzemesinin elastisite modülü
$\mathbf{I_{kolon}}$: Kolonların atalet momenti
$\mathbf{L_{inf}}$: Dolgu duvar uzunluğu
$\mathbf{r_{inf}}$: Dolgu duvarın diyagonal uzunluğu
$\mathbf{t_{inf}}$: Dolgu duvarın kalınlığı
$\mathbf{a_{duvar}}$: Eşdeğer sanal çubuk genişliği
$\mathbf{h_k}$: Kolon boyu
$\mathbf{h_d}$: Duvar boyu
$\mathbf{r_d}$: Dolgu duvar köşegen uzunluğu
$\mathbf{t_{duvar}}$: Duvar kalınlığı
$\mathbf{I_k}$: Kolon atalet momenti
$\mathbf{E_{duvar}}$: Duvar elastisite modülü
$\boldsymbol{\theta}$: Eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açı
$\boldsymbol{\lambda h}$: Duvar-çerçeve rijitlik ilişkisi parametresi (boyutsuz parametre)
$\boldsymbol{\alpha}$: Duvar ile kolon arası temas uzunluğu
$\boldsymbol{\alpha_h}$: Dolgu duvar ile kolon arası düşey temas yüzeyi genişliği
$\boldsymbol{\alpha_L}$: Dolgu duvar ile kiriş arası yatay temas yüzeyi genişliği

$\mathbf{w}$: Eşdeğer basınç çubuğu genişliği
$\mathbf{E_cI_c}$: Kolon eğilme rijitliği
$\mathbf{E_bI_b}$: Kiriş eğilme rijitliği
$\mathbf{M_{pj}}$: Kolon veya kirişin minimum plastik moment kapasitesi
$\mathbf{f_{bmp}}$: Duvar basınç dayanımı
$\mathbf{\alpha_c h_{in}}$: Kolon boyunca temas yüzeyi uzunluğu
$\mathbf{G_w}$: Diyagonal basınç deneylerinden elde edilen kesme modülü
$\mathbf{f_{ws}}$: Diyagonal basınç deneylerinden elde edilen kesme dayanımı
$\mathbf{l_w}$: Duvar uzunluğu
$\mathbf{h_w}$: Duvar yüksekliği

DOLGU DUVARLI ÇERÇEVELERİN KARBON LİFLİ KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan; birbirine bitişik, iki cepheli bina sayısının fazla olduğunun gözlendiği ülkemizde, dolgu duvarlı çift taraflı sıva uygulamasının mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek yüz/çift yüz sıvanın etkisi ve çerçeveye olan katkısı, tek/çift taraflı karbon lifler ile güçlendirmenin yapıda nasıl bir performans gösterebileceğinin yorumlanmış olmasıdır.

Çalışma kapsamında, uygulamada çok karşılaşılan betonarme yapıların özelliklerini yansıtan 6 adet, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, tek katlı numuneler üzerinde, bu tür sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri, rijitlik ve enerji sönümleme gibi özelliklerini karşılaştırmak amacıyla deneysel bir dizi çalışmalar tasarlanmıştır. Numuneler; boş çerçeve, dolgu duvarlı / tek yüzü ve çift yüzü sıvalı çerçeve, dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı tek yüzü/çift yüzü karbon lifli kompozitler ile güçlendirilmiş çerçeve olarak üretilmiş, her numune üzerinde yerdeğiştirme kontrollü yük artırımı yöntemi uygulanarak, numuneler deneye tabi tutulmuşlardır.

Konunun genel olarak araştırılmasından ve deneysel çalışmalardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı verilerin yorumlanmasına bağlı olarak, karbon lifli kompozitler ile tek yüzü ve iki yüzü birden güçlendirilen sıvalı ve sıvasız dolgu duvarlı çerçeve modellerinin performansları ve yatay yük altındaki davranışları, enerji yutma kapasiteleri ve rijitlik değişimleri, oluşan hasar dağılımları, genel göçme mekanizması yorumlanmış, başarılı bir uygulama için bazı prensipler, deneysel olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar kuramsal çözümlemeden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaç doğrutusunda çalışmanın ilk bölümünde öncelikle çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmış, güçlendirme kavramı, dolgu duvarların yapı davranışına etkisi, güçlendirilmesi ve karbon lifli kompozitler ile güçlendirme yöntemleri anlatılmıştır. İkinci bölümde, konu ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalardan kronolojik sıraya göre bahsedilmiş, karbon lifler ile güçlendirme yönteminin gelecekte çok sık kullanılacak bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Üçüncü bölümde deney numunelerinin özellikleri, deney numunelerinin üretim aşamaları ve deney düzeneği açıklanmış, deneylerde kullanılan malzeme özellikleri belirtilmiştir. Deney sonuçlarının detaylı şekilde anlatıldığı dördüncü bölümün sonrasında, beşinci bölümde numunelerin analitik modellemeleri tamamlanmış, altıncı bölümde ise deney verileri alt başlıklar halinde toplanarak, modelleme sonuçları ile karşılaştırılmış, karbon lifler ile tek veya çift taraflı etkili güçlendirmede ortaya çıkan sonuç ve değerlendirmeler anlatılmıştır.

Deney sonuçlarına göre belirli işlem kriterlerine bağlı kalındığında söz konusu tek ve çift taraflı güçlendirme yönteminin her ikisinin de deney elemanlarının göçme

davranışları, yatay yük taşıma gücü, enerji sönümleme miktarı ve rijitlik değerleri bakımından olumlu sonuçlar sağladığı ortaya konmuştur. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu kavramı kullanılarak dolgu duvarlar modellenmiş, analitik çalışma deneysel çalışmada elde edilen global davranışı yeterli bir yakınsaklıkla tahmin etmiştir. Karbon elyaf malzemenin çerçevenin bir köşesinden diğerine uzanan çaprazlar olarak düzenlenmesi uygun bir güçlendirme tekniği olarak görülmüş, başarılı ankrajlama sonucu, güçlendirilmiş dolgulu çerçevenin dayanımının, güçlendirilmemiş dolgu duvarlı çerçevenin yaklaşık iki katına eriştiği gözlenmiştir. Daha da önemlisi, güçlendirilmemiş dolgu duvar, tersinen tekrarlanan yükler altında dağıldıktan sonra, davranış çerçeve davranışına dönüşürken, güçlendirilmiş dolgu dağılmadığından, daha fazla enerji sönümleyebilmektedir. Duvarda çapraz olarak uygulanan karbon lifli kompozitler üzerindeki ankrajlar, karbon elyafın duvar üzerinde daha fazla tutunabilmesinde çok etkili olmuşlardır.

Karbon lifli kompozit malzeme ile daha etkili güçlendirme yapılması için, numuneyi her iki yüzünden güçlendirerek, çift yüz ankraj uygulaması ve kolon mesnet bölgeleri ile dolgu duvarlarda uygulanan diyagonal karbon lifli kompozitlerde de ankraj sayısını artırmanın oldukça etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Dolgu duvardaki karbon lif ankrajları, duvarın iki yüzündeki karbon lif örtülerini birbirine bağlayarak duvardan ayrılmalarını önlemiş ve dolgu duvarların çerçeve ile birlikte deney sonrası fazla dökülme olmadan ayakta kalabilmesini sağlamıştır. Güçlendirilen deney numuneleri sünek davranış sergilemiş, göçme sonrasında da maksimum yük taşıma kapasiteleri diğer numunelere göre daha yüksek değerlerde kalmıştır.

STRENGTHENING OF INFILLED RC FRAMES WITH CARBON FIBER COMPOSITES

SUMMARY

The main contribution of this study is to analyze the effect of frames with single/double-sided plasters and its benefits on the frame in adjacent reinforced concrete structures with infilled walls where it is not possible to apply double-sided plasters as well as strengthening the walls with carbon fiber composites materials.

Within the scope of work, 6 single-bay, one-story, 1/3 scaled reinforced concrete frames were designed, reflecting the properties of reinforced concrete structures in practice. These specimens were tested to determine their lateral load capacity, rigidity and energy dissipation capacities. Specimens were designed as bare frame, infilled frames with single/double side plastered and infilled frames of single side plastered, single side/double side strengthened with carbon fiber composites and tested under cyclic horizontal loads.

Various researches have investigated the performance of reinforced concrete frames with infilled walls strengthened/unstrengthened with carbon fiber composites and applied single/double sided plastered and some principles were suggested for a successful application. The test results were compared with the numerical results obtained from the nonlinear static pushover analyses.

For this purpose, the first chapter describes the objective and scope of the study, the concept of retrofitting, the effects of infilled walls on the behaviour of RC frames and strengthening methods of infilled walls with carbon fiber composites. The second part of the study includes the summary of previous researches in a chronological order and strengthening methods with carbon fiber composites were highlighted in particular for its usage in the future. In the third chapter, the geometric properties of the specimens, the mechanical properties of materials used in the production of the specimens and the procedure of the experimental programme were explained. After the fourth chapter, which is the experimental results that were described in detail, the analytical study was completed in the fifth chapter. The sixth and the last part of the thesis describes the conclusions and recommendations based on the test results compared with the analytical studies.

The test results proved that the both single and double-sided strengthening method with carbon fiber composites applied on the infilled walls improved the lateral load capacity, rigidity and energy dissipation capacities of the specimens.

The infilled walls were modelled by using equivalent diagonal strut concept and calibrated with the test results. The models generally predicted the global behavior of the specimens satisfactorily.

The procedure of strengthening diagonally of the reinforced concrete frames with carbon fiber composites from one corner to the other was suggested as a useful method and it was observed that the lateral load capacity of strengthened infilled frames has become approximately twice than that of the unstrengthened infilled frame with successful anchorage.

More important, while the unstrengthened infilled frames shows bare frame behaviour after failure under cyclic horizontal loads, the strengthend frame dissipated more energy after failure of the specimen. CFRP anchors applied to the diagonal carbon fiber composites on the infilled walls provided to hold the CFRP on the infilled walls more efficiently. To increase the number of CFRP anchors from double sides on the infilled wall and at beam-column joints is recommended for efficient strengthening. Strengthened test specimens behaved more ductile and their maxiumum load carrying capacities were at higher values than unstrengthened specimens after failure of the specimen.

1. GİRİŞ

Ülkemizin tamamına yakın bölümünün dünyanın önde gelen deprem bölgelerinde yer aldığının bilinmesine rağmen yapılaşmadaki yetersizlikler ve hatalar depremlerde büyük hasarlara yol açmakta ve çok sayıda can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Türkiye'de çok büyük depremler olmuştur ve olacaktır; bu durumda depreme karşı önlem alınması ve yapı hasarlarının önlenmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Ülkemizin depremselliği bilinmesine karşın uzun yıllar 'depreme dayanıklı yapı' kavramına önem verilmemiş, depreme karşı durumu belirsiz, yeterliliği şüpheli büyük bir yapı stoku ortaya çıkmıştır [1].

Betonarme yapı elemanlarının, tasarım ve uygulama hataları, zamana bağlı zayıflamalar, kullanım amacının değiştirilmesi ve yeni yönetmeliklere göre yetersiz kalması gibi nedenlerle onarım ve/veya güçlendirilmesi gerekebilmektedir. Yapısal olarak yetersiz olan bina sayısının fazlalığı, yapım yöntemlerinin farklılığı, halen kullanımda olmaları ve ülkenin ekonomik durumu da göz önüne alınarak, her yapı için uygun olabilecek farklı onarım/güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir [2].

Son depremler sonrası yapılan araştırmalarda Türkiye'deki betonarme yapıların önemli bir kısmının onarım ve güçlendirilmesinin gerektiği görülmektedir. Bu konu ile ilgili en büyük sorun, depreme karşı güçlendirilmesi gereken çok sayıda bina bulunması ve bunların boşaltılarak güçlendirilmesinin pratik bir çözüm olmamasıdır. Bu sorunun çözümü için güçlendirme aşamasında binanın kullanımını engellemeyecek, başka bir deyişle binanın boşaltılmasını gerektirmeyecek yöntemler geliştirmek gerekmektedir [3]. Deprem gibi doğal afetlerden sonra, hastane gibi bazı yapıların çok hızlı bir şekilde onarım ve güçlendirilmesi gerekmekte, bu işlemler sırasında hastanelerin faaliyetlerine devam edebilmesi beklenmektedir. Aynı durum işleyişi durdurmanın maliyetinin çok yüksek olduğu fabrika binaları için de geçerlidir [2].

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Konunun genel olarak araştırılmasından ve deneysel çalışmalardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı verilerin yorumlanmasına bağlı olarak, karbon elyaf ile tek yüzü ve iki yüzü birden güçlendirilen sıvalı ve sıvasız dolgu duvarlı çerçeve modellerinin performansları ve yatay yük altındaki davranışları, enerji yutma kapasiteleri ve rijitlik değişimleri, oluşan hasar dağılımları, genel göçme mekanizmasının yorumlanması, başarılı bir uygulama için bazı prensiplerin deneysel olarak ortaya konulması, yöntemin sonuçlara bağlı olarak yorumlanması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında, uygulamada çok karşılaşılan betonarme yapıların özelliklerini yansıtan 6 adet, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, tek katlı numuneler üzerinde, bu tür sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri ve diğer davranış özelliklerini karşılaştırmak amacıyla deneysel bir dizi çalışmalar tasarlanmıştır. Numuneler;

- Boş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,

olarak üretilmiş, her numune üzerinde yerdeğiştirme kontrollü yük artırımı yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar yorumlanmış, kuramsal çözümlemeden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Üretilen numuneler deney düzenekleri yardımıyla artan yer değiştirme çevrimleri etkisinde deneye tabi tutulmuştur. Deneyler sonrasında; çerçeve sistemleri arasındaki davranış farklarının görülmesi, dolgu duvarların, sıvalı ve karbon lif ile güçlendirilmiş dolgu duvarların çerçeve sistemlere etkilerinin anlaşılması amaçlanmıştır.

Ülkenin yapı profiline bakılacak olursa, bitişik nizam binaların çokluğu göze çarpmaktadır. Bu çalışmayı da diğer çalışmalardan farklı kılan; bitişik nizam, dolgu duvarlı çift taraflı sıva uygulamasının mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek

yüz/çift yüz sıvanın etkisi ve dolgu duvarlı çerçeveye olan katkısı, çift taraflı güçlendirmenin mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek taraflı güçlendirmenin yapıda nasıl bir performans gösterebileceği analizinin yorumlanmış olmasıdır.

1.2 Yapıların Güçlendirilmesi

Depreme dayanıklı yapı yönetmeliklerince sağlanması istenen koşulların amacı yapılarda olması istenen en düşük düzeyde güvenlik sağlanmasıdır. Daha iyi deprem davranışı ve daha yüksek güvenlik için yönetmelik koşullarının daha üstünde koşulların gerçekleştirilmesi gerekir. DBYBHY'de depreme dayanıklı yapı tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can kaybını önlemek amacı ile binaların kısmen veya tamamen göçmesinin önlenmesidir.

1.2.1 Güçlendirme kavramı

Son yıllarda, özellikle ülkemizde üretilen betonarme yapıların, projelendirilmesi, uygulanması ve kullanılması esnasında yapılan bir takım hatalar veya verilen yanlış kararlar, yapıya taşıyıcı eleman ve malzeme açısından yapılması gereken bir takım müdahale ve değişiklikleri gerektirmektedir. Betonarme taşıyıcı sistemde yapılan bu tür değişiklik ve eklemeler, yeri ve amacına göre onarım, güçlendirme, iyileştirme adları ile tanımlanarak uygulanmaktadır. Taşıyıcı sisteme müdahale işleminin, sınırlı bir hasarın giderilmesi için yapılmasına veya depremde hasar görüp taşıma gücü azalmış elemanlara deprem öncesi taşıma gücü değerlerini yeniden kazandırma işlemine "onarım" denir. Onarım, güçlendirme ve yenileme iç içe girebilen işlemlerdir [4].

Hasar olsun veya olmasın, taşıyıcı sistemin tümünün ya da belli elemanlarının taşıma gücünü artırmak veya ekonomik ömrü boyunca muhtemel bir depremde hasar gören yapının, aynı boyutta depremlerin birçok kez yinelenmesi beklentisi karşısında aynı hasarın tekrarlanmaması için eski durumundan daha güçlü duruma getirilmesi için yapılan müdahale işlemlerine genel olarak "güçlendirme" denir.

Onarım ve güçlendirme, bir bilim olduğu kadar sanattır. Bu işle uğraşan mühendisin çok iyi bir davranış bilgisine sahip olması gerekir. Hiçbir onarım/güçlendirme yöntemi bir şablon olarak uygulanamaz. Yöntem, binanın özelliklerine göre şekillendirilmelidir. Bilinçsiz yapılan onarım/güçlendirme, yararlı olamayacağı gibi, binayı daha da zayıflatabilir [3].

Betonarme yapılarda onarım, güçlendirme gibi çoğu zaman yapı hizmet halindeyken bile kolaylıkla uygulanması istenen işlemleri veya çeşitli nedenlerle yapılacak taşıyıcı sistem değişikliklerini gerçekleştirmek için kullanılabilecek çeşitli yöntemler vardır. Bu tür yöntemlerden elde edilmesi öngörülen performans kriterleri; taşıyıcı sistemin taşıma gücü değerlerinin güvenlik sınırlarına yükseltilmesi, uygulama sonunda ulaşılan değerlerin zaman ve ortam şartlarından etkilenmeden korunabilmesi, hizmet halinde olan bir yapıda uygulanabilecek basit bir işlem dizisine sahip olması, uygulandıktan sonra kısa sürede yüksek taşıma gücü değerlerine ulaşarak hizmete verilebilmesi ve maliyet-performans oranının uygun olması olarak ifade edilebilir [5].

1.2.2 Dolgu duvarların yapı davranışına etkisi ve güçlendirilmesi

Yakın gelecekte ülkemizde gerçekleşeceği tahmin edilen büyük depremler etkisinde kalacak mevcut yapı stoku profili ele alınırsa, büyük kısmının bölme duvarlı çerçeve sistemlerden oluştuğu gözlenmektedir. Bu yüzden bölme duvarlı çerçeve sistemlerin deprem karşısındaki davranışlarının çok daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulması kaçınılmazdır. Dolgu duvarların yatay rijitlik ve dayanım yanında enerji tüketimi ve yapısal sönüm üzerindeki etkilerini kavramak amacıyla deneysel ve analitik bir çok çalışma yapılmış ve halen de devam etmektedir.

Dolgu duvarlar sistem rijitliği, taşıma gücü ve sistem sünekliği gibi başlıca özellikler bakımından yapı sistemlerini olumlu etkilemektedir. Dolgu duvarları yatay rijitliği artırarak, yatay yerdeğiştirmeleri küçültmekte, dolayısıyla yapıda meydana gelen ikinci mertebe etkileri azaltmaktadır. Bir diğer etki olarak da, dolgu duvarlar yatay rijitliği artırdığı için, sistem daha stabil bir konuma sahip olmakta ve dolayısıyla sistemin periyodu azalmaktadır [6].

Yapının elastik sınırların ötesinde plastik şekildeğiştirme yapabilmesi betonarme elemanların belli bir dayanıma sahip olmasının yanında süneklik kapasitesinin de yüksek olmasına bağlıdır [7]. Dolgu duvar denince akla ilk olarak mekanları birbirinden ayıran, ses ve ısı yalıtımı sağlayan ve yapının işlevsellik ve estetiğine katkıda bulunan yapı elemanı olduğu gelmektedir [6]. Halbuki yapılan çalışmalar göstermiştir ki; dolgu duvarlar, deprem etkisindeki bir yapının yatay rijitlik ve yatay yük taşıma kapasitesini, sistemin dayanımını önemli ölçüde artırmaktadırlar. Yapıda dolgu duvarların bulunması çerçeveye ek bir rijitlik kazandırarak yatay yerdeğiştirmeleri küçültmekte, yapıdaki kuvvet dağılımında etkili olmaktadır. Duvarlarda meydana gelen hasar yapının tamamına yayılarak deprem enerjisinin bir bölümü söndürülmektedir.

Dolgu duvarların yapı sisteminde taşıyıcı özelliği olmadığı düşünülmektedir ve bundan dolayı da yapı sistemlerinin modellenmesi ve analizinde sadece kütle olarak göz önüne alınarak çözüm yapılmaktadır. Dolgu duvarlar bir yapıda bu kadar etkiye ve öneme sahip olduğu için, yapı çözümlemesinde dolgu duvarların hesaba katılması da o kadar önem kazanmaktadır [6].

Betonarme çerçeve sistemlerde karşılaşılan depremler sırasında dolgu duvarların da yapının mukavemetinde önemli etkileri bulunmaktadır. Duvarın mukavemetini belirleyen parametreler olarak; duvarların plandaki düzenlenme biçimleri, doluluk boşluk oranları, duvardaki boşluk oranları ve duvarı oluşturan malzemelerin mukavemetleri sayılabilir.

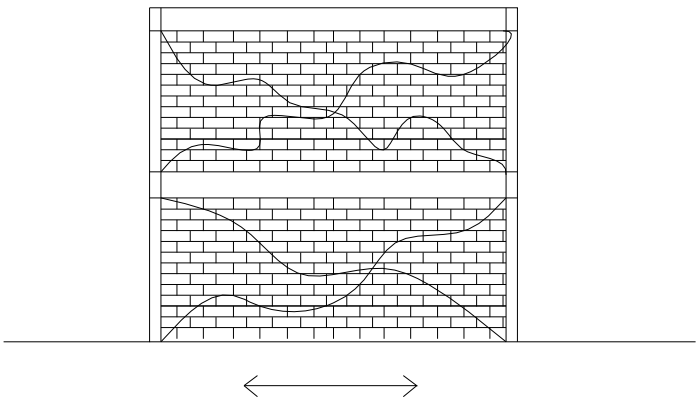
Yanal rijitliği yetersiz betonarme çerçeve sistemlerde deprem sırasında gelen deprem kuvvetleri sonucu dolgu duvarlarda 458'lik kesme çatlakları oluşmaktadır (Şekil 1.1). Bu çatlakların nedeni dolgu duvarların yeterli dayanıklılıkta olmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.1 : Dolgu duvarlarda deprem etkisiyle oluşan kesme çatlağı.

Yapı elemanlarının rijitliği uygun seçilip, yapı rijitliği artırılarak, titreşim periyodunun değeri küçültülmüş olup, dolayısıyla depremde meydana gelecek şekil ve yer değiştirmelerin azaltılması mümkün olmaktadır. Bu şekilde taşıyıcı sistemle ona bağlı bulunan taşıyıcı olmayan kısımlardaki hasarlar da azaltılmış olur.

Elastik yapılarda istenmeyen diğer bir durum yatay yer değiştirmenin büyümesi ile ikinci mertebe etkilerin artmasıdır. Böylece deprem yüklerinin etkisinde katlar arası büyük yer değiştirmeler meydana gelerek dolgu duvarlarda geniş X çatlakları oluşmaktadır (Şekil 1.2). Dolgu duvarların bulunması çerçeveye ek bir rijitlik kazandırarak çoğunlukla yapının periyodunu küçültür ve yapıdaki kuvvet dağılımı üzerinde etkili olur. Dolgu duvarlarda meydana gelen hasar sayesinde deprem enerjisinin bir bölümü söndürülmüş olur [6].



Şekil 1.2 : Dolgu duvarlarda deprem etkisiyle oluşan X çatlağı.

Ancak bu etkinin tam olarak sağlanabilmesi dolgu duvarların taşıyıcı elemanlara bağlantısı, dolgu duvarın içerdiği boşluklar ve üzerinde bulunan sıva ve kaplama malzemesi gibi birçok değişkene bağlıdır. Duvarların plandaki düzenlenme biçimleri, doluluk boşluk oranları, duvar malzemesi boşluk oranları ve duvarı oluşturan malzemelerin -tuğla basınç dayanımı, harç ve sıva kaplaması, tuğla yüksekliği, harç tabakası kalınlığı- özellikleri dolgu duvarın dayanımını etkilemektedir. Sıvalı veya sıvasız duvarlarda elastisite modülü farklı değerler almaktadır. Yani sıva özellikleri de duvar dayanımını etkileyen özelliklerden birisidir.

Dolgu duvarlar betonarme çerçeveler kadar esnekliğe sahip değillerdir. Bundan dolayı yapı sisteminin depreme maruz kalmasından bir süre sonra yer aldıkları betonarme çerçevenin hareketine uyum göstermeyen dolgu duvarlarda büyük çatlaklar meydana gelmekte, kesme çatlakları oluşmakta, yatay ötelenmeler belirli bir düzeyi aştığında söz konusu duvarlar ezilerek devre dışı kalmakta ve çerçevenin davranışına katkıda bulunamamaktadırlar [8].

Yapıda dolgu duvarların bulunması sonucu, özellikle yatay yükler altında oluşan yerdeğiştirmeler incelendiğinde, çerçeve rijitliklerinin artmasıyla yatay yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde küçüldükleri kolayca görülmektedir. Ancak dolgu duvarlar nedeniyle yapının rijitlik merkezini olumsuz yönde etkileyerek, yapıda beklenmeyen burulma etkilerinin oluşmasına ve taşıyıcı elemanlar üzerinde önemli sayılabilecek yapısal çatlakların oluşmasına neden olabilirler.

Dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışı üzerinde etkili olabileceği görüşünün ortaya atılmasından sonra, bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Problem, önceleri tek katlı çerçeveler üzerinde deneysel olarak incelenmiştir [9,10]. Daha sonra sayısal hesap yöntem ve tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, problemin matematik modelinin sonlu elemanlarla ifade edilebilmesi bu alanda yapılacak kuramsal çalışmaların önünü açmış ve birçok çalışma sonlu elemanlar yöntemiyle sonuçlandırılmıştır.

1.2.3 CFRP malzeme ile güçlendirme

Yapıların güçlendirilmesinde her geçen gün yeni teknikler geliştirilmekte ve kullanılmaya başlanmaktadır. Karbon lifli kompozit malzemeler ile güçlendirme de bu yeni tekniklerden biridir. Karbon lif ile güçlendirme, uygulamanın kolaylığı ve

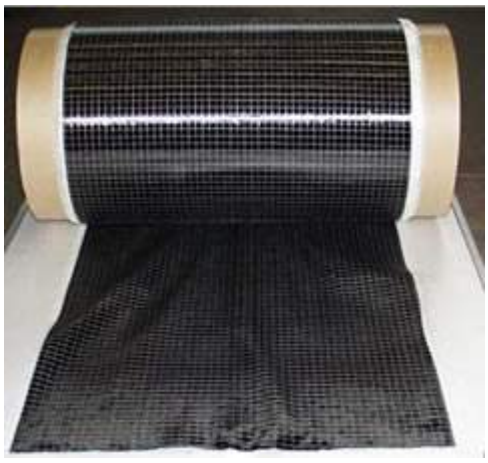
yapı kullanım alanının olumsuz etkilenmemesinden dolayı büyük avantaja sahiptir. Bu sayede yapılar boşaltılmadan yapının depreme karşı güçlendirilmesi sağlanabilmektedir. FRP malzemeler betonarme elemanların onarım ve güçlendirmesinde uygun şekilde kullanıldığında, deprem etkisindeki bir yapının yatay rijitlik ve yatay yük taşıma kapasitesini, sistemin dayanımını, süneklik ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadırlar.

Karbon lif takviyeli polimerlerin birim ağırlığının düşük olması yapıya ek bir yük getirmemekte, ayrıca uygulandığı elemanın boyutunu da değiştirmemektedir [11]. Çevre koşullarına karşı dayanıklı olmaları, elemanı dış etkilerden, özellikle nemden koruması, korozyon gibi istenmeyen durumlar için ideal bir koruma sağlamaktadır. Bina türü yapılar için de bu tür bir uygulama, yetersiz olan sünekliği, bina toplam ağırlığını büyük ölçüde değiştirmeden artırmasıyla sistemin depreme karşı olan davranışının önemli oranda iyileşmesini sağlamaktadır.

Malzemenin boyut ve şekle bağlı çok seçenekliliği, hafiflik ve dayanıklılık gibi üstünlükleri nedeniyle günümüzde ve yakın gelecekte çok daha geniş ve kapsamlı bir kullanım alanı beklenmelidir. Yüksek maliyetine karşın bu avantajları düşünüldüğünde, fiyat/performans oranının yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca artan taleple birlikte polimer lif ile birlikte uygulamada gerekli olan malzemelerin ucuzlayacağı da unutulmamalıdır [12].

Günümüzde onarım ve güçlendirme uygulamalarında kullanılan FRP malzemeler iki türde bulunmaktadır; plakalar ve dokumalar. Plakalar; karbon, cam vb. gibi liflerin, fabrika ortamında, epoksi reçine matrisi ile doyurularak sahada kullanılmaya hazır hale getirilmiş FRP malzemelerdir. Plakalar sahadaki işçiliği kolaylaştırır ve işçilik hatalarını en aza indirir [2]. Değişik kalınlıkta ve genişlikte olabilirler.

Dokumalar; tek yönlü, çift yönlü (90° veya 45°) liflerin dokuma şeklinde bir araya getirilmesi ile hazırlanır. Daha çok sargılamada kullanılır, ama eleman eksenine paralel olarak yapıştırılarak, boyuna donatı olarak da kullanılabilir. Çok ince ve esnek olduğu için taşıması kolaydır [2].



Şekil 1.3 : Karbon elyaf malzeme örneği.

Karbon elyafı çoğunlukla zift ve poliakrilonitril (PAN) olmak üzere iki malzemeden elde edilir. Zift kökenli karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon elyafları kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir.

Bugüne kadar bilinen yapı malzemeleri içinde çekme dayanımı en yüksek malzeme karbon elyaftır [13]. Karbon elyaflar tek doğrultuda çekme gerilmesine dayanıklı malzemedir. O doğrultu da elyafın lifleri yönündedir. Liflere dik etkilere yapım koşulları gereği malzeme direnç gösteremez.

Çelik ile karşılaştırıldığında yoğunluk çeliğin çok altında, elastik modül/yoğunluk oranı çeliğin çok üstündedir. Karbon elyaf genellikle çelikten yaklaşık 15 kat daha yüksek dayanıma sahip olup, 4 kat daha hafiftir. Çekme dayanımlarının yüksek olması ve hafiflikleri nedeniyle çoğu uygulamada metallerin yerini almaya başlamışlardır. Isıl genleşme açısından da çeliğe göre elverişli durumdadır [13]. CFRP plakaları ve levhaları tesis etme ve uygulama işlemi kolaydır çünkü sadece yapının yüzeyine yapıştırılmaları gerekmektedir ki bu da çelik levhalarla kıyaslandığında inşaat alanında daha az iş gücü anlamına gelir.
Günümüzde karbon elyaf malzeme; uçaklar, uzay mekikleri, tenis raketleri ve golf sopaları vb. alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Karbon elyafı kullanımda üstün kılan özellikler şunlardır;

- Yüksek mukavemet
- Düşük yoğunluk
- Korozyon direnci
- Düşük sürtünme ve yıpranma
- Elektrik iletkenliği
- Mükemmel yorulma direnci
- Mükemmel sünme direnci
- Mükemmel titreşim söndürme
- Düşük ısıl genleşme
- Yüksek ısı iletkenliği
- Yüksek sıcaklıkta direnç
- X ışınları geçirgenliği

Üniversitelerde FRP ile ilgili verilen derslerde ve kurslarda her geçen yıl artışlar gözlenmektedir. Dünyada çok sayıda üniversite bu konuya ilgi göstermektedir. CFRP ile yapılan çalışmalara ve uygulamalara bakıldığında betonarme yapılar üzerine bir yoğunlaşma olduğu görülmektedir.

Epoksi ile yapıştırılan FRP malzemelerle yapılan onarım ve güçlendirilme yöntemleri ise kalıp, demir donatı, beton dökümü ve kalıp söküm süresi gibi zaman alan imalatlar olmadığı için göreceli olarak daha hızlı yöntemlerdir. Kış aylarında yapılan tuzlama etkisi ile köprü taşıyıcı elemanlarının donatılarında korozyon olmakta ve sistemin taşıma gücü azalmaktadır. Rıhtımlar, su yapıları, rutubetli bodrum katlar gibi yapılarda demir donatı korozyona uğramakta ve betonarme elemanların taşıma gücü azalmaktadır. Bu gibi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde epoksi ile yapıştırılan FRP malzemeler en uygun malzeme olarak görülmektedir [2].

FRP kompozitler ile enine doğrultuda sargılama ile yapılan güçlendirme, sargılama etkisini artırmakta dolayısıyla elemanın basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesini geliştirmektedir. Bu yöntem, gevrek kesme göçmesinin ve boyuna donatı burkulmasının önlenmesinde ve bindirme boyu eksikliğinin giderilmesinde de etkili olabilmektedir. Bu şekilde, donatı burkulması, aderans kaybı ve kesme göçmesi gibi erken dayanım kayıpları engellenebilmekte, sargılama sayesinde süneklik özelliği geliştirilerek elemanların eğilme etkisinde dayanımlarına ulaşmaları

sağlanabilmektedir. Bu yöntemin, kolay ve kısa sürede uygulanabilirlik ve korozyona karşı dayanıklılık gibi avantajlarının yanında malzeme özellikleri açısından da hafif ve yüksek dayanımlı olması büyük önem taşır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak uygulanan elemanın boyutlarında büyük değişimin olmaması nedeni ile dar alanlarda ya da alan kaybına imkan vermeyen yerlerde tercih edilebilir. Ayrıca güçlendirilen elemanlarda önemli rijitlik artışına neden olmaması da bazı durumlarda avantaj olabilir.

2. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

CFRP malzemeler ile bu güne kadar yapılmış çalışma sayısı hayli fazladır. CFRP tabakaları kullanarak onarım ve güçlendirme çalışmaları ilk olarak 1970'li yıllarda Amerika ve Japonya'da geliştirilmiş, 1990'larda ise yapılan çalışma sayısı tüm dünyada, giderek artmıştır. Bu deneysel çalışma öncesinde incelenen bazı araştırmaların özeti şöyledir;

Ersoy ve Uzsoy (1971), 9 adet tek katlı, tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve üzerinde monolitik artan yatay yükler etkisinde çalışmış, dolgu duvarların yatay yük taşıma kapasitesini 7 kat artırdığı ve yatay yerdeğiştirmeyi %65 azalttığı gözlemlenmiştir [14].

Liauw ve Lee (1977), 4 katlı, dolgu duvarlı çelik çerçevelerin monolitik artan yatay yük etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Dolgu duvarlar ile çelik çerçevenin bağlantı şekli, çerçeve yüksekliği ve çerçeve açıklığı, deney değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler, analitik modellemesi yapılan çerçeve hesapları ile karşılaştırılmıştır. Çerçeve ile dolgu duvarları arasındaki bağlantı şeklinin oldukça önemli olduğu, bağlantı modelinin doğru uygulandığı numunelerde kesme çatlaklarının daha az görüldüğü gözlemlenmiştir [15].

Altın (1990), betonarme dolgu duvarlarla güçlendirilen betonarme çerçevelerin davranışı üzerinde bir çalışma yapmıştır. 14 adet, 1/3 ölçekli, çift katlı, tek açıklıklı numuneler üzerinde çalışılmış, deney değişkenleri, dolgu duvarların örülme tipi, betonarme çerçeve ile bağlantı detayları, yatay yük ve kolonların güçlendirilme şekli olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda betonarme çerçeve ile doğru biçimde bağlantısı sağlanan dolgu duvarların, sistemin yatay yük taşıma kapasitesi ve rijitliğini önemli ölçüde artırdığı kaydedilmiştir [16].

Altın, Ersoy ve Tankut (1992), betonarme dolgu duvarlı, betonarme çerçevelerin davranışı üzerinde çalışmışlardır. 14 adet, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı, dolgu duvarlı çerçeve tekrarlı tersinir yatay yük altında test edilmiştir. Yatay yük ikinci kat

üzerinden uygulanmış, deney değişkenleri, duvar dolgu modeli, dolgu duvarlar ile çerçeve bağlantı şekli, beton kalitesi ve eksenel yük uygulaması olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, çerçeve ile ankraj bağlantısı yapılmamış betonarme dolgu duvarlı numunenin yatay yük taşıma kapasitesi, boş çerçeveye oranla 2.4 kat artmış, çerçeve ile ankraj uygulaması yapılan numunenin davranışında olumlu gelişmeler gözlenmiştir [17].

Schwegler (1994), CFRP ile güçlendirilmiş beton ve duvar elemanları üzerinde çeşitli testler gerçekleştirmiş ve CFRP ile güçlendirmenin yatay yük taşıma ve süneklik bakımından oldukça etkili olduğu sonucuna varmıştır [18].

Reinhorn ve Madan (1995), iki yüzü farklı türde FRP ile güçlendirilmiş yığma duvar numuneleri yatay yükler etkisinde denemiş ve yığma duvarın asimetrik olarak güçlendirilmesinin etkisini incelemişlerdir. FRP ile güçlendirme yönteminin yığma duvarın yatay yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitesini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır [19].

Nanni ve Norris (1995), FRP kompozit ile sarılmış betonarme elemanlarının davranışını incelemek üzere 26 adet dikdörtgen ve daire enkesitli kolon üretmişlerdir. Numuneler, eğilme ve eksenel yük etkisinde ya da eksenel yük olmadan iki grup halinde test edilmiştir. İlk grupta daire enkesitli kolonlar, farklı genişlik ve kalınlıkta şekilde FRP kompozitler ile sarılmıştır. İkinci grupta ise dikdörtgen ve daire enkesitli kolonlar, numune boyutlarına göre önceden biçimlendirilen FRP kompozit ile güçlendirilmiştir. Bant şeklinde FRP ile güçlendirilen kolonlarda, orijinal numunelerde görülen beton ezilmesi ve kesme göçmesi engellenmiştir. Diğer kompozit türünün uygulandığı numunelerin bir kısmında, kompozit ile betonun aderansının çözülmesi ve çekmeden dolayı göçme olduğu görülmüştür. Bu güçlendirme işleminin dikdörtgen enkesitli kolonlar için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır [20].

Haroun ve diğ., (1996), 1/1 ölçekli bölme duvarlı betonarme çerçeve duvarlarının GFRP ile onarım ve güçlendirilmesi halinde, numunelerin yatay yük etkisindeki davranışını incelemiştir. Numuneler tersinir yatay yükler etkisinde denenmiştir. GFRP malzemenin taşıyıcı yığma duvarlarda olduğu gibi bölme duvardaki çatlak oluşumu ve diyagonal çekme göçmesi ile bir derz boyunca kayma göçmesini önlediği gözlenmiştir. Güçlendirilmiş numunede göçme, bölme duvarda oluşan köşe

kırılmasını takiben kolonlardaki kayma göçmesi ile olmuştur. Kolonların bu şekilde gevrek göçmesinin engellenmesi için, kolon kayma dayanımının bölme duvar yatay dayanımından daha yüksek olmasına dikkat edilmesi önerilmiştir [21].

Negro ve Verzeletti (1996), yaptıkları çalışmada, 1976 Friuli depremi etkisinde, 1/1 ölçekli, planda 10mx10m düşeyde de 12.5m boyutlarında, bölme duvarlı betonarme çerçeve üzerinde çalışmışlardır. Deneyler sonucunda; bölme duvarların, betonarme çerçeve sistemin tükettiği plastik enerjiyi küçülttüğü, sistemin toplam enerji tüketimine önemli ölçüde katkı sağladığı, yapıda bölme duvarların farklı şekillerde yerleştirilmesinin çerçevenin enerji istemini önemli ölçüde değiştirebildiği sonucuna varılmıştır [22].

Fancher (1997), içeriğindeki liflerin türüne bağlı olarak farklı FRP kompozit türlerinin avantajları ve dezavantajları, mekanik özellikleri, kullanım şekilleri ve alanları belirten bir çalışma yapmıştır [23].

Mirmiran ve Shahawy (1997), FRP kompozit malzemeleri kullanarak ürettikleri elemanlarla daire enkesitli beton elemanları sararak, bu tür bir sargılamanın elamanların eksenel basınç altındaki davranışına etkisini araştırmış ve bu yöntemin elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir [24].

Seible ve diğ., (1997), modern bir deprem yönetmeliğine uygun olarak tasarlanmamış köprü kolonları ve bunların FRP kompozitle güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Farklı göçme şekilleri oluşacak kolonlarda yapılacak güçlendirme işlemi için farklı kalınlıkta kompozite ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Geliştirilen kriterlere göre güçlendirilen kolonların performansı önemli oranda artmıştır. Teorik olarak hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesinin üzerine çıkılmış, yer değiştirme sünekliği büyük ölçüde artmıştır [25].

Saadatmanesh ve diğ., (1997), mevcut yapılarda bulunan kusurları inceleyen bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, modern bir deprem yönetmeliğine göre tasarlanmamış, yetersiz bindirme boyu ve enine donatı eksikliği bulunan köprü kolonları incelenmiştir. 1/5 ölçekli 2 adet daire, 2 adet dikdörtgen enkesitli sağlam temellere mesnetlenmiş kolon numunesi üretmişlerdir. Bu kolonlara önceden hasar verilmiş ve sonrasında FRP kompozit ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, güçlendirme işlemlerinin daire enkesitli kolonlarda etkili olduğu gibi dikdörtgen enkesitli kolonlarda da etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş bütün kolonlarda yatay yük taşıma ve süneklik kapasitelerinde artma kaydedilmiştir [26].

Xiao ve Ma (1997), bindirme boyu yetersizliği olan daire enkesitli kolonlar üzerinde deneysel ve analitik çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında ½ ölçekli 3 adet konsol kolon numunesi üretilmiştir. Kolonlardan biri referans numunesini teşkil etmek üzere önceden test edilmiştir. Daha sonra hasarsız iki numune doğrudan, referans numunesi ise onarım sonrası FRP kompozit ile 3 farklı tipte güçlendirilmiştir. Güçlendirme işlemi, tüm kolonların performansını iyileştirmiş ve gevrek aderans göçmesini geciktirmiştir. Onarılıp güçlendirilen numune, referans numunesi ile karşılaştırıldığında, yer değiştirme kapasitesinin önemli oranda arttığı görülmüştür. Güçlendirilen diğer iki numuneden sarım sayısı ve sarım bölgesi genişliği fazla olan numunenin davranışı daha fazla gelişmiştir [27].

Marjani (1997), dolgu duvarlı çerçevelerin davranışı üzerinde analitik ve deneysel bir takım çalışmalar yapmıştır. 4 adet 1/3 ölçekli, iki katlı, tek açıklıklı tuğla dolgu duvarlı çerçeve ve 2 boş çerçeve tekrarlı tersinir yatay yüklere altında test edilmiştir. Sıva malzemenin varlığı, beton basınç dayanımları, deney değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Deneyler sonucunda sıvalı dolgu duvarlı çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi boş çerçeveye oranla yaklaşık 3 kat fazla olmuştur. Sıvanın varlığı, sıvasız dolgu duvarlı çerçeveye göre çerçeve rijitliğini 1.8 kat artırmıştır. Beton kalitesindeki artış (%24), yatay yük taşıma kapasitesi ve çerçeve rijitliğini çok etkilememiştir (%5.1 artış) [28].

Ehsani ve diğ., (1997), FRP ile sargılanmış tuğla duvarların, malzemenin kesme kuvvetine etkisi üzerinde bir takım çalışmalar yapmıştır. Deney değişkenleri; FRP malzemenin kalınlığı, sarılma biçimi ve ankraj boyu olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, test edilen numunelerin süneklik ve taşıma gücü kapasitesi FRP malzemenin kalınlığı, ankraj boyu ve sarılma şekline göre önemli ölçüde değişmiştir [29].

Triantafillou (1998), FRP ile güçlendirme üzerine bir takım analiz metodları geliştirmiş ve bunları deneylerle kanıtlamıştır. Bunun için 12 adet delikli tuğladan üretilmiş duvar numunesi teste tabi tutulmuştur. Deney değişkenleri, yükleme konfigürasyonu, CFRP malzeme alanı, ve uygulama biçimidir. Deneyler sonucunda,

CFRP malzeme kulanım oranı ve uygulama yönteminin, numune göçme şekli üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır [30].

Demers ve Neale (1999), cam lif takviyeli ve karbon lif takviyeli polimer (GFRP VE CFRP) malzeme ile güçlendirdikleri 16 adet daire enkesitli numunenin, enine ve boyuna donatılarının değiştiği, donatıda meydana getirilen korozyon nedeniyle oluşan ön hasarın ve sargı sayısının değişken olarak alınıp eksenel yükler altında incelendiği bu çalışmada kompozit malzemelerle yapılan güçlendirmenin süneklik ve eksenel yük taşıma kapasitesini arttırdığı gözlenmiştir. Bu çalışmada önceden hasar verilip güçlendirilen numunelerin doğrudan güçlendirilen özdeş numunelere çok yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir [31].

Toutanji (1999), yaptığı deneysel ve analitik çalışmasında, daire enkesitli beton elemanları farklı türden lif sargıları ile güçlendirerek (cam ve karbon lif) elemanların eksenel yükler altındaki davranışını incelemiş, deneyler sonucunda güçlendirilmiş elemanların dayanım, süneklik, enerji yutabilme kapasitesi gibi özelliklerinin büyük ölçüde geliştiğini göstermiştir [32].

Unjoh ve diğ., (2000), kare enkesitli köprü kolonları çelik manto ve CFRP kompozit ile güçlendirilmiştir. Çelik manto ile yapılan güçlendirme sonucu, kolonlarda eğilme rijitliği ve dayanım artmış, önemli ölçüde sünek davranış elde edilmiştir. CFRP ile güçlendirme sonucu, orijinal numunede boyuna donatıların akma gerilmesine ulaşmadan görülen gevrek kesme göçmesi önlenmiştir. Kompozitin sarım sayısının artmasıyla eğilme etkisindeki davranış iyileşmiş, enerji yutma ve yük taşıma kapasitesi artmıştır [33].

Xiao ve Wu (2000), CFRP sargıları ile güçlendirilmiş daire enkesitli numuneler üzerinde çalışarak, CFRP sargı kalınlığının ve numune beton dayanımlarının davranışa olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda karbon lif ile sargılamanın dayanım ve sünekliği artırdığını göstermiş ve bu ilişkiyi açıklaması amacıyla bir analitik model önermişlerdir [34].

Fukuyama ve Sugano (2000), CFRP tabakaları kullanarak onarım ve güçlendirme çalışmalarının ilk olarak Japonya'da geliştirildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalar 1979 yılında başlamış olmasına rağmen FRP malzeme kullanılarak güçlendirme üzerine deneysel ve teorik çalışmalar 1990'ların sonuna doğru artmıştır [35].

Wang ve Restrepo (2001), cam lif takviyeli polimer (GFRP) malzeme ile güçlendirdikleri enine ve boyuna donatılı 3 adet kare ve 3 adet dikdörtgen enkesitli numunenin, eksenel yükler altındaki davranışlarını incelemişler ve bir analitik model önermişlerdir. Bu çalışma sonucunda, numunelerin dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyileştiğini, ayrıca enine doğrultuda yapılan sargılamanın boyuna donatıların burkulmasını önlediğini belirtmişlerdir [36].

Saatçioğlu ve Elnabelsy (2001), deprem tasarımı bugünkü koşullara göre yapılmayan köprü kolonlarının FRP ile güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Mevcut köprü kolonlarının önemli bölümünü temsil eden, yetersiz enine donatısı ve bindirme boyu olan, daire ve kare enkesitli konsol kolon numuneleri üretmişlerdir. Numuneler FRP ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmişlerdir. Deneyler sonucunda, orijinal olarak denenen daire ve kare enkesitli kolonlarda erken safhalarda aderans çözülmesi ile başlayan dayanım kaybı görülmüştür. Dairesel enkesitli kolonlarda yapılan güçlendirme, deprem performansını önemli ölçüde artırmıştır. Kare enkesitli kolonlarda uygulanan güçlendirme işlemi, aderans kaybının önlenmesi bakımından fazla başarılı olmamıştır. Bu kolonlarda sınırlı gelişme elde edilmiştir [37].

Haroun ve diğ., (2001), köprü kolonlarının güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, kesme dayanımı ve sargılama etkisini arttırmak üzere FRP kompozit ile enine doğrultuda sarılan, daire ve dikdörtgen enkesitli kısa kolonlar test edilmiştir. Orijinal numunelerde görülen gevrek kesme göçmesi güçlendirme işlemi sonucu önlenmiş, ileri düzeyde sünek davranışa ulaşıldıktan sonra eğilme göçmesi meydana gelmiştir [38].

Albert ve diğ., (2001), FRP malzemenin dolgu duvarlar üzerindeki yatay yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermek amaçlı bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında 4m yüksekliğinde 10 adet duvar üzerinde çalışılmıştır. Numunelerden birkaçı hasar görmüş, bazıları da hasarsız deneye tabi tutulmuştur. Deney değişkenleri olarak; güçlendirme yöntemi, FRP malzeme çeşidi, kalınlığı, uygulanış biçimi ve yatay yük uygulama biçimi belirlenmiştir. Deney sonuçları süneklik ve yatay yük taşıma kapasitesinin FRP malzeme ile güçlendirilen numunelerde artış gösterdiği şeklinde kaydedilmiştir [39].

Li ve diğ., (2001), düşey FRP sargılar ile güçlendirilmiş beton duvar numune ile yatay FRP sargılar ile güçlendirilmiş beton duvar numunenin yatay yük etkisindeki davranışını gözlemlemek amaçlı bir takım çalışmalar yapmışlardır. Güçlendirilen her iki numunenin davranışı düşey FRP ile güçlendirilmiş duvardan FRP'nin sıyrılmasına kadar aynıdır. Düşey FRP uygulaması yapılan numunenin yatay yük taşıma kapasitesi referans numunesine göre 3 kat artmış iken, yatay FRP sargı ile güçlendirilmiş numune yük taşıma kapasitesi 6 kat artmıştır [40].

Mertol (2002), 2 adet, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, 2 katlı, iki yüzü sıvanmış, dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi üzerinde yaptığı çalışmada, numunelerden birini referans numunesi, diğerini ise CFRP kompozit ile iki yüzü birden güçlendirerek üretmiş olup, CFRP uygulamasını sadece dolgu duvar üzerinde olacak şekilde uygulamıştır. Test sonuçları göstermiştir ki; kolon ve kirişlere ankraj uygulaması yapılmadan güçlendirme yöntemi etkili bir güçlendirme yöntemi değildir. Güçlendirilmiş numune ile referans numunesi arasındaki rijitlik değerleri birbirine yakındır ve güçlendirme maliyeti göz önüne alınırsa uygun bir yöntem olarak görünmemektedir [41].

Erduran (2002), CFRP kompozitlerle güçlendirilmiş tuğla duvarlı betonarme çerçeveler üzerinde bir çalışma yapmıştır. Deney kapsamında iki katlı-iki açıklıklı, 1/3 ölçekli, CFRP ile güçlendirilmiş numuneler tekrarlı yük altında test edilmiştir. Numuneler Türkiye'deki mevcut yapılarda rastlanan kusurlar göz önünde bulundurularak üretilmiştir. Deneyler sonucunda önerilen güçlendirme yönteminin, çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi ve enerji sönümleme miktarında önemli artışlar gösterdiği kaydedilmiştir [42].

İlki ve Kumbasar (2002), tarafından yapılan çalışmada 20 adet daire enkesitli, orijinal olarak denenmiş hasarlı ve hasarsız numuneler CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmişler ve monoton artan veya tekrarlı yükler altında test edilmişlerdir. Bu çalışma sonucunda CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş elemanların dayanım ve şekil değiştirmesinin CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı olarak önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir [43].

Tan (2002), cam ve karbon lifli polimer kompozitlerde güçlendirilmiş 52 adet dikdörtgen enkesitli betonarme elemanın eksenel yükler altındaki davranışının

incelendiği bu çalışmada farklı sargı şekillerinin eksenel yük taşıma kapasitesine ve sünekliğe olan etkisi gözlemlenmiştir [44].

Hanoğlu (2002), Delikli tuğla duvarlı betonarme çerçevelerin fiber esaslı kompozit yaygılarla güçlendirilmesi konulu çalışmasında delikli tuğla duvarlı betonarme çerçevelerin rijitlik ve dayanımlarının incelenmesi ve fiber malzemeler kullanılarak artırılması amacıyla model çerçeveler yanal yükler altında test edilmiştir. Dört düşük ve dört yüksek süneklikli dolgu duvarlı/duvarsız numune, az katlı betonarme binaların alt katlarındaki bir iç açıklığı temsil eden yüklere tabi tutulmuştur. Deneylerde dolgu duvarlı çerçevelerin yanal dayanım ve rijitliğinin boş çerçevenin özelliklerinden üstün olduğu gösterilmiştir. Fiber esaslı malzemeler kullanılarak yapısal davranış ve dayanımın iyileştirilmesine çalışılmış, dolgu duvarlar kuşatılmış ve çaprazlanmıştır. Bu uygulamalarda yanal yük altındaki dayanım ve rijitliğin önemli ölçüde arttığı görülürken, sistemin toplam yerdeğiştirme yeteneğinin kısıtlandığı da tespit edilmiştir [45].

Bousias ve diğ., (2002), modern bir deprem yönetmeliğine göre tasarlanmamış beton dayanımı düşük, boyuna donatıları sürekli 10 adet dikdörtgen enkesitli konsol kolon üreterek deneysel bir çalışma yapmışlardır. Numuneler, farklı kalınlıklarda CFRP ve GFRP ile enine doğrultuda sarılarak güçlü ve zayıf eksenleri doğrultusunda, sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda iki tip güçlendirme malzemesinin de orijinal numunelere göre şekil değiştirme kapasitesini ve dayanımı artırdığı görülmüştür [46].

Bousias ve diğ., (2002), bir diğer çalışmasında yapılarda erken dayanım kaybı ve aderans çözülmesine yol açan korozyonu konu alan deneysel bir çalışma yapmışlardır. Beton dayanımı düşük, 12 adet dikdörtgen enkesitli kolon numunesi üretilmiştir. Numuneler test edilmeden önce 3-4 ay süren özel bir işlem sonucunda korozyona uğratılmışlardır. Numuneler, CFRP ve GFRP ile farklı katlarda enine doğrultuda sarılarak, yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında test edilmişlerdir. Korozyona uğramış kolonlarda yapılan güçlendirme işlemi, donatı alanının azalması sebebiyle dayanımı orijinal numunelere göre artırmamış ancak şekil değiştirme kapasitesinde gelişme sağlamıştır [47].

Sheikh ve Yau (2002), sağlam temellere mesnetlenmiş konsol kolon numunelerinin güçlendirilmesini konu alan deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dairesel enkesitli

enine donatı oranları ve aralıkları farklı 12 adet numune üretmişlerdir. Deneylerde eksenel yük seviyesi, FRP kompozitin türü ve kalınlığı değişken olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda eksenel yük seviyesinin arttırılmasının süneklik ve şekil değiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Eksenel yük oranı fazla olan numuneler için FRP kompozitin sarım sayısının arttırılması gerektiği belirtilmiştir. Enine donatı oranının arttırılması ve aralığının düşürülmesi sonucu boyuna donatıların dayanımı artmış, daha sünek bir davranış elde edilmiş ve enerji yutma kapasitesinde önemli gelişme sağlanmıştır. Eksenel yük oranının yüksek olduğu numunelerde tek kat GFRP kompozitin, CFRP kompozit yanında etkili performans gösteremediği görülmüştür. Genel olarak FRP kompozit ile güçlendirme işlemi kolonların dayanım, enerji yutma ve süneklik kapasitelerini geliştirmiştir [48].

Gençoğlu ve diğ., (2003), epoksi enjeksiyonu, karbon elyaf sargılar ve çelik lamalar ile hasarlı kenar kolon birleşim bölgeleri üzerinde üç farklı yöntemle güçlendirmesi yapılmış numuneler üzerinde çalışmışlardır. Hasarlı numuneler; çatlaklar epoksi reçinesi ile onarılarak, kolon-kirişlere boyuna çelik lamalar monte edilerek ve kolon-kiriş birleşim bölgelerine karbon lifli kompozitler sarılarak güçlendirilmiştir. Deneyler sonrasında; epoksi enjeksiyonu ile onarılan birinci numunenin onarım maliyeti ve süresi diğer numunelere göre daha iyi olmasına karşın onarım öncesindeki numunenin dayanımına, enerji yutma özelliklerine ve hasar dağılımlarına olumlu bir katkısının olmadığı, hatta enerji yutma özelliklerinde azalmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Çelik lamalar ile güçlendirilen numunenin güçlendirme maliyeti üçüncü numunenin güçlendirme maliyetinin 1/5 i kadar olmasına karşın ikinci numunenin güçlendirilmesi için geçen süre, üçüncü numunenin güçlendirilmesi için geçen sürenin iki katı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca çelik lamalarla yapılan güçlendirilen ikinci numunenin toplam enerji miktarında, orijinal hasarsız numunenin toplam enerji miktarına göre yaklaşık % 60 artış olurken yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %25 artış meydana gelmiştir. CFRP ile güçlendirilen üçüncü numunenin güçlendirme öncesindeki toplam enerji miktarına göre yaklaşık % 50 artış olurken yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %22 artış olduğu gözlenmiştir [49].

Çetinkaya ve diğ., (2003), betonarme kirişlerin lifli polimer malzemelerle onarım ve güçlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, 4 adet betonarme kirişin FRP malzemelerle onarım ve/veya güçlendirilmesi yapılmış, her deney kirişi

için yük yerdeğiştirme eğrisi elde edilerek elemanların statik yük altında onarım ve güçlendirmeden önceki ve sonraki davranışı karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde deney kirişlerinden iki tanesi herhangi bir onarım veya güçlendirilme yapılmadan statik yüklemeye tabi tutulmuş ve yalın kirişlerin yük–yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. İkinci bölümde önceden yüklemeye tabi tutularak taşıma gücüne ulaşan ve hasar gören deney kirişlerinin onarımı yapılmış ve iki değişik güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. Üçüncü bölümde ise hasar görmeden, doğrudan güçlendirilen deney kirişleri statik yüklemeye tabi tutulmuş ve taşıma gücünün sonuna kadar yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda FRP malzemelerle yapılan onarım ve güçlendirmenin betonarme kirişlerin taşıma gücünü çok büyük ölçüde arttırdığı görülmüştür [2].

Özgen ve Mutlu (2003), karbon elyaf üretimi ve özelliklerini anlatan bir araştırma yapmışlardır. Karbon elyaf malzemenin avantajları, üretimi, çeşitleri ve mekanik özellikleri, kullanımda üstün kılan yönleri, kullanım alanları anlatılmıştır [13].

Lacobucci ve diğ., (2003), 1971 öncesi yapılan yeterli enine donatısı bulunmayan yapıları inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında kare enkesitli boyuna donatıları sürekli 8 adet konsol kolon numunesi üretmişlerdir. Numuneler önceden farklı oranlarda hasar verilerek ya da doğrudan FRP kompozit ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiştir. Numunelere deneyler sırasında farklı oranlarda eksenel yük uygulanmıştır. Genel olarak güçlendirme işlemi tüm numunelerin, süneklik, enerji yutma, kesme ve moment kapasitelerini artırmıştır. Aynı özelliklere sahip numunelerde, kompozitin sarım sayısının artmasının davranışı geliştirmede etkili olduğu, enine donatı yetersizliği bulunan numunelerde tek kat sarımın eğilme hakimiyetinde davranışı yeterince sağlayamadığı belirtilmiştir. Eksenel yük oranının ve hasar durumunun fazla olduğu numunelerde kompozitin sarım sayısının artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda güçlendirilmiş numuneler ile modern bir deprem yönetmeliğine göre yeterli enine donatıya sahip numuneler karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda güçlendirilmiş numunelerin davranışının daha iyi olduğu görülmüştür [50].

Lee ve diğ., (2003), korozyona uğramış kolonların davranışını inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında 6 adet kolon numunesi üretmişlerdir.

Numuneler farklı oranlarda korozyona uğratılmıştır. Bu işlem sırasında oluşan çatlaklar onarılmış ve CFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilmeyen numunelerde korozyon sebebiyle oluşan aderans çatlakları ve erken dayanım kaybı görülmüştür. Güçlendirme işlemi kesme çatlaklarını önlemiş, süneklik kapasitesini artırmıştır. Enerji yutma bakımından kolonlar incelendiğinde, korozyon oranının artmasıyla kapasitenin azaldığı görülmüştür. Güçlendirilmiş kolonların süneklik kapasitesinin güçlendirilmeyen kolonların yaklaşık olarak iki katına eşit olduğu anlaşılmıştır [51].

Kaltakçı ve Köken (2003), değişik dolgu özelliğine sahip, dört adet çelik çerçeve sisteminin yatay tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çelik çerçeve sistemleri tek gözlü olup, dolgu özelliği olarak boş, tuğla duvar dolgulu, tuğla duvar+sıva dolgulu ve gaz beton dolgulu duvar kullanılmıştır. Deney numunelerine deprem yükünü benzeştiren yatay yönde tersinir-tekrarlanır yük uygulanmış ve numuneler üzerinde meydana gelen yer değiştirmeler ölçülmüştür. Dolgulu çerçevelerin göçme şekilleri, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve enerji tüketme özellikleri elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır [52].

Özgen ve Köse (2003), betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının güçlendirilmesi ve birleştirilmesi işlemlerinde yoğun olarak kullanılan, hizmet halindeki betonarme elemanların dış yüzeylerinden, mukavemet değerleri yüksek olan çelik lama veya kompozit şeritler gibi malzemelerle yapıştırılarak kuşatılması şeklindeki güçlendirme uygulamasını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarına göre belirli işlem kriterlerine bağlı kalındığında söz konusu yapıştırma yönteminin, göçme davranışları, taşıma gücü, aderansın verimli değerlendirilmesi, dolayısı ile kompozit davranışın sağlanabilmesi açısından olumlu sonuçlar sağladığı belirlenmiştir [5].

Akgüzel (2003), ‘Kolon boy donatılarında yetersiz bindirme boyu problemi olan mevcut tuğla dolgu duvarlı betonarme yapıların depreme karşı güçlendirilmesi’ konulu çalışma kapsamında 5 adet iki katlı, tek açıklıklı, 1/3 ölçeğinde betonarme çerçeve üretilmiş ve CFRP ile güçlendirilerek yatay yük etkisindeki davranışları incelenmiştir. Deney numuneleri ülkemizdeki yapı stokunda gözlenen ortak kusurları temsil etmek amacıyla düşük kalite beton, kolon ve kirişlerde yetersiz sargı donatısı, kiriş alt donatılarında yetersiz aderans boyu, kolon boy donatılarında yetersiz bindirme boyu, kolon-kiriş düğüm bölgelerinde sargı donatısı olmaması, gibi sık

rastlanan zayıflıklar içermektedir. Deneyler sonucunda CFRP ile güçlendirmenin numunenin yatay yük taşıma kapasitesini artırdığı, enerji sönümlemesine olumlu katkısı olduğu, CFRP ile güçlendirilmiş numunenin, dolgu duvarlı çerçeveye oranla maksimum yük taşıma kapasitesinde %94 artış kaydedildiği gözlenmiştir [53].

Özcebe ve diğ., (2003), 'Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin cfrp kullanılarak güçlendirilmesi' adlı çalışmalarında, yapıdaki tuğla duvarların tümünün veya bir kısmının karbon lifli polimerler (CFRP) kullanılarak güçlendirmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde sıklıkla görülen zayıflıkları içeren 1/3 ölçekli, iki katlı, tek açıklıklı yedi adet çerçeve üretilmiş, çerçeve gözleri 1/3 ölçekli delikli tuğla duvar ile kapatılmış, ülkemizdeki genel uygulamaya uygun olarak duvarların her iki yüzü de sıvanmıştır. Bu şekilde üretilen deney elemanları, daha sonra değişik CFRP örtü uygulamaları ile güçlendirildikten sonra denenmiştir. Çalışmalar sonucunda; yapının ayakta kalmasında önemli faktörü olan enerji yutma kapasitesi değerleri yapının sönümünü de etkilediği, bölme duvarların yapının enerji yutma kapasitesine olumlu etki yaptığı, duvarların üzerine FRP yapıştırılarak yapılan güçlendirme şeklinin yapının enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve CFRP ile güçlendirmede ankrajlamanın oldukça katkısı olduğu vurgulanmıştır [54].

Ye ve diğ., (2003), kare enkesitli 8 adet konsol kolon numunesi üretmişler, kolon numunelerini 3 gruba ayırarak incelemişlerdir. 1. grupta numuneleri, tüm kolon boyunca ya da farklı genişlikte CFRP bant kompozit ile enine doğrultuda sararak güçlendirmişlerdir. 2. grupta, sabit eksenel yük kolonların üzerindeyken CFRP kompozit şerit ile güçlendirme yapılmıştır. 3. grupta ise, kolona önceden hasar verildikten sonra CFRP kompozit şerit ile güçlendirme yapılmıştır. Orijinal kolonda görülen gevrek kesme göçmesi güçlendirilmiş kolonlarda önlenmiştir. 1. grupta CFRP kompozitin hacimsel oranının artmasıyla süneklik artmış ve eğilme etkisinde göçme gözlenmiştir. 2. grupta, aynı oranda CFRP kompozit ile sarılan 1. gruptaki numuneye göre daha az sünek davranış elde edilmiştir. 3. grupta ise, başlangıçta oluşan hasardan dolayı kolonun rijitliği azalsa da yerdeğiştirme kapasitesi artmıştır [55].

İlki ve Kumbasar (2003), karbon lif takviyeli polimer malzeme ile güçlendirilmiş 8 adet kare, 8 adet dikdörtgen, 27 adet daire enkesitli numunenin davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda bütün kesit tiplerindeki numunelerin yük taşıma

kapasiteleri ve sünekliklerinin önemli oranda arttığı gözlenmiştir. Özellikle de silindir numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri daha fazla artmıştır. Bazı numunelerin ön hasar verilerek güçlendirilmesi ve tekrarlı yükler altında denenmiş olması davranış açısından belirgin bir dezavantaja sebep olmamıştır [56].

İlki ve diğ., (2003), düşük ve normal dayanımlı, CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş, daire enkesitli betonarme elemanlar üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda, bu güçlendirme tekniğinin sarılmamış beton dayanımı düşük elemanlarda daha belirgin olmak üzere, CFRP tabaka kalınlığıyla orantılı olarak önemli ölçüde dayanım ve şekil değiştirme artışı sağlanabileceğini belirtmişlerdir [57].

İlki ve diğ., (2004), 'Kolon sarılma bölgelerinin cfrp kompozitler ile güçlendirilmesi' konulu çalışmaları kapsamında dikdörtgen enkesitli, 10 adet numune üretilmiştir. Numunelerin yarısı boyuna donatıları sürekli, diğer yarısı ise boyuna donatı çapının 40 katı uzunluğunda bindirmeli ekli olarak üretilmiştir. Boyuna donatıları sürekli 2 adet ve bindirmeli ekli 2 adet numune, enine doğrultuda farklı kalınlıkta CFRP kompozit tabakalar ile sarılarak güçlendirilmiştir. Kalan iki numune ise referans numunelerinin (bir sürekli boyuna donatılı, bir bindirmeli ekli) onarılıp güçlendirilmesi ile elde edilen numunelerdir. Deneysel sonuçlar; dayanım, süneklik, enerji yutma kapasitesi, rijitlik ve hasar oluşumu açısından değerlendirilmiştir.

CFRP kompozitin ilave sargılama etkisi ile boyuna donatıları sürekli numunelerde, erken dayanım kaybı ve boyuna donatı burkulması önlemiştir. Boyuna donatıları bindirmeli ekli numunelerde ise enine şekil değiştirme sınırlamış ve orijinal numunelerde plastik yüklemenin erken aşamalarında görülen donatı kaymasından doğan dayanım kaybı gecikmiştir. CFRP kompozitin tabaka kalınlığı davranışı önemli ölçüde değiştirmemiştir. Önceden hasar verilerek güçlendirilen numuneler ile doğrudan güçlendirilen numuneler benzer davranış göstermiştir [58].

Peker (2005), "Düşük dayanımlı betonarme elemanların cfrp ile güçlendirilmesi' konulu çalışmasında, düşük beton dayanımına sahip, kare, dikdörtgen ve daire enkesit şekillerindeki betonarme elemanlar, enine doğrultuda CFRP kompozitler ile güçlendirilerek test edilmiştir. Enkesit şekli, FRP sargı kalınlığı, yükleme tipi, köşe yarıçapı, ön hasar, farklı sargı şekilleri ve etkinlik artırıcı detay uygulaması çalışmada incelenen değişkenlerdir. Deneyler sonucunda, lif takviyeli polimer malzemeler ile düşey taşıyıcı elemanların enine doğrultuda sargılanmasının, basınç

dayanımını ve şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve boyuna donatıların burkulmasını çok yüksek şekil değiştirmelere kadar geciktirdiği gözlenmiştir. CFRP sargı kalınlığının artması bütün enkesit tiplerinde dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Daire enkesite sahip numunelerde dayanım artışı daha fazla olurken, kare ve özellikle de dikdörtgen enkesite sahip numunelerde şekil değiştirme kapasitesi artışı daha fazla olmuştur [12].

Yüksel ve diğ., (2006), dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde karbon lifler kullanılarak güçlendirme üzerine yaptıkları çalışmada, dolgu duvarların ve karbon lif ile güçlendirilmiş dolgu duvarların betonarme çerçeve davranışına etkilerinin bulunması ve betonarme çerçeve sistemlerinin malzeme bakımından doğrusal olmayan çözümlemesinin bir bilgisayar programı yardımıyla yapılması amaçlanmıştır. İki katlı, tek açıklıklı, üç adet betonarme çerçeve tekrarlı yükler altında, yerdeğiştirme kontrollü olarak denenmiştir. Bunlardan birinci numune dolgu duvarsız, ikinci numune dolgu duvarlı çerçeve, üçüncü numune ise karbon lif ile çapraz olarak güçlendirilen çerçeveden oluşmaktadır.

Deneyler sonrası, yanal dayanım ve yanal rijitliğinin çıplak çerçeveye göre önemli derecede arttığı görülmektedir. Betonarme çerçevenin karbon lifler ile güçlendirilmesi sonucunda dolgu duvar köşe kırılmaları ve çapraz çatlaklar dolgu duvarın tamamına yayılarak belirli bölgelerde toplanması önlenmiş, böylece dolgu duvarın tümden göçmesi önlenmiştir. Bununla birlikte dolgu duvar, çerçeve yatay yük taşıma kapasitesini çıplak çerçeveye göre yaklaşık 4 kat, karbon lif uygulanmış dolgu duvar ise yatay yük taşıma kapasitesini dolgu duvarlı çerçeveye göre yaklaşık 1.3 kat arttırmıştır [59].

Hashemi ve Mosalam (2006), 5 katlı bölme duvarlı bir yapıdan çıkarılan tek katlı numune üzerinde sarsma tablası deneyinde önemli sonuçlara ulaşmışlardır. Bu çalışmada, taşıyıcı olmayan bölme duvarlarının yapının yatay rijitlik ve dayanımına önemli katkılarda bulunduğu, bölme duvarların yapı rijitliğini yaklaşık olarak 3.8 kat artırdığı, çerçeve doğal titreşim periyodunu %50 azalttığı, sönüm yüzdesini ise %4 den %5-12 ye kadar çıkarabildiği ve sistem içinde sönümlenen enerjiyi de önemli oranlarda arttığı belirtilmiştir [60].

Elgawady ve diğ., (2007), 7 adet 1/2 ölçekli delikli tuğla duvarlar CFRP ile güçlendirilmeden önce ve güçlendirildikten sonra tersinir statik yükler altında denenmişlerdir. 7 duvar elemanından 3'ü güçlendirilmemiş, 1'i yapım esnasında güçlendirilmiş diğerleri hasar gördükten sonra güçlendirilmiş olarak statik yükler altında denenmiştir. Genelde bütün numunelerin güçlendirildikten sonraki enerji yutma kapasiteleri artmıştır. Ancak numune üretim sırasında, yükleme yapılmadan güçlendirilen numunenin enerji yutma kapasitesi aynı özellikteki numunelere göre daha az kalmıştır. Buradan numune üzerinde oluşan çatlakların oluşmasının numune içinde enerji harcanmasına sebep olduğu sonucuna varılmaktadır. Denenen numunelerdeki enerji harcanma sebepleri; düğüm noktaları arası sürtünme, yeni çatlakların oluşması, duvarın ezilmesi ve FRP'nin deformasyonu olarak belirlenmiştir [61].

Atmaca (2008), 'Farklı uzunluk/yükseklik oranlarına sahip tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin karbon fiber esaslı kompozit yaygılarla güçlendirilmesi' adlı çalışmasında CFRP kompozitlerle güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı ve düşey olarak test alanına yerleştirilen 10 adet dolgulu betonarme çerçeve, statik tersinir yanal yükler altında deneye tabi tutulmuştur. 10 numuneden ikisi kontrol numunesi, diğer numuneler ise tek yönlü karbon fiberli kompozitlerle çeşitli konfigürasyonlarda güçlendirilmiştir. Numuneler 1998 den önce Türkiye'de yapılan yapılarda yaygın bir şekilde görülen kusurlara sahiptir. Bu mevcut kusurları azaltmak ve numunelerin sismik performanslarını arttırmak için tek yönlü karbon fiberli kompozit yaygılar düşey şeritler ve/veya eğik diyagonaller biçiminde dolgu duvarın her iki tarafına da yapıştırılmış ve betonarme çerçeveye ankrajlanmıştır. Bazı numunelerde, çerçeve elemanlarının sarılması gibi bölgesel güçlendirme teknikleri de uygulanmıştır. Karbon fiberli kompozit yaygılar numunelerin yük taşıma ve enerji yutma kapasitelerini önemli ölçüde arttırmıştır. Maksimum yüklere karşı gelen yatay yerdeğiştirmeler da artmıştır. Ayrıca numunelerin uzunluk/yükseklik oranlarına ve karbon fiberli kompozit yaygıların konfigürasyonlarına bağlı olarak bazı rijitlik artımları da kaydedilmiştir [62].

Karbon lifli kompozitler üzerinde, malzemenin ilk test edilmeye başlandığı dönemlerde malzeme ölçeğinde, beton elemanlar üzerinde çok fazla çalışma mevcuttur. Daha sonraki yıllarda betonarme taşıyıcı elaman ve dolgu duvarlı

çerçeveler üzerinde çalışmalara başlanmıştır. 1990-2000'li yıllar arası daha çok taşıyıcı eleman ölçeğinde kolon-kiriş birleşim bölgeleri üzerinde çalışma sayısı hayli fazladır. Dolgu duvarların ise taşıyıcı sisteme katkısı ile ilgili çalışmaların geçmişi 1960'lı yıllara dayanmaktadır. İlk dönemlerde dolgu duvarların güçlendirilmesi için çelik ve beton ile giydirme yöntemi kullanılmış, sonraki dönemlerde ise epoksi enjeksiyonu ile güçlendirme kavramı literatürde yerini almıştır. Geride bıraktığımız 10 yıllık dönemde ise dolgu duvarların karbon lifli kompozitlerle güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar göze çarpmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmaların yanı sıra son 20 yıllık dönem içinde karbon lifli kompozitlerin analitik modellemesi üzerinde çalışma sayısı oldukça fazladır. Fakat literatürde karbon lifli kompozitlerin modellenmesi ile ilgili boşluk göze çarpmaktadır.

Dolgu duvarlı çerçevelerin güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak güçlendirme işlemi çift taraf ankraj uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayı, diğer çalışmalardan farklı kılan; bitişik nizam, dolgu duvarlı çift taraflı sıva uygulamasının mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek yüz/çift yüz sıvanın etkisi ve dolgu duvarlı çerçeveye olan katkısı, çift taraflı güçlendirmenin mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek taraflı güçlendirmenin yapıda nasıl bir performans gösterebileceği analizinin yorumlanmış olmasıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmada, 6 adet 1/3 ölçekli tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve üzerinde çalışılmıştır. Numuneler,

- Boş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,

olarak üretilmiş, uygulamada çok karşılaşılan betonarme yapıların özelliklerini yansıtan, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, tek katlı numuneler üzerinde, bu tür sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri ve diğer davranış özelliklerini karşılaştırmak amacıyla deneysel ve kuramsal bir dizi çalışmalar tasarlanmıştır. Üretilen numuneler deney düzenekleri yardımıyla artan yerdeğiştirme çevrimleri etkisinde deneye tabi tutulmuş, sonrasında, denenen numuneler, bilgisayar ortamında matematiksel olarak modellendikten sonra elde edilen kuramsal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

3.1 Deney Numunelerinin Belirlenmesi

Numune boyut ve özellikleri belirlenirken, yapılarda son zamanlarda yaygın olarak kullanılan malzemeler, yönetmeliklerde izin verilen şartlar, laboratuvarda bulunan deney yükleme sisteminin kapasitesi, deney düzeneğinin özellikleri, kullanışlılığı, daha önce yapılan mevcut çalışmalarda kullanılan malzeme ve boyutlar, numunelerin üretimi-taşınması olanakları gibi durumlar etkili olmuştur.

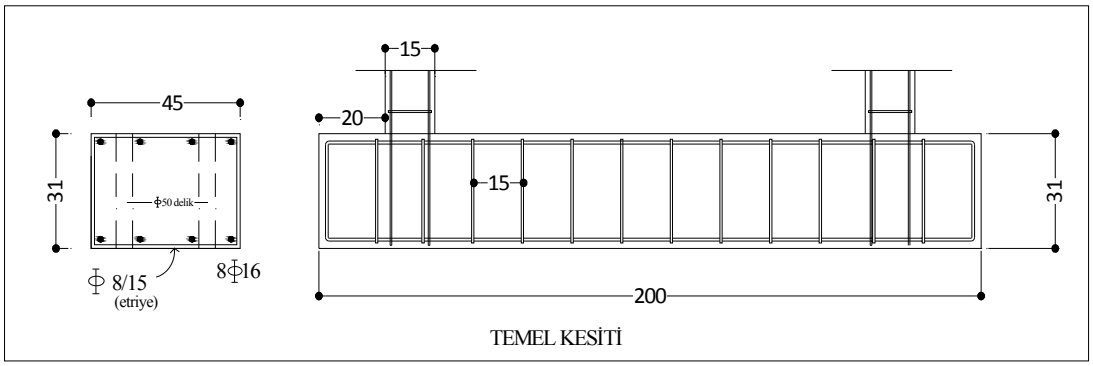
Türkiye'de mevcut projelerde gözlenen genel aks aralıkları (4.0-6.0 m) ve kat yükseklikleri (3.8-3.2 m) belirlenmiş ve deney elemanlarının yükseklik, aks aralığı gibi boyutlarına karar verilmiştir.

3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri

Çerçeve boyutları aynı olmak suretiyle aynı beton kalitesi ve donatı planına sahip 6 adet tek katlı tek açıklıklı numune üretilmiştir. Numuneler, 1/3 ölçekli olup, ülkemizdeki uygulama koşulları göz önüne alınarak tasarlanmışlardır. Mevcut yönetmeliklere göre yapılan yapıların durumunu temsil etmek için tüm numunelerde nervürlü donatı ve C25 betonarme betonu kullanılmıştır.

Numuneler, çerçeve boyutları 160x100cm olarak üretilmişler, kolon- kiriş boyutları 120x150mm'dir. Kolonlarda ve kirişlerde 4 Φ10 boyuna donatı, enine donatı olarak da kolonlarda Φ6/15, kirişlerde Φ6/10 nervürlü donatı kullanılmıştır.

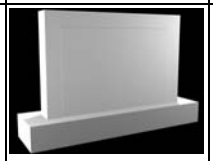
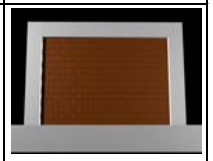
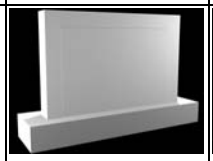
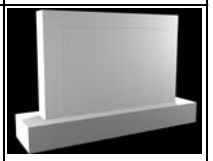
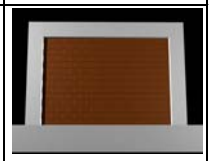
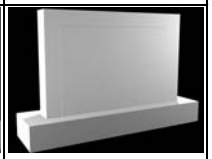
Göçme mekanizmasının temellerden başlamaması için temelin olabildiğince rijit yapılması düşünülmüştür. Temel boyutları 450x2000x310 mm olup, boyuna donatı olarak 8Φ16 ve enine donatı olarak da Φ8/15 nervürlü donatı kullanılmıştır. Numunelerin temel yüksekliğini, laboratuvardaki yatay yük vereninin özellikleri belirlemiştir. Yatay yükün numunenin kolon-kiriş birleşim bölgesinin tam orta noktasından verilebilmesi için temel yüksekliği 310 mm olarak tasarlanmıştır. Temel donatı çizimleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Numune temel detay çizimleri.

Her numune temeli, deney düzeneğindeki yatay yükü sağlayan hidrolik verenle kolon-kiriş birleşim bölgesinin orta noktasından yükün uygulanabilmesi için laboratuvarda benzeri diğer çalışmalarda da kullanılan mevcut temele (900x400x2400mm) ankastre olarak mesnetlenmiş ve bu temel de laboratuar döşemesine özel ankraj bulonları geçirilerek bağlanmıştır. Böylelikle, numunenin mevcut temel ve döşeme ile bir bütün sağlaması ve deney sırasında temelle birlikte ötelenmesi engellenmiştir.

Çizelge 3.1 : Numunelerin Genel Özellikleri.

Numune	Numune adı	Duvar modeli	Sıva modeli	Güçlendirme şekli	Ön yüz	Arka yüz
Numune 1	Boş çerçeve (BF)	Duvar yok	Sıva yok	Güçlendirme yok		
Numune 2	Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı çerçeve (IF-1P)	Dolgu duvarlı	Tek yüz	Güçlendirme yok		
Numune 3	Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı çerçeve (IF-2P)	Dolgu duvarlı	Çift yüz	Güçlendirme yok		
Numune 4	Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-1P-1FRP)	Dolgu duvarlı	Tek yüz	Tek yüz-tek kat CFRP		
Numune 5	Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-2P-1FRP)	Dolgu duvarlı	Çift yüz	Tek yüz-çift kat CFRP		
Numune 6	Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-2P-2FRP)	Dolgu duvarlı	Çift yüz	Çift yüz-çift kat CFRP		

Çizelge 3.1'de numunelerin genel özellikleri, Şekil 3.2 ve 3.3'de ise numune çizimleri ve donatı planı gösterilmiştir.

Numune 1 kuramsal çalışmaya referans olması ve dolgu duvarlarının çerçeve sistemlere etkilerinin anlaşılması amacıyla boş çerçeve yani dolgu duvarsız olarak üretilmiştir. Nervürlü donatı ve C25 betonarme betonu kullanılmıştır.

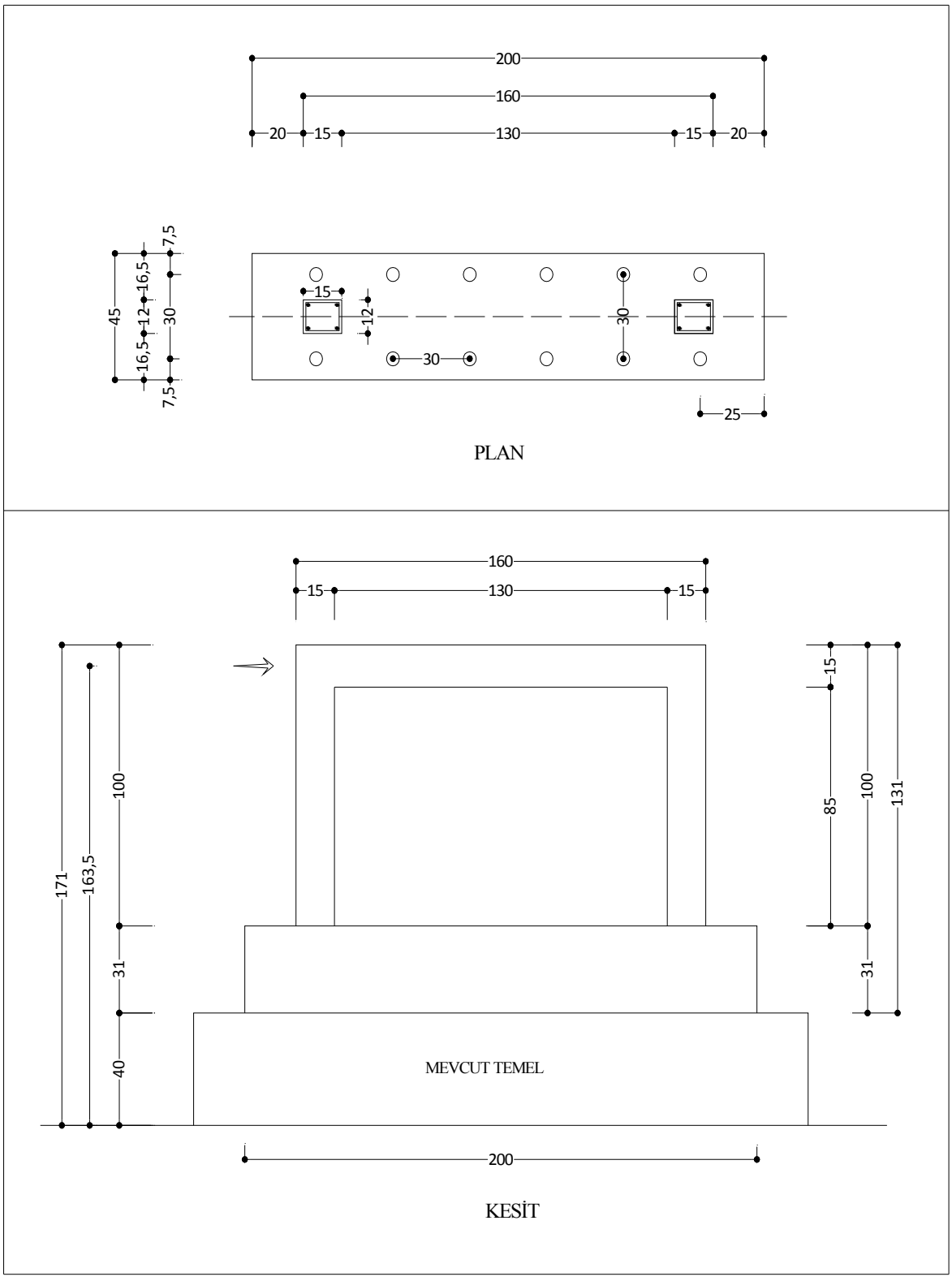
Numune 2, numune 1 ile aynı geometriye ve özelliklere sahip olup ek olarak tuğla duvar örülmüş ve numunenin tek yüzü sıvanmıştır. Tuğla tipi olarak 1/3 ölçekli delikli tuğla kullanılmış, tuğla boyutları 65x95x95 mm, tuğla delikleri yatay konumda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Boşluklu tuğlaların birbirine ve çerçeve sisteme bağlanması harç ile sağlanmıştır.

Numune 3, fiziksel olarak diğer numunelerle aynı özelliklere sahip olmakla birlikte, çerçeve içine dolgu duvar örülüp, duvarın her iki yüzü de sıvanmıştır.

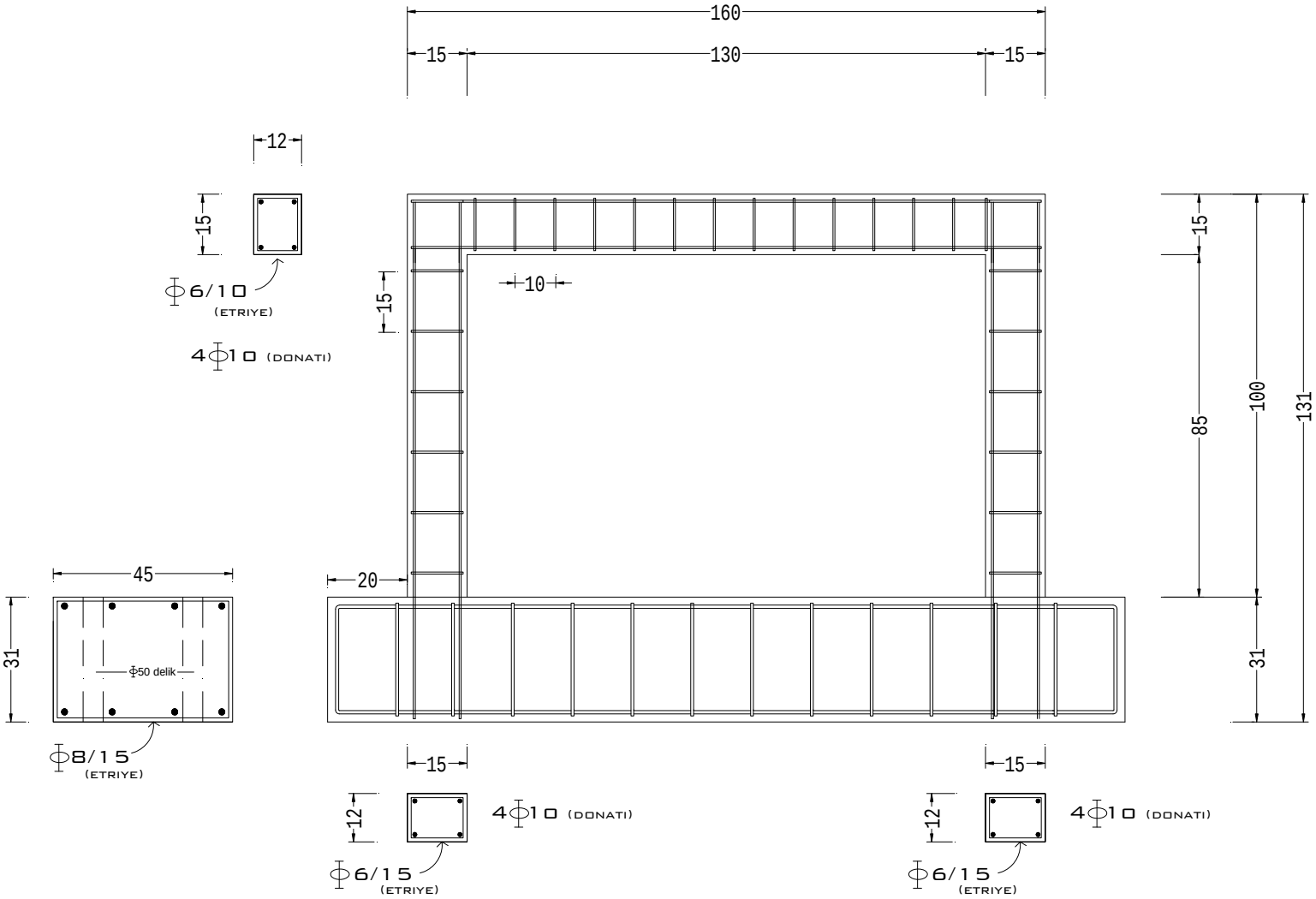
Numune 4, diğer numunelerle aynı boyutlarda üretilmiş, çerçeve içine dolgu duvar örülmüş, dolgu duvarın tek yüzü sıvanmış ve sıvalı yüze diyagonal olarak tek yüz, tek kat karbon elyaf uygulaması yapılmıştır.

Numune 5, diğer numunelerden farklı olarak betonarme çerçeve içine örülen dolgu duvarın çift yüzü sıvanıp, diyagonal olarak tek yüze CFRP uygulaması yapılmıştır.

Numune 6'da ise betonarme çerçeve içine uygulanan dolgu duvarın her iki yüzü de sıvanmış, çift yüz CFRP ile diyagonal olarak güçlendirme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.2 : Numune detay çizimleri.



Şekil 3.3 : Donatı detayları.

3.3 Numunelerin Üretimi

Numunelerin üretimi Kapra İnşaat'ın Dudullu'daki Köy-Tur şantiyesinde gerçekleştirilmiş, deney elemanlarının üretimi ve kür aşamasında beton özelliklerinde ve dayanımlarında elemandan elemana farklılık oluşmaması için her deney elamanı için ayrı kalıp hazırlanarak tüm deney elemanları aynı zamanda dökülmüştür.

Numune özellikleri belirlenmiş, teknik çizimleri tamamlanmış numunelerin üretimine başlanmıştır. Donatı iskeletlerinin hazırlanması ile başlanan numune üretiminde, Ülkemizdeki mevcut yönetmeliklere göre yapılan yapıların durumunu temsil etmek için tüm numunelerde hem boyuna, hem de enine donatı için St420 kalitesinde nervürlü donatı çeliği kullanılmıştır.

Tasarım ve numune üretimi öncesinde kullanılacak çeliğin beklenen dayanıma sahip olup olmadığını anlamak üzere standartlara uygun olarak çelik çekme deneyi yapılmıştır. Donatılar, doğrudan yatay yüke maruz kalmamaları için numunelerin yüksekliğinden, altta ve üstte 15 mm boşluk kalacak şekilde kesilmiştir.

Enine donatı imalatında her bir kesit tipi için metraj yapılmış ve yaklaşık etriye uzunlukları hesaplandıktan sonra donatılar hazırlanmıştır. Donatılar, uygun uzunluklarda kesilip her bir kesit tipine yetecek miktarda enine donatı imal edildikten sonra bağlanarak donatı iskeletleri hazırlanmıştır (Şekil 3.4, 3.5).



Şekil 3.4 : Temel ve kolon-kiriş enine donatısı.



Şekil 3.5 : Temel ve kolon donatılarının hazırlanması.

Numune boyutlarının belirlenmesi ve donatıların hazırlanmasının ardından kalıp sistemi tasarlanmış ve gerekli malzeme temin edilmiştir. Numuneler için plywood kalıplar, numuneler aynı anda üretilecek şekilde birbirine monte edilmiş, numunelerin taşınmasında kolaylık sağlaması için kalıp içinde delikler oluşturulmuştur (Şekil 3.6, 3.7).



Şekil 3.6 : Temel kalıp resimleri.



Şekil 3.7 : Numunelerin nakliyesi için bırakılan delikler.

Donatı iskeletleri kalıplara yerleştirilmeden önce tüm yüzeyler özel kalıp yağı ile yağlanmış, böylece oluşabilecek yapışmaların önüne geçilmiş ve kalıpların yeniden kullanımına da imkan verilmiştir. Numune yüzeyi ile donatı arasında her yüzde aynı miktarda boşluk bırakılabilmesi için enine donatılara plastik paspayı elemanları monte edilmiştir. Güçlendirilecek numuneler için kalıpların dört köşesine dik kenarları 25 mm olan ikizkenar üçgen enkesitli profiller çakılmıştır. Bu işlem daha sonra kolon ve kirişlerde CFRP uygulamasında köşelerinin yuvarlatılması aşamasında kolaylık sağlaması için düşünülmüştür.

Üretimi tamamlanan temel donatıları, hazırlanan temel kalıplarına yerleştirilmiş (Şekil 3.8), temel betonu her numune için aynı anda dökülmüştür. Daha sonra donatıları hazırlanmış kolon-kirişlerin kalıpları üretilmiş, donatıları yerleştirildikten sonra kolon-kiriş beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 : Hazırlanan kalıplara donatıların yerleştirilmesi.

Beton sınıfı bildirildikten sonra bir beton firması tarafından hazırlanan hazır beton aynı gün ve şartlarda kalıplara dökülmüştür. Tüm numunelerin beton dökümü aynı gün içinde yaklaşık 7-8 C° hava sıcaklığında yapılmıştır. Betonun iyi yerleşmesinin sağlanması amacıyla vibrasyon işlemi yapılmıştır. Aynı mikserden, beton dayanımını belirleyebilmek için 3'er adet numune alınmıştır. Numunesi alınan betonların 28 günlük basınç dayanımlarını ölçmek için laboratuvarda deneyleri yapılmıştır.

Beton dökümünü izleyen 7 gün boyunca kür uygulanan numuneler, sabah ve akşam birer kez olmak üzere sulanmış, böylece oluşabilecek rötre çatlakları önlenmiştir. 14 günün sonunda kalıplar sökülmüştür (Şekil 3.9).



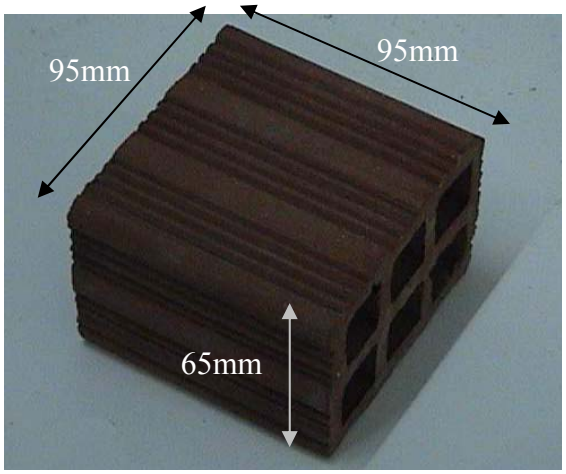
Şekil 3.9 : Kalıpların sökülmesi işlemi.

Şantiyede üretimi tamamlanan betonarme boş çerçeveler (Şekil 3.10), Boğaziçi Üniversitesi Laboratuvarı'na nakledilmiş, tuğla duvar örülme, sıva uygulama ve CFRP güçlendirme uygulanacak numunelerin güçlendirme işlemleri laboratuvarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10 : Üretimi tamamlanan betonarme çerçevelerin görünümü.

Tuğla tipi olarak, ölçeği küçültülmüş delikli tuğla kullanılmış olup (Şekil 3.11), tuğla boyutları 65x95x95 mm, tuğla delikleri yatay konumda olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.11 : Tuğla örneği.



Şekil 3.12 : Dolgu duvarlı çerçeve ve sıva uygulaması.

Duvar, kum-çimento-kireç ve su karışımından oluşan ince sıva ile sıvanmıştır. Harç-sıva malzemesi karışım oranları aşağıdaki Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu oranlar belirlenirken daha önce yapılmış benzer çalışmalar referans alınmıştır.

Çizelge 3.2 : Harç ve sıva malzeme karışım oranları.

Malzeme	0-3 mm kum	Kireç	Çimento	Su
Ağırlık oran (%)	61	10,5	10,5	18

Sıva ve harç malzemesi basınç dayanımları, tuğla malzeme kesme ve basınç dayanımlarını ölçmek için de 3'er adet numune alınmıştır. Malzeme testleri,

deneylerin başladığı gün yapılmıştır. Deneyler sırasında numunelerin davranışını daha rahat gözlemleyebilmek, muhtemel çatlak oluşumlarının daha rahat izlenebilmesi için her numunenin sıva uygulaması sonrası beyaz renkli plastik boya ile boyanması işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Boya uygulaması tamamlanmış numune.

Üretimi tamamlanmış numuneler, özel ankraj bulonları ile laboratuvar döşemesine ankrajlanmış mevcut temele monte edilerek deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deneye hazır duruma getirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Üretimi tamamlanan numunenin deney düzeneğine yerleştirilmesi.

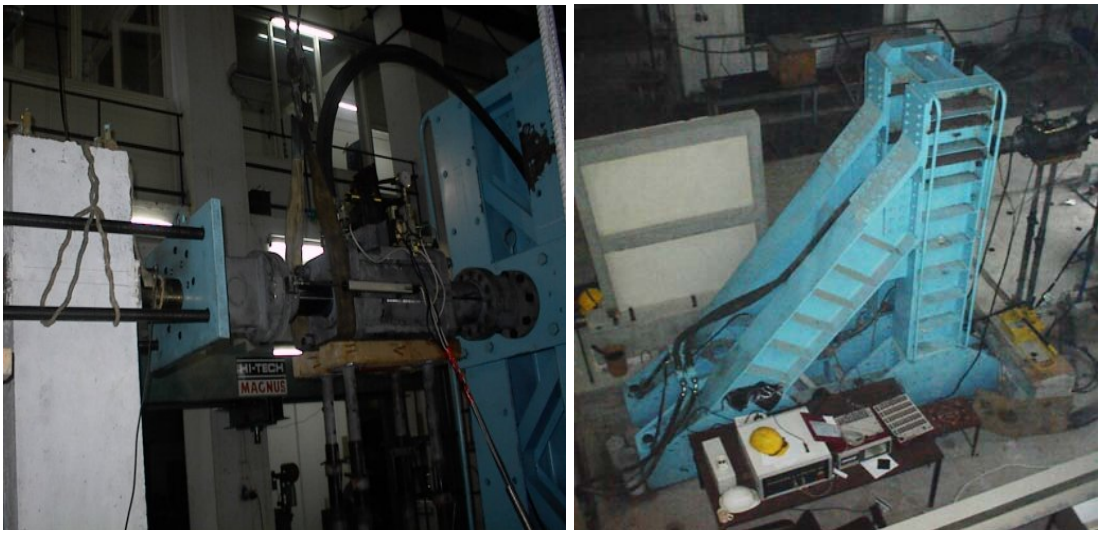
3.4 Deney Düzeneği

Bu çalışma kapsamındaki tüm deneyler, Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda yapılmış ve çalışmanın deney programı, literatürde karbon fiber kompozitlerle güçlendirilen çeşitli betonarme elemanları konu alan çalışmalarda yapılan deneyler, deney teknikleri, deney örnekleri üretim kriterleri ve standartlarını referans alarak geliştirilmiştir.



Şekil 3.15 : Deney düzeneği.

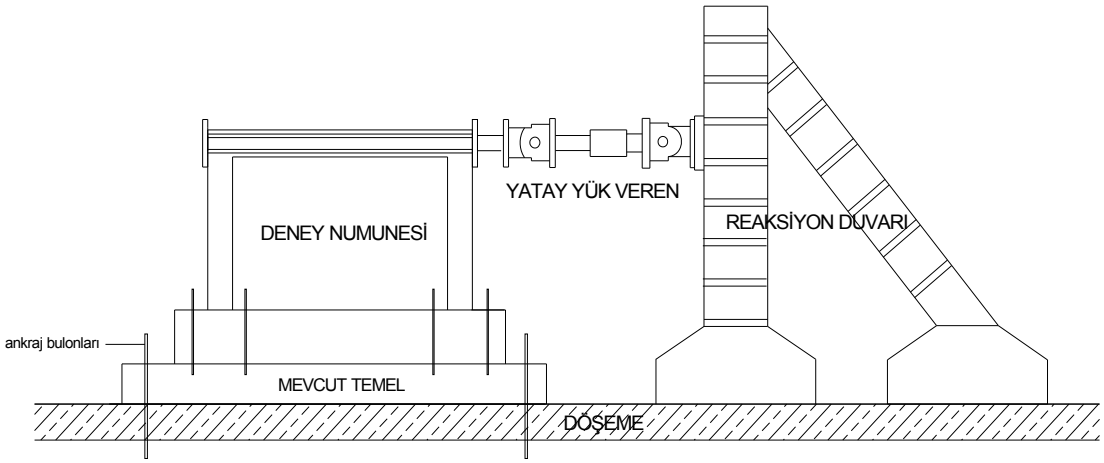
Deney düzeneği (Şekil 3.15), yatay yükü sağlayan 250 kN kapasiteli yerdeğiştirme kontrollü yük aktivatörü, yük aktivatörünün bağlandığı 2000 kN kapasiteli çelik reaksiyon duvarı, yükleme çerçevesi, yatay yükün numuneye aktarılması için kullanılan ara parça elemanları, 60 cm kalınlığındaki rijit döşeme ve çeşitli kapasitelerdeki yerdeğiştirme ölçer cihazlarından oluşmaktadır. Tüm bu ölçümler 60 kanallı veri toplama sistemine sürekli aktarılmakta, kontrol odasındaki bilgisayarlar aracılığı ile otomatik yükleme ve ölçüm cihazlarının ürettiği analog bilgiyi fiziksel büyüklüğe çevirerek veri toplama işlemi yapılmaktadır (Şekil 3.16, 3.17, 3.18).



Şekil 3.16 : Yük aktivatörü ve reaksiyon duvarı.



Şekil 3.17 : Şekildeğiştirme ölçerler ve veri toplama sistemi.



Şekil 3.18 : Deney düzeneği.

Numunenin tepe yerdeğiştirmesini ölçen yerdeğiştirme ölçerlerden gelen veriler sayesinde istenilen yerdeğiştirme seviyeleri kontrol edilmiştir. Her çevrim 3 itme, 3 çekme adımı olacak şekilde tekrarlı yükler altında tekrarlanmıştır. Her çevrimden sonra numunenin davranışı, her çevrimde oluşan çatlaklar gözlenmiştir. Tüm deneylerde, numunelerin maksimum taşıma gücüne ulaşması ve plastik deformasyonların oluşması sağlanmış, her numunede göçme oluşuncaya kadar deneyler devam etmiştir.

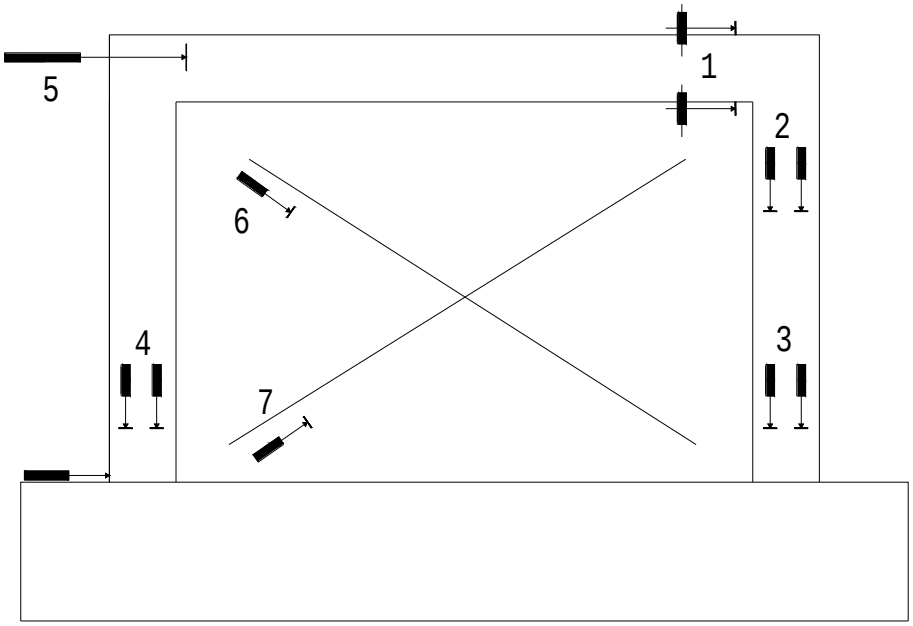
Deney sırasında numunedeki yer değiştirmeleri, uygulanan yatay yükü, eğrilik durumlarını ölçebilmek için şekildeğiştirme ölçer ve yük ölçerler yerleştirilmiştir. Hasarın en fazla oluşmasının beklendiği potansiyel plastik mafsal bölgelerine de şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiş, böylelikle tekrarlı tersinir yatay yük etkisi altında plastik mafsal bölgelerinin davranışının incelenmesi için moment-eğrilik ilişkileri elde edilebilmiştir. Çalışmada elde edilmesi istenen amaca yönelik yer değiştirme ölçerler farklı noktalara uygulanmıştır (Şekil 3.19).

Deneysel çalışmada, deney numunelerinin davranışları sabit ötelenme oranına göre değerlendirilmiştir. Her numune için çevrim numaraları, sabit ötelenme değerleri ile belirlenmiş, ötelenme değeri, numunenin yatayda yaptığı yerdeğiştirme değerinin yatay yükün uygulandığı noktanın temele olan uzaklığına oranı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.19 : Numunelere yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer örneği.

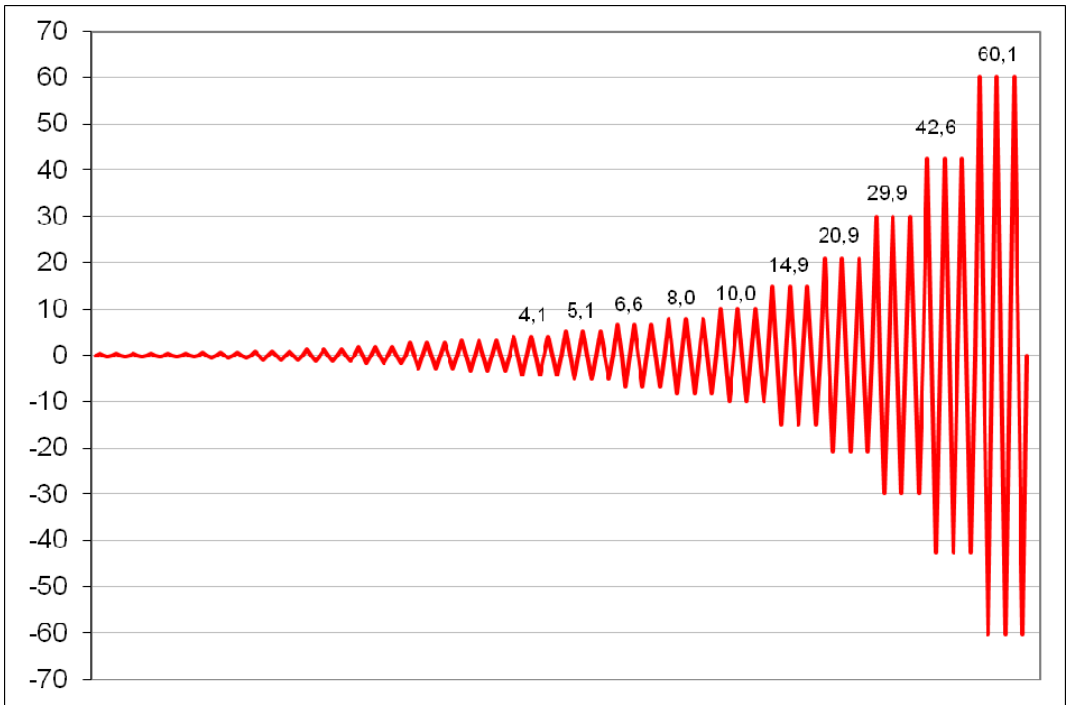
Dolgu duvarların kayma deformasyonunu ölçmek için de Numune 1 (boş çerçeve) haricinde her numunede duvarın tek yüzüne şekil değiştirme ölçerler çapraz olarak yerleştirilmiştir. Bunun dışında numunenin düzlem dışı hareketi ve olası temel hareketleri de şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilerek gözlemlenmiştir. Numunelerde kullanılan deplasman ölçerler ve mesnetleme yerleri şematik olarak Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20 : Şekildeğiştirme ölçerlerin şematik görünümü.

Deney sırasında her yükleme seviyesinde oluşan çatlaklar numuneler üzerinde belirtilmiş ve numaralandırılmıştır. İtme ve çekmede oluşan çatlakların karışmaması için farklı renkler kullanılmıştır. İtme sırasında oluşan çatlaklar mavi renk, çekme sırasında oluşan çatlaklar kırmızı renkli olarak işaretlenmiştir.

Deney prosedürünün belirlenmesinde daha önce yapılmış deneyler ve ACI'da [91] belirtilen şartlar dikkate alınmıştır. Buna göre, ilk çevrim lineer elastik sınırlar içinde olacak, birbirini tekrar eden iki çevrim arası oran 1.25-1.5 arası olacak ve her itme-çekme çevrimi 3'er kez uygulanacak şekilde deneylerin yapılması kararlaştırılmıştır. Tüm deneyler yerdeğiştirme kontrollü yapılmıştır. Tüm deney numunelerine uygulanan yükleme protokolü Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 : Yükleme protokolü.

3.5 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.5.1 Beton

Mevcut yönetmeliklere göre yapılan yapıların durumunu temsil etmek için tüm numunelerde nervürlü donatı ve C25 betonarme betonu kullanılmıştır.

C25 betonarme betonu karışım oranları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : C25 Beton karışım oranları.

C25 Beton Karışım Oranları	
Malzeme	Ağırlık (kg/m³)
Çimento (c)	275
Su (w)	190
Kum (0-3mm)	859
Kırma taş I (3-7mm)	763,5
Kırma taş II (7-15mm)	286,3

Numunelerde kullanılan betonun basınç dayanımını ölçmek için 3'er adet çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm silindir numuneler alınmış ve beton basınç deneyi uygulanmıştır.

Standart silindir numuneler 3000 kN kapasiteli yükleme cihazı kullanılarak eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.22). Deneyler sonucunda beton malzeme 28 günlük ortalama beton basınç dayanımı 27.22 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.22 : Beton basınç deneyi.

3.5.2 Donatı çeliği

Numunelerde kullanılan çelik donatıların gerilme-şekil değiştirme özellikleri, donatı kopma dayanımı değerinin belirlenebilmesi için, standartlara uygun donatı çekme deneyi yapılmıştır. Tüm numunelerde hem boyuna, hem de enine donatı için

kullanılan St420 kalitesinde, Φ10 çaplı nervürlü donatı çeliği çekme deneyleri, 200 kN kapasiteli mekanik çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 : Çelik çekme deneyi.

3.5.3 Harç ve sıva malzemesi

Numunelerde kullanılan sıva ve harç malzemenin karışım oranları aynıdır. Uygulanan sıva kalınlığı tüm numunelerde yaklaşık 12 mm, tuğlalar arası harç kalınlığı ise yaklaşık 5mm'dir. Sıva ve harç basınç dayanımlarını ölçmek için de 3'er adet 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler alınmış, bu numuneler üzerinde laboratuvarda basınç deneyleri uygulanmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Duvar harcı ve sıva basınç deneyi.

Deneyler sonrası duvar harcı ve sıva malzeme basınç dayanım değerleri Çizelge 3.4 ve 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Duvar harcı basınç dayanımları.

Duvar Harcı	Küp numune basınç dayanımı (Mpa)
Numune 1	3.48 Mpa
Numune 2	3.44 Mpa
Numune 3	2.72 Mpa

Çizelge 3.5 : Sıva harcı basınç dayanımları.

Sıva	Küp numune basınç dayanımı (Mpa)
Numune 1	2.28 Mpa
Numune 2	2.52 Mpa
Numune 3	2.32 Mpa

3.5.4 Delikli tuğla duvar

Deneylerde kullanılacak küçültülmüş ölçekli tuğla duvarın basınç ve kayma dayanımlarını bulmak amacıyla bir seri basit deneyler uygulanmıştır. Boyutları 65x95x95 mm olan delikli tuğlalardan, araları harç malzeme ile doldurularak üst üste 3 adet olacak şekilde 3 adet numune alınmış, tuğla delikleri yatay konumda olacak şekilde numuneler 3000 kN kapasiteli yükleme cihazına yerleştirilerek eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Tuğla duvar kayma dayanımını ölçmek için ise Şekil 3.25'de gösterilen numunelerden 3'er adet üretilmiş ve tuğla delikleri yatay olacak şekilde test mekanizmasına yerleştirilerek basit kayma dayanım deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda ortaya çıkan tuğla duvar basınç ve kayma dayanımları Çizelge 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.25 : Tuğla basınç ve kayma testleri.

Çizelge 3.6 : Tuğla duvar basınç ve kayma dayanımları.

Tuğla duvar	Tuğla basınç dayanımı (Mpa)	Tuğla kayma dayanımı (Mpa)
Numune 1	1.11 Mpa	0.43
Numune 2	1.71 Mpa	0.46
Numune 3	1.27 Mpa	0.44

3.5.5 Karbon elyaf malzeme

Deneysel çalışmada güçlendirme malzemesi olarak Zoltek firmasının ürettiği Panex35 türü karbon lif takviyeli polimer tabakalar kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de karbon lif takviyeli polimer tabakaların mekanik ve geometrik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Karbon elyaf malzeme özellikleri.

CFRP Malzeme özellikleri	
Gerilme Dayanımı	3800 Mpa
Elastiklik Modülü	242 Gpa
Kopma Uzaması	1.5 %
Yoğunluk	1.81 g/cc
Fiber çapı	7.2 mikron
Karbon içeriği	95%
Akma uzaması	270 m/kg

Karbon elyaf malzemenin deney elemanlarına aderansı ise Duratek firmasının ürettiği Av23 Epoksi Laminasyon Reçinesi ile gerçekleştirilmiştir. AV 23, betonarme elemanlara karbon elyaf malzemeyi yapıştırmada kullanılan, iki bileşenli, solventsiz, epoksi bazlı bir laminasyon reçinesidir. İki bileşenli malzeme mikser ile karıştırma süresi 2-5 dakikayı aşmamak üzere homojen bir karışım olacak şekilde karıştırılmaktadır. Uygulanacak yüzey fırça yardımıyla temizlenmekte ve yüzey hazırlığı yapılmış olan duvara AV 32 solventsiz epoksi beton emprenye astarı ile 100–150 g/m² kullanılarak emprenye edilir. Bunu takiben önceden enjeksiyonu yapılmış betonarme eleman üzerine AV- 23 sürülmekte, üzerine karbon elyaf yatırılmakta ve laminasyon rulosuyla lamine edilip yapıştırılmaktadır. Elyaf aralarından taşan AV 23 karbon elyaf üzerine yedirerek işlem tamamlanmaktadır. AV 23 yalnız yapışmaya yetecek miktarda kullanılmalıdır.

Epoksi malzemenin teknik özellikleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Epoksi malzeme teknik özellikleri.

Epoksi Malzeme özellikleri	
Komponent Sayısı	2
Karışım Oranı (hacimsel)	65/35
Karışım Yoğunluğu (g/cm^3)	1.0 ± 0.1
Karışım Viskozitesi	4000-7000
Renk	renksiz
Kuruma Süresi (23 °C)	
Toz tutma (dak)	90-120
Dokunma (saat)	6-7
Kat kabul (saat)	12-24
Tam sertleşme (hafta)	1

İlk üç numunede karbon elyafla güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Diğer üç numunenin CFRP ile güçlendirme yöntemi ilk üç deneyin sonuçlarına göre belirlenmiş, güçlendirme şekli ve uygulaması deneyler bölümünde açıklanmıştır.

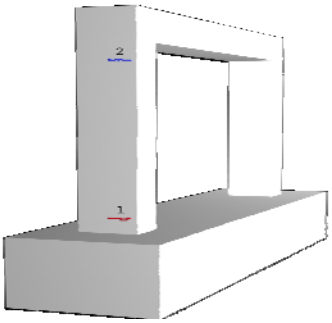
4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Numune 1 – Boş Çerçeve Deneyi

Çalışmanın ilk deneyi olarak boş betonarme çerçeve seçilmiştir. Yerdeğiştirme kontrollü gerçekleştirilen deney, her çevrim üç itme-üç çekme olacak şekilde uygulanmıştır. Deney boyunca gözlemlenen çatlaklar sırasıyla numaralandırılmış, çatlak yerleri işaretlenmiştir. Deney sırasında kaydedilen gözlemler, oluşan çatlaklar ve göçme durumları ötelenme oranlarına göre açıklanmıştır.

Boş çerçeve numunesine 17 çevrim uygulanmıştır. Bu çevrimler sonucunda numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 15. çevrimde, tepe yerdeğiştirme δ=21.7 mm'ye (öteleme oranı=%2.263) gidilirken 29.4 kN, çekmede ise 14. çevrimde tepe yerdeğiştirme δ=15.1 mm'ye (öteleme oranı=%1.611) gidilirken 30.0 kN olarak okunmuştur. Bu numunede dolgu duvar olmadığı için hasarlar genellikle kolon mesnet bölgeleri ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde meydana gelmiştir.

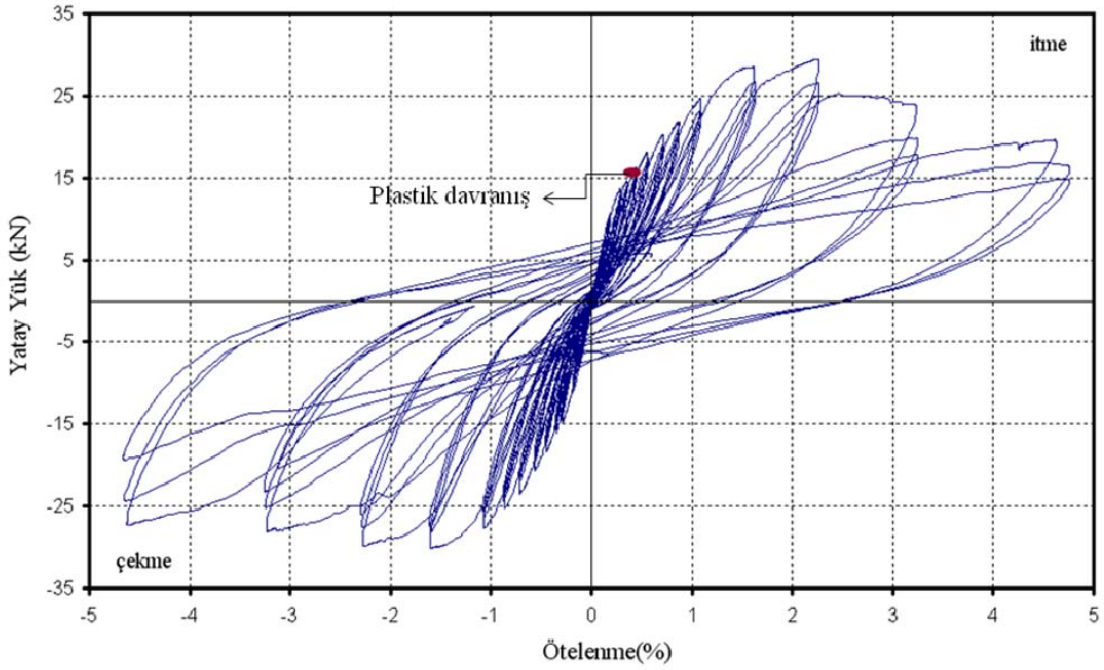
Deneyin 1. çevrimi, ilk hedef tepe yerdeğiştimesi olan δ=0.43 mm'de (öteleme oranı=%0.024) , itmede maksimum yük 1.7 kN, çekmede ise 2.6 kN olarak hesaplanmıştır. Numunede gözlenen ilk çatlaklar 6. çevrimde tepe yerdeğiştirmesi δ=1.95 mm (öteleme oranı=%0.184) iken, sol kolon dış yüzey alt ve üst bölgede eğilme çatlakları olarak gözlenmiştir (Şekil 4.1). Bu çevrimde hesaplanan maksimum yükler itmede 10.7 kN, çekmede ise 10.9 kN'dur.



Şekil 4.1 : İlk çatlakların gözlendiği 6. çevrim.

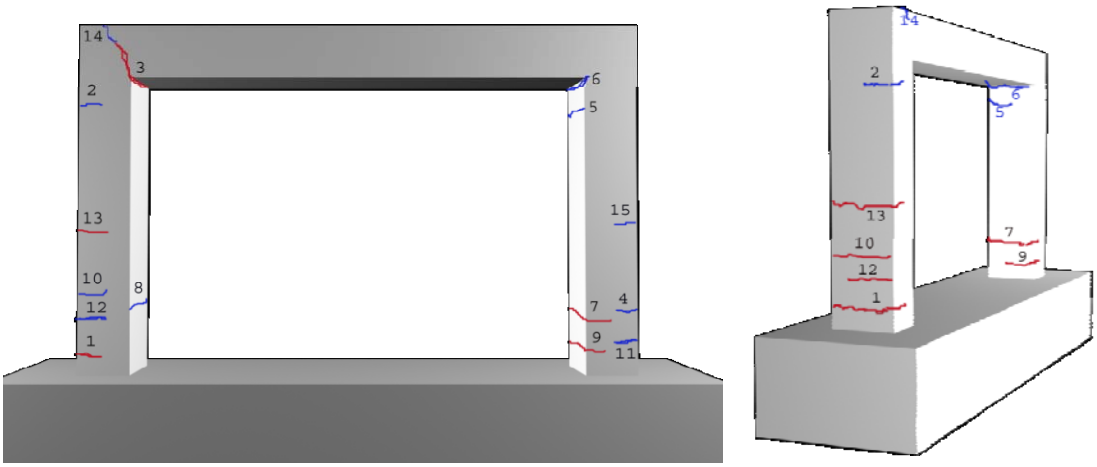
7. ve 8. çevrimlerde çerçevede çatlaklar oluşmaya devam etmiş, mevcut çatlak boylarında uzamalar meydana gelmiştir. Çatlaklar genellikle kolonların iç ve dış yüzeylerinde gözlenmiştir.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=4.41 mm (öteleme oranı %0.443) olduğu 9. çevrimde itmede maksimum yük 16.2 kN, çekmede ise 18.4 kN olarak gerçekleşmiş, deney sonrası elde edilen yatay yük – yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü üzere bu çevrim sonrasında numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır. Şekil 4.2'de boş çerçeve numunesi yatay yük – ötelenme grafiği verilmiş, çerçevenin elastik davranıştan elastoplastik davranışa geçtiği ötelenme oranı (%0.443) işaretlenmiştir.



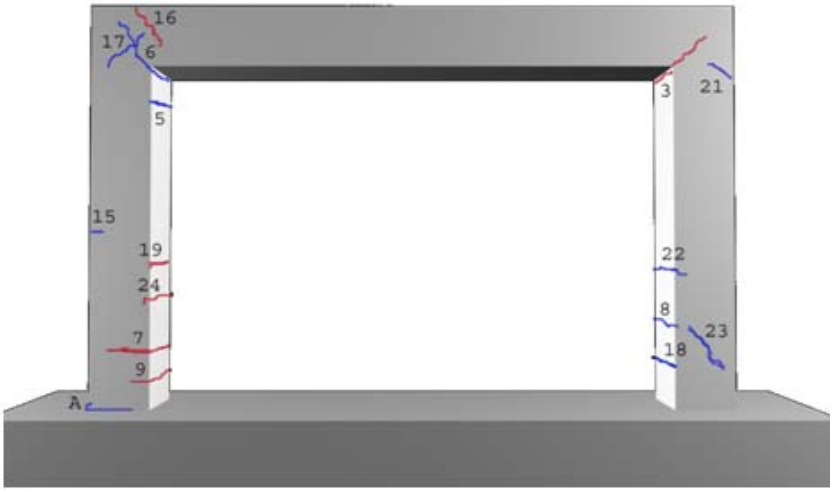
Şekil 4.2 : Numune 1 - Yatay yük - ötelenme eğrisi.

Devam eden çevrimlerde kolonlarda görülen eğilme çatlakları öncelikle kolon alt bölgelerinde, ileri çevrimlerde ise kolon üst bölgelerinde yoğunlaşmıştır. 10. çevrimde, sol kolon-kiriş birleşim bölgesinde oluşan 14 numaralı kesme çatlağı, sol kolon iç yüzeydeki 3 numaralı eğilme çatlağı ile birleşerek genişlemiştir. 10. çevrim sonrası, öteleme oranı %0.554 iken numunede oluşan çatlak durumu şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : 10. çevrim sonrası numunenin durumu.

Bundan sonraki çevrimlerde mevcut çatlaklar uzamış, çatlak genişliklerinde artma gözlenmiştir. Çatlaklar kolon orta bölgelerinde de oluşmaya başlamıştır. Hedef tepe yerdeğiştirme δ=8.45 mm olarak belirlenen (öteleme oranı: %0.868) 12. çevrimde, mevcut eğilme çatlaklarının genişlemesine ilave olarak sol kolon arka yüz birleşim bölgesi ve sol kolon alt bölgede kolonda kesme çatlaklarının olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.4). Bu çevrimde hesaplanan maksimum yükler itmede 21.8 kN, çekmede ise 25.2 kN'dur.



Şekil 4.4 : 12. çevrim sonrası numunedeki çatlak durumu.

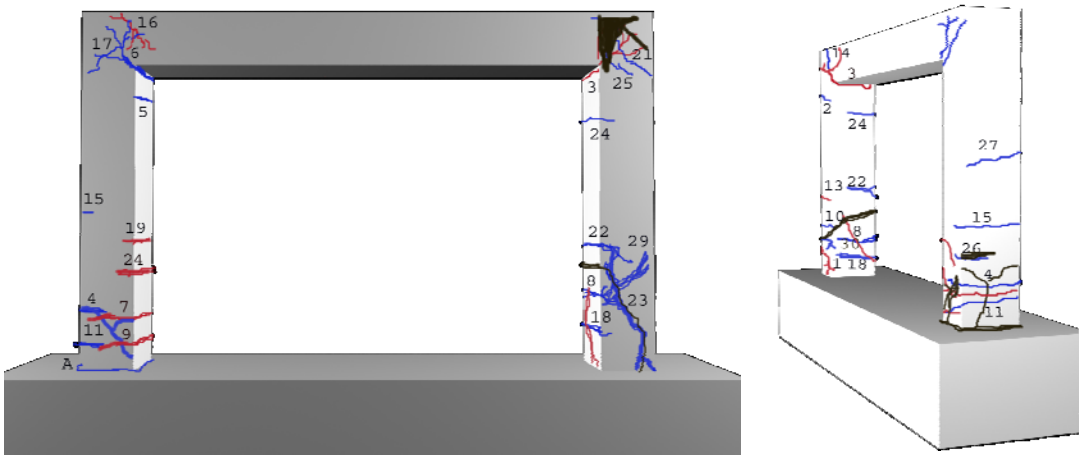
%1.611 öteleme oranı, δ=15.5 mm tepe yerdeğiştirme hedeflenen 14. çevrimde itmede 28.6 kN, çekmede ise deney boyunca ulaşılan en büyük yatay yük olan 30.0 kN değerine, bir sonraki çevrimde, 21.7 mm tepe yerdeğiştirmesi, %2.263 öteleme oranında itme sırasında 29.4 kN'luk maksimum yatay yük değerine ulaşılmıştır.

Bir sonraki çevrim, %2.263 öteleme oranı δ=21.7 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 15. çevrimde tekrarlı itme-çekmeler sonucu sol kolon arka yüzde betonda kopmalar olmuştur. Sağ kolon arka yüz mesnet bölgesindeki itme sırasında oluşan 22 ve 23 numaralı çatlaklar çatallanarak uzamış ve birleşmişlerdir. Sağ kolon alt bölgesinde temelden yaklaşık 32 cm yükseklikte, itme sırasında 29 numaralı kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 4.5). Bu çevrimde itmede maksimum yük 29.4 kN, çekmede ise 29.8 kN olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.5 : 15. çevrimde oluşan kolon alt bölgesindeki kesme çatlakları.

Bazı şekildeğiştirme ölçerler bu çevrimde betondaki kopmalar nedeniyle zarar görmüştür. Şekil 4.6'da 15. çevrim sonrası numune hasar dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : 15. çevrim sonrası numunedeki çatlak oluşumu.

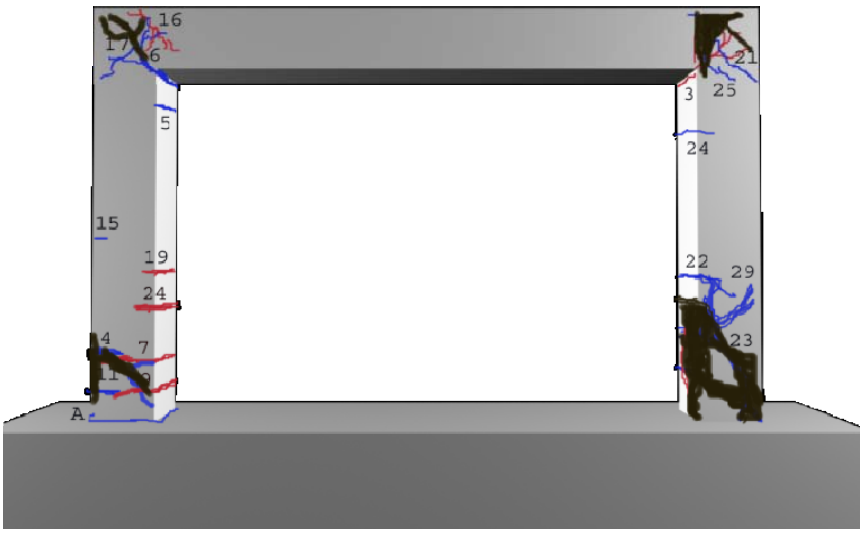
15. çevrim sonrası devam eden çevrimlerde, itme ve çekme sırasında hesaplanan yatay yük değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Numunenin maksimum yük değerleri itmede 29.4 kN, çekmede ise 30.0 kN olarak kaydedilmiştir. Mevcut çatlaklar çatallanarak uzamaya ve genişlemeye devam etmiş, kolon mesnet bölgelerindeki kesme çatlakları sayısı artmıştır. Bu çevrimde, betonda blok halde dökülme ve donatıda burkulma sonucu numune dayanımını büyük ölçüde kaybetmiştir.

Öteleme oranı %3.229, tepe yerdeğiştirme δ=30.88 mm olan 16. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 24.0 kN, çekmede ise 27.7 kN'a düşmüştür. Tekrarlı itme ve çekmeler sonucunda kolon kiriş birleşim bölgelerinde çatlak sayısı artmış, çatlak derinlikleri oldukça genişlemiş, sol kolon arka yüzde betonda kopmalar gözlenmiştir. Bu itme-çekme aşamasında numuneye yerleştirilen yer değiştirme ölçerler betondaki kopmalar sonucunda zarar görmüşlerdir. Her iki kolonda da kolon donatılarındaki burkulmalar ve kesme kırılmaları rahatlıkla gözlenebilmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : 16. çevrim sonrası numunedeki kolon mesnet bölgelerinin durumu.

17. çevrim, maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 43.8 mm olarak ölçüldüğü, son çevrimdir. Bu çevrimde hesaplanan yükler itmede 19.6 kN, çekmede 27.3 kN olup sonrasında deneye son verilmiştir. Şekil 4.8'de deney sonrası numunedeki hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : 17. çevrim sonrası numunedeki hasar durumu.

Boş çerçevenin göçme şekli kolon mesnet bölgelerindeki kesme çatlakları nedeniyle gerçekleşmiştir. İlk olarak kolonlarda başlayan eğilme çatlaklarını, kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları izlemiş, numunenin maksimum yüklere ulaştığı yerdeğiştirme sonrasında gözlenen kolon alt bölgesindeki kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçmüştür. Şekil 4.9'da deney sonrası numunenin genel görünümü verilmiştir.



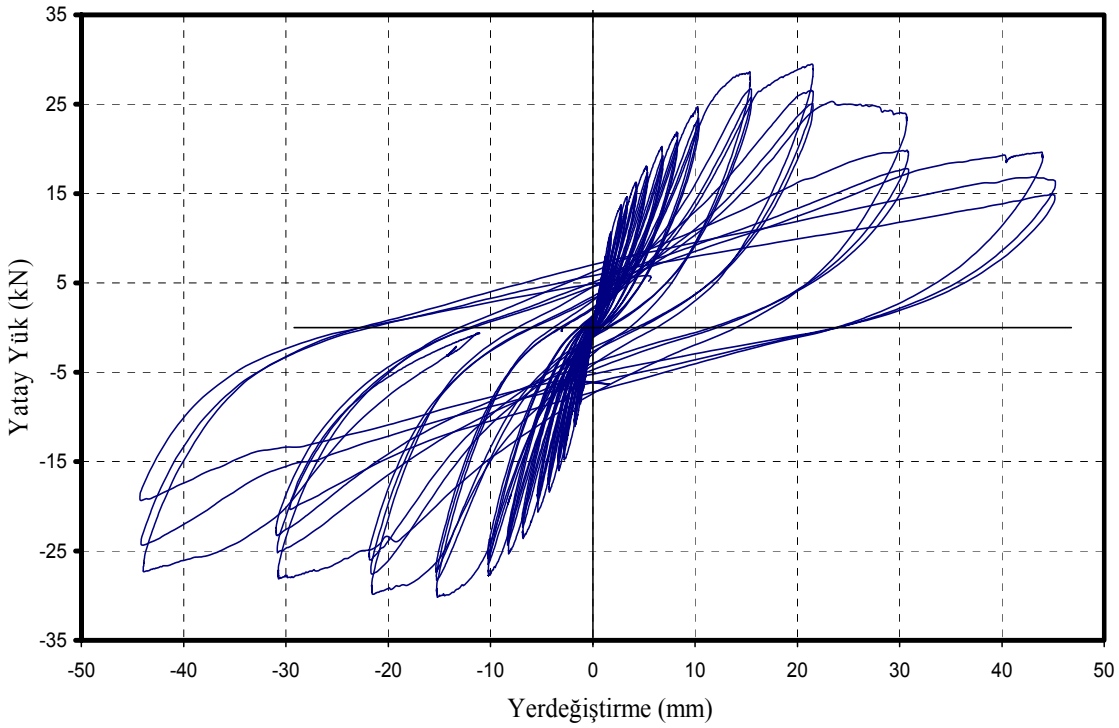
Şekil 4.9 : Deney sonrası sağ-sol kolon alt bölge hasar durumu.

Numune 1'e uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Numune 1 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

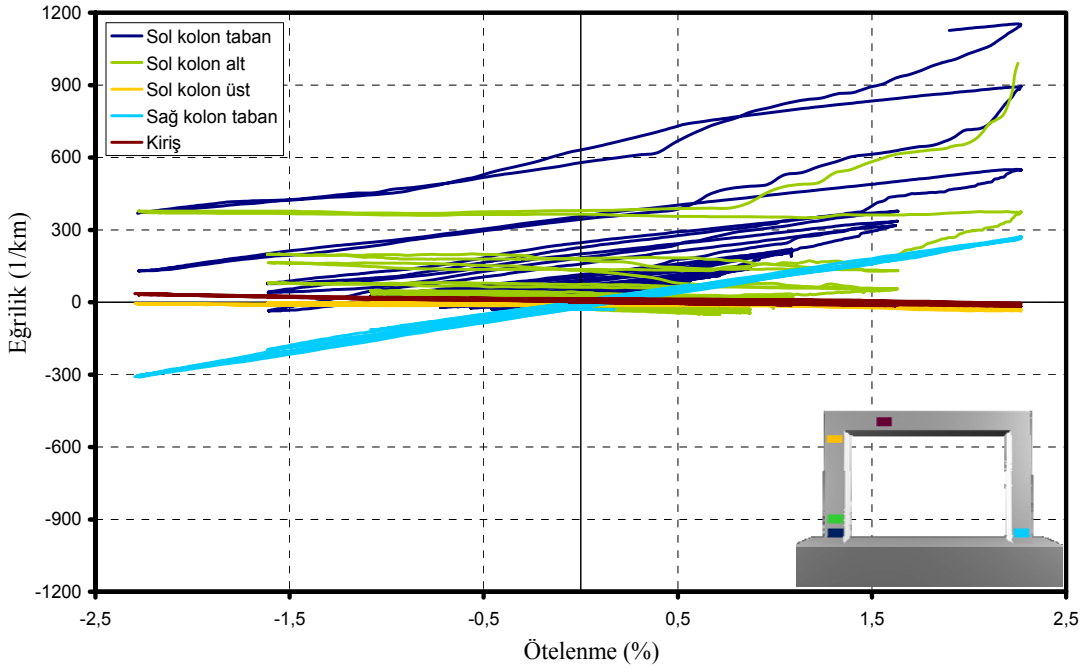
Numune 1		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	0.024	0.43	1.7	0.03	-2.6
2	0.041	0.69	3.4	0.09	-3.0
3	0.062	0.89	3.5	0.29	-4.1
4	0.095	1.1	5.5	0.7	-6.9
5	0.132	1.45	7.8	1.05	-8.4
6	0.184	1.95	10.7	1.55	-10.9
7	0.292	2.97	13.7	2.57	-14.7
8	0.348	3.51	14.6	3.11	-16.1
9	0.443	4.41	16.2	4.01	-18.4
10	0.554	5.46	18.0	5.06	-20.5
11	0.719	7.03	20.3	6.63	-23.4
12	0.868	8.45	21.8	8.05	-25.2
13	1.078	10.44	24.6	10.04	-27.7
14	1.611	15.5	28.6	15.1	-30.0
15	2.263	21.7	29.4	21.3	-29.8
16	3.229	30.88	24.0	30.48	-27.7
17	4.6	43.8	19.6	43.6	-27.3

Boş çerçeve numunesinin davranışının daha kolay izlenebilmesi ve diğer numunelerle karşılaştırılması için deney sırasındaki yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.10'da verilmiştir.



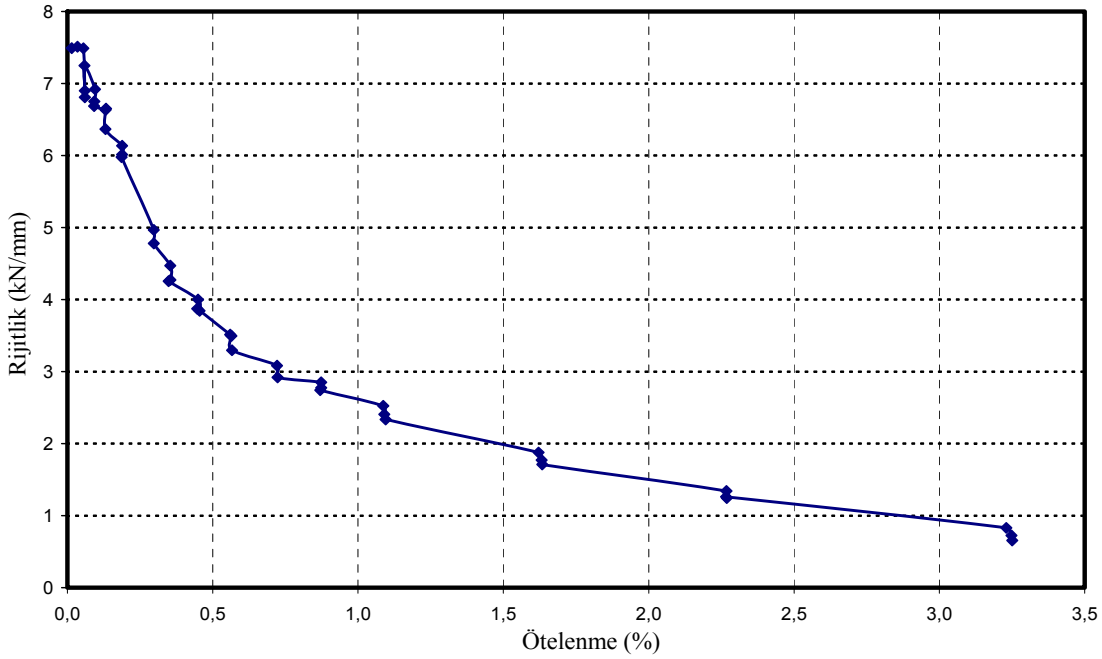
Şekil 4.10 : Numune 1 yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi.

Elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme yeteneği olarak tanımlanan süneklik kapasiteleri bakımından numunelerin karşılaştırılması ve numune içinde hasar dağılımının daha detaylı anlaşılabilmesi için moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri elde edilirken, eğrilik değerleri kolon alt ve üst bölgelerine yerleştirilen yer değiştirme ölçerlerden yararlanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11'de eğrilik-ötelenme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.11 : Numune 1- Eğrilik-ötelenme eğrisi.

Deney elemanlarının rijitlik değerleri yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanmıştır. Hesaplanan rijitlik-ötelenme eğrisi şekil 4.12'de verilmiştir.



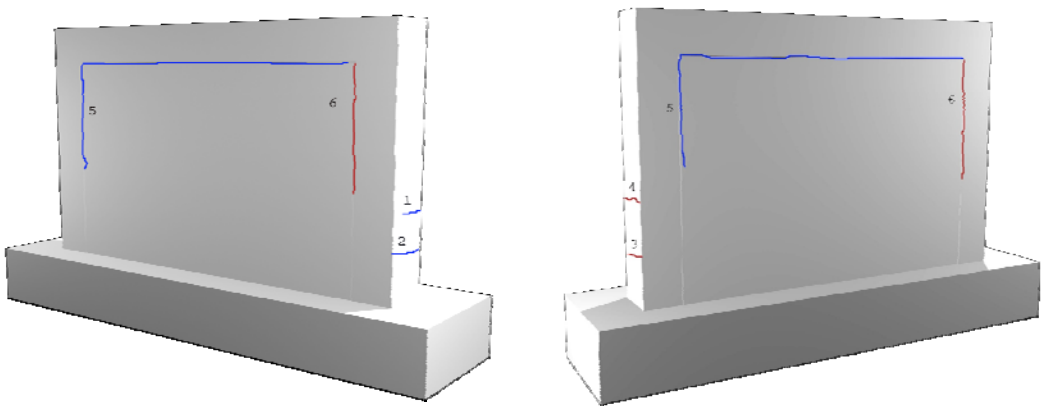
Şekil 4.12 :. Numune 1 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.2 Numune 2 – Dolgu Duvarlı Tek Yüzü Sıvalı Çerçeve Deneyi

Çalışmada ikinci deney dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçevede gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye, ilk 3 çevrim yük kontrollü, sonraki çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olmak üzere 18 çevrim uygulanmıştır. İlk üç çevrimde yatay yük kontrollü deney yapılmasının nedeni istenilen hedef yerdeğiştirmelere deney düzeneğinin hassasiyeti nedeniyle gidilememe riski bulunmasındandır.

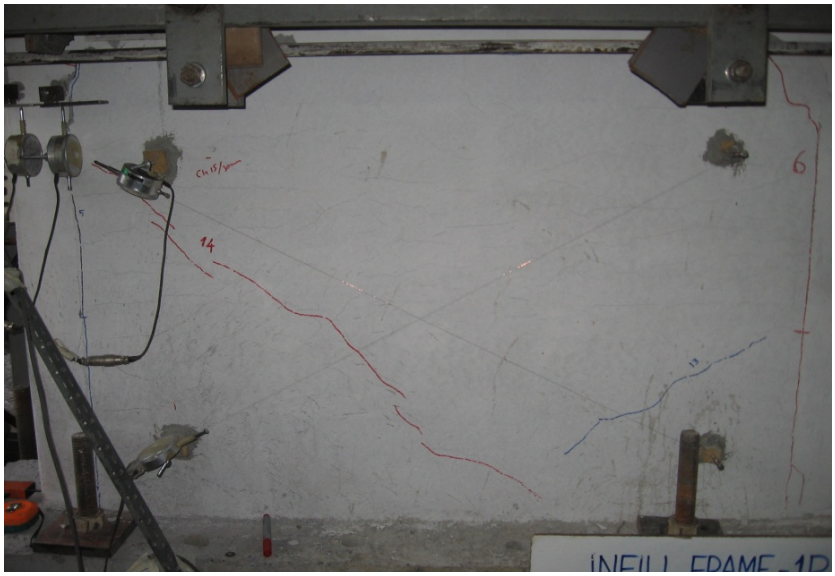
Bu çevrimler sonucunda numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 11. çevrimde, tepe yerdeğiştirme δ=6.85 mm'ye (öteleme %0.719) gidilirken 57.2 kN, çekmede ise 14. çevrimde tepe yerdeğiştirme δ=15.3 mm'ye (öteleme %1.611) gidilirken 49.8 kN olarak okunmuştur. Bu numunede dolgu duvar uygulaması olduğu için hasarlar öncelikle dolgu duvarlarda çapraz diyagonal çatlaklar olarak ortaya çıkmış, daha sonra kolon mafsal bölgelerinde eğilme ve kesme çatlakları olarak gözlenmiştir.

Deneyin ilk üç çevriminde uygulanacak yatay yükler sırasıyla 20, 25, 30 kN olarak belirlenmiştir. 4. çevrimde hedeflenen yerdeğiştirmeye ulaşılmış ve deneye yerdeğiştirme kontrollü devam edilmiştir. Numunede gözlenen ilk çatlaklar 5. çevrimde tepe yerdeğiştirmesi δ=1.30 mm (öteleme oranı=%0.132) iken, sağ ve sol kolon dış yüzey alt bölgede eğilme çatlakları olarak gözlenmiştir (Şekil 4.13). Çatlakların ölçülen genişliği 0.1 mm'den küçüktür. Bununla birlikte betonarme çerçeve ile dolgu duvar birleşim bölgesinde sıva çatlakları gözlenmiştir. 5 ve 6 numaralı sıva çatlakları devam eden tekrarlı yükler altında birleşerek uzamışlardır. Bu çevrimde hesaplanan maksimum yükler itmede 35.0 kN, çekmede ise 32.0 kN'dur.



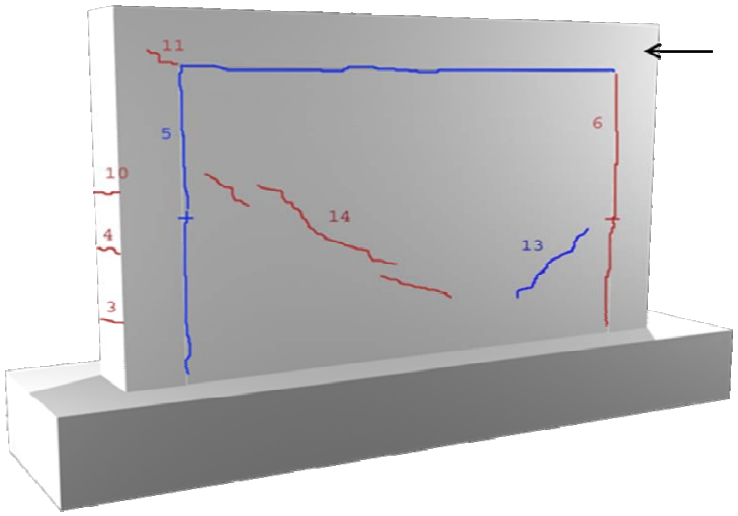
Şekil 4.13 : İlk çatlakların gözlendiği 5. çevrim.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=1.8 mm (öteleme oranı %0.184) olduğu 6. çevrimde itmede maksimum yük 39.2 kN, çekmede ise 32.8 kN olarak gerçekleşmiş, çatlaklar oluşmaya devam etmiş, mevcut çatlak boylarında uzamalar meydana gelmiştir. Çatlaklar genellikle kolonların iç ve dış yüzeylerinde gözlenmiş, bununla birlikte dolgu duvarda 13 ve 14 numaralı çapraz diyagonal kesme çatlakları oluşmuştur (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Numune 2 - Dolgu duvarda gözlenen kesme çatlakları.

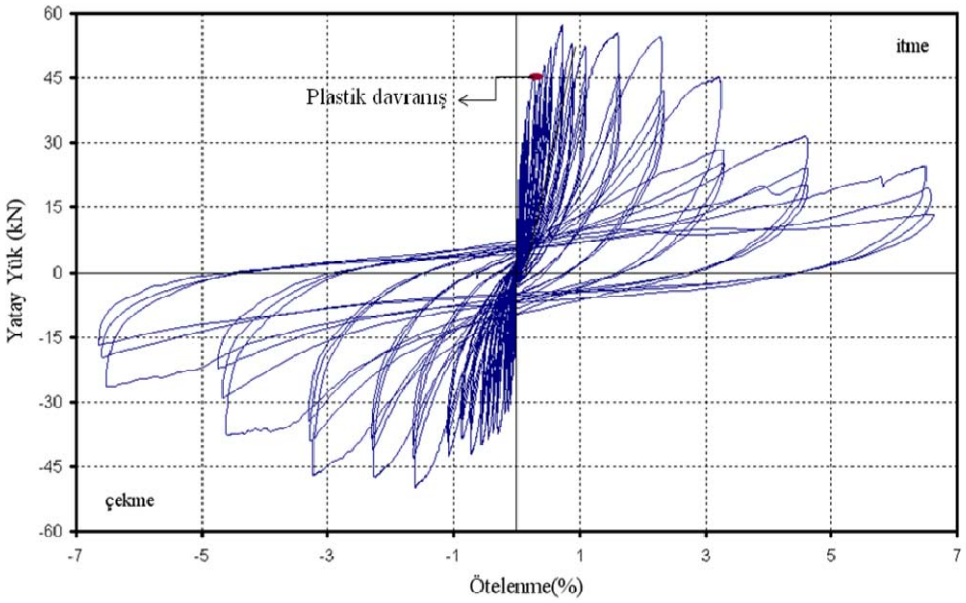
Ayrıca arka yüz kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ~5'er cm uzunluğunda, 0.2 mm derinliğinde kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Bu çevrimde numunede çatlama sesleri net bir şekilde duyulmuştur. Şekil 4.15'de numune ön yüzü 6. çevrim sonrası hasar durumu gösterilmektedir.



Şekil 4.15 : Numune 2 - 6. çevrim sonrası hasar durumu.

Bir sonraki çevrim, %0.292 öteleme oranı δ=2.75 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 7. çevrimde, çatlaklar uzamaya ve çatlak derinlikleri genişlemeye devam etmiş, buna ilaveten tuğlalarda da çatlaklar gözlenmeye başlamıştır. Çerçeve ile dolgu duvar arası çatlaklar daha belirginleşerek tüm birleşim bölgesine yayılmıştır. Bu çevrimde hesaplanan maksimum yükler itmede 45.0 kN, çekmede ise 37.2 kN'dur.

Deney sonrası elde edilen yatay yük – yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü üzere bu çevrim sonrasında numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır. Şekil 4.16'da dolgu duvarlı, tek yüzü sıvalı deney numunesinin yatay yük – ötelenme eğrisi verilmiş, çerçevenin elastik davranıştan plastik davranışa geçtiği ötelenme oranı (%0.292) işaretlenmiştir.



Şekil 4.16 : Numune 2 - yatay yük - ötelenme eğrisi.

Devam eden 8. 9. ve 10. çevrimlerde her iki kolonda görülen eğilme çatlakları öncelikle kolon alt bölgelerinden, kolon üst bölgelerine doğru artarak yoğunlaşmıştır. Dolgu duvarda gözlenen kesme çatlaklarında artış ve uzamalar devam etmiştir. Kolon-kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklarda çatallanmalar artmıştır. Betonarme çerçeve ile tuğla duvar arasında numunenin arka yüzünde belirgin ayrışmalar gözlenmiştir.

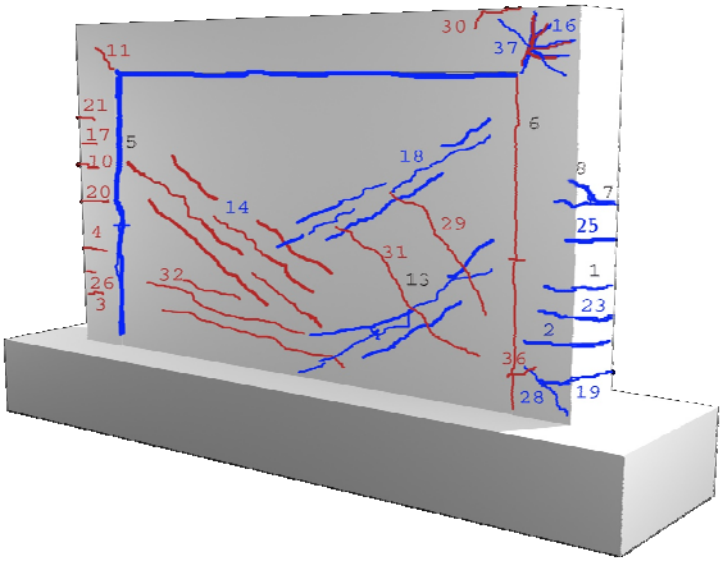
Hedef tepe yerdeğiştirme δ=6.85 mm olarak belirlenen (öteleme oranı: %0.719) 11. çevrimde, mevcut eğilme çatlakları genişlemiş, çatlak derinlikleri artmış (yaklaşık 0.5 mm), duvardaki kesme çatlakları genişlediği için sıvada parçalar halinde

dökülmeler başlamıştır (Şekil 4.17). Bu çevrimde itmede deney boyunca gözlenen en büyük yatay yük olan 57.2 kN, çekmede ise 42.0 kN'a ulaşılmıştır.



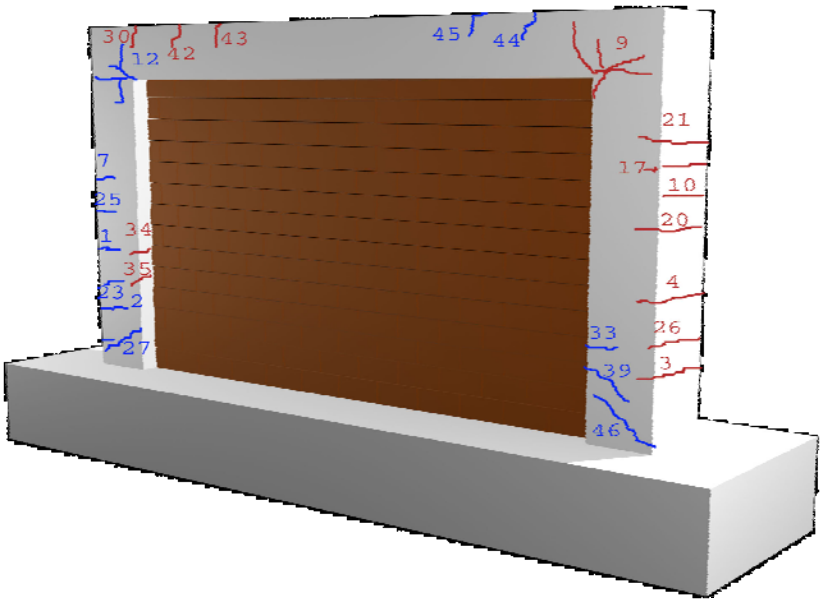
Şekil 4.17 : Numune 2 - Duvarda kesme çatlakları sonucu sıvada dökülmeler.

%0.868 öteleme oranı, δ=8.3 mm tepe yerdeğiştirmesi hedeflenen 12. çevrimde itmede 52.0 kN, çekmede ise 38.4 kN değerine, bir sonraki çevrimde, 10.3 mm tepe yerdeğiştirmesi, %1.078 öteleme oranında itme sırasında 51.9 kN, çekmede ise 42.3 kN değerine ulaşılmıştır. Bu iki çevrimde kolon mafsal bölgelerinde ilave kesme çatlakları oluşmuş, mevcut çatlaklar çatallanarak uzamış, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde çatlak sayısı artmıştır. Sağ kolon ön ve arka yüzde kolon mafsal bölgesinde 27 ve 28 numaralı kesme çatlakları oluşmuştur. Ön yüzde duvarda kesme çatlakları ve buna bağlı sıva dökülmeleri artarak devam etmiştir. 13. çevrim sonrası, numunede oluşan çatlak durumu Şekil 4.18'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : Numune 2 - 13. çevrim sonrası hasar durumu.

Bir sonraki çevrim, %1.611 öteleme oranı δ=15.3 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 14. çevrimde çekmede maksimum yük olan 49.8 kN seviyesine ulaşılmıştır. Bu çevrimde özellikle sıvasız olan arka yüzde duvar-çerçeve arası ayrışmalar çok daha belirginleşmiş, kirişte itme sırasında 42 ve 43, çekmede ise 44-45-46 numaralı eğilme çatlakları oluşmuştur (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Numune 2 - 14. çevrim sonrası numune arka yüz hasar durumu.

15. çevrim ve sonrası devam eden çevrimlerde, itme ve çekme sırasında hesaplanan yatay yük değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Kolon mafsal bölgeleri ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kesme çatlakları oluşmaya ve mevcut çatlaklar derinleşerek uzamaya devam etmişlerdir. Sağ kolon arka yüzde kolon-kirişin duvarla birleştiği köşede tuğlada ezilme gerçekleşmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : Numune 2- Sağ kolon-kiriş birleşim bölgesinde duvarda ezilme.

15. çevrimde hedeflenen ötelenme oranı %2.263 iken ölçülen maksimum yükler itmede 53.1 kN, çekmede ise 47.3 kN olmuştur. Bu çevrim sırasında duvardaki kesme dayanımını ölçen sistem sıva kopmaları sonucu zarar görmüştür. Bununla birlikte sağ kolon arka yüzdeki 27 numaralı kesme çatlağı derinliği artmış (~1.5 mm), çatallanarak temele kadar uzamıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 : Numune 2- kolon alt bölgesinde de oluşan kesme çatlağı.

Öteleme oranı %3.229, tepe yerdeğiştirme δ=30.7 mm olan 16. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 45.3 kN, çekmede ise 46.8 kN'a düşmüştür. Tekrarlı itmeler sonucunda sağ kolon arka yüz kolon alt bölgede betonda kopmalar gerçekleşmiştir. Buna ilaveten sağ kolon-kiriş birleşim bölgesinde çatlaklarda çatallanmalar sonucu paspayı dökülmeleri ve tuğlalarda iri parçalar halinde dökülmeler gözlenmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : Numune 2 – Tuğla duvarda dökülmeler.

Tekrarlı yüklerin uygulandığı 16. çevrim boyunca sağ kolon mafsal bölgesindeki mevcut 28-39 ve 40 numaralı kesme çatlakları oldukça genişlemiş, temele kadar uzamış ve betonda paspayı dökülmeleri gerçekleşmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 : Numune 2- Kolon alt bölgedeki kesme çatlakları.

Maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 43.6 mm olarak ölçüldüğü, çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği 17. çevrimde maksimum yükler itmede 31.4 kN, çekmede ise 37.7 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrim boyunca numuneden büyük parçalar halinde tuğla kopmaları, kolon alt bölgelerinde betonda kopmalar oluşmuş, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ise sadece paspayı dökülmeleri gözlenmiştir (Şekil 4.24).



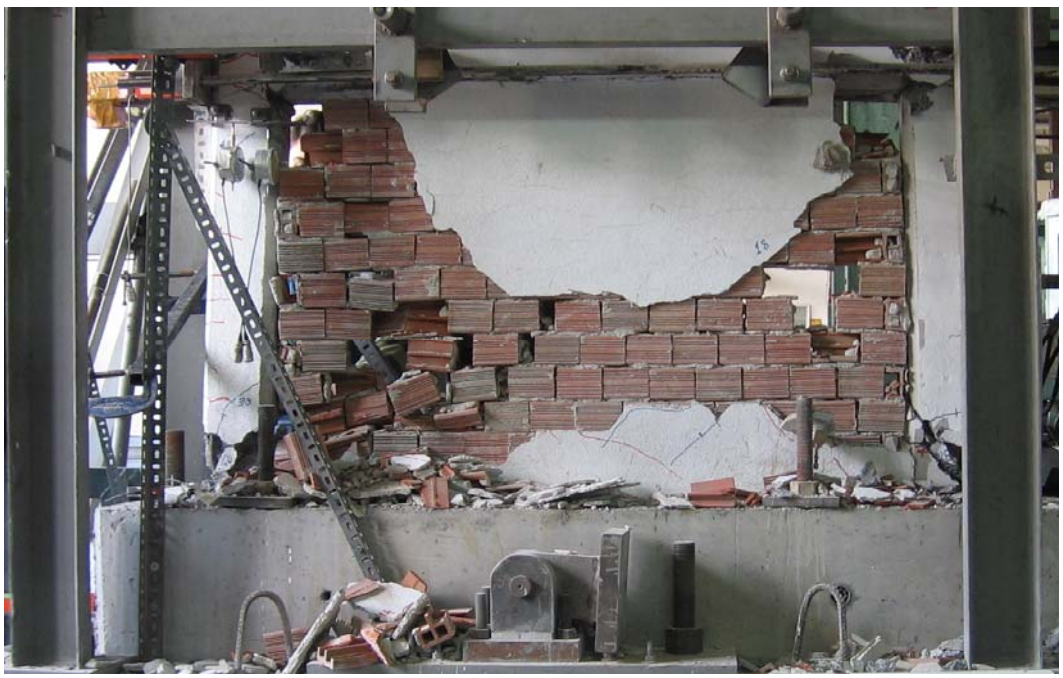
Şekil 4.24 : Numune 2 - 17. çevrim sonrası numune hasar durumu.

Tekrarlı yükler altında devam eden çevrimde betonda paspayı dökülmeleri sonrası kolon alt bölgelerinde donatı burkulmaları açık bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 : Numune 2 – Kolon alt bölgesinde donatı burkulmaları.

Çerçevenin göçme konumuna ulaşmasından sonraki deneyin son çevrimi olan 18. çevrimde hedeflenen δ=61.7 mm'ye ulaşıldığında ölçülen maksimum yükler itmede 24.7 kN, çekmede ise 26.5 kN olup, deneye son verilmiştir. Şekil 4.26 ve 4.27'de deneyler sonrası numunenin son durumu görülmektedir.



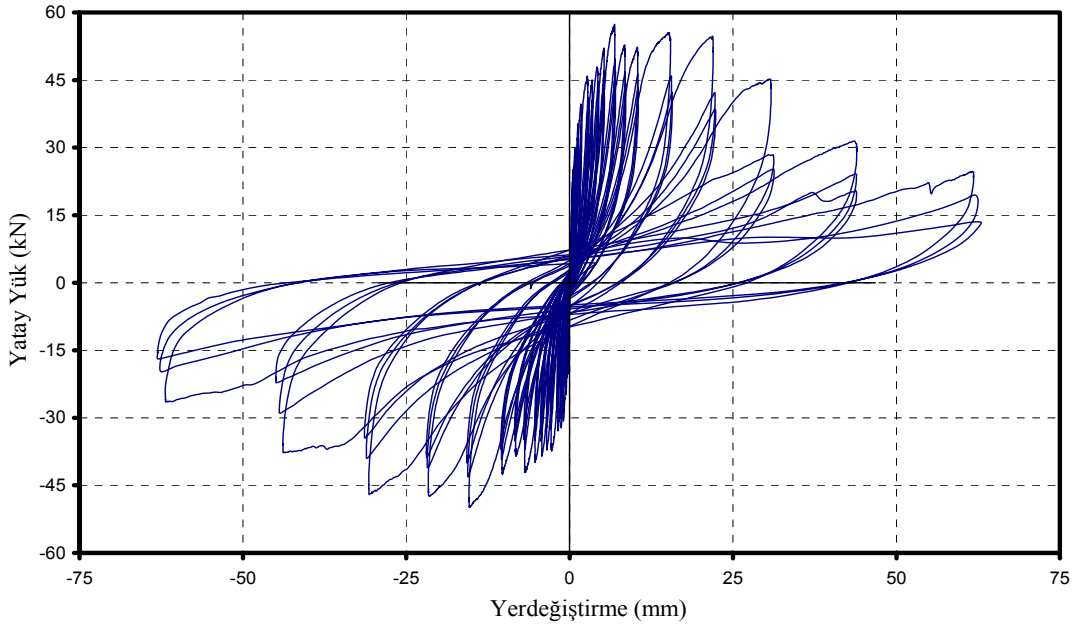
Şekil 4.26 : Deneyler sonrası Numune 2 hasar durumu.



Şekil 4.27 : Deneyler sonrası tuğla duvarların durumu.

Dolgu duvarlı ve tek yüzü sıvalı deney çerçevesinin göçme şekli kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup kesme kırılması ve basınç etkisiyle göçme konumuna gelmeleri sonucu gerçekleşmiştir. İlk olarak kolonlarda başlayan eğilme çatlaklarını, dolgu duvarlarda oluşan diyagonal kesme çatlakları izlemiş, kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları ve numunenin maksimum yüklere ulaştığı yerdeğiştirme sonrasında gözlenen kolon alt bölgelerinde oluşan kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçmüştür.

Dolgu duvarlı ve tek yüzü sıvalı çerçeve numunesinin davranışının yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.28'de verilmiştir.



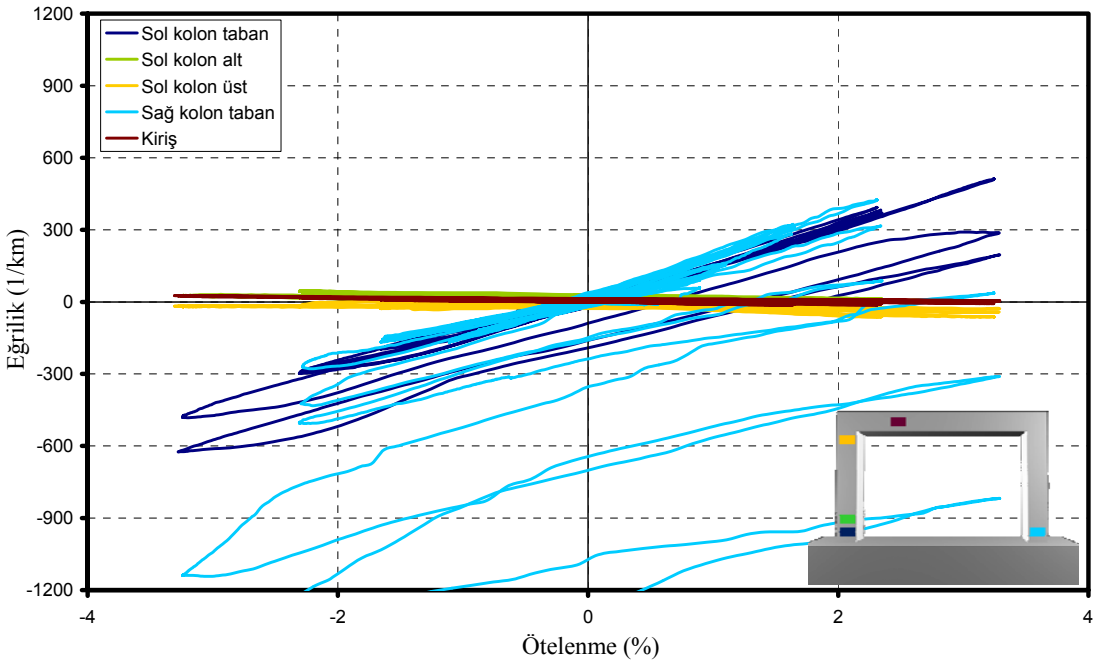
Şekil 4.28 : Numune 2 yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi.

Numune 2'ye uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.2'de görülmektedir.

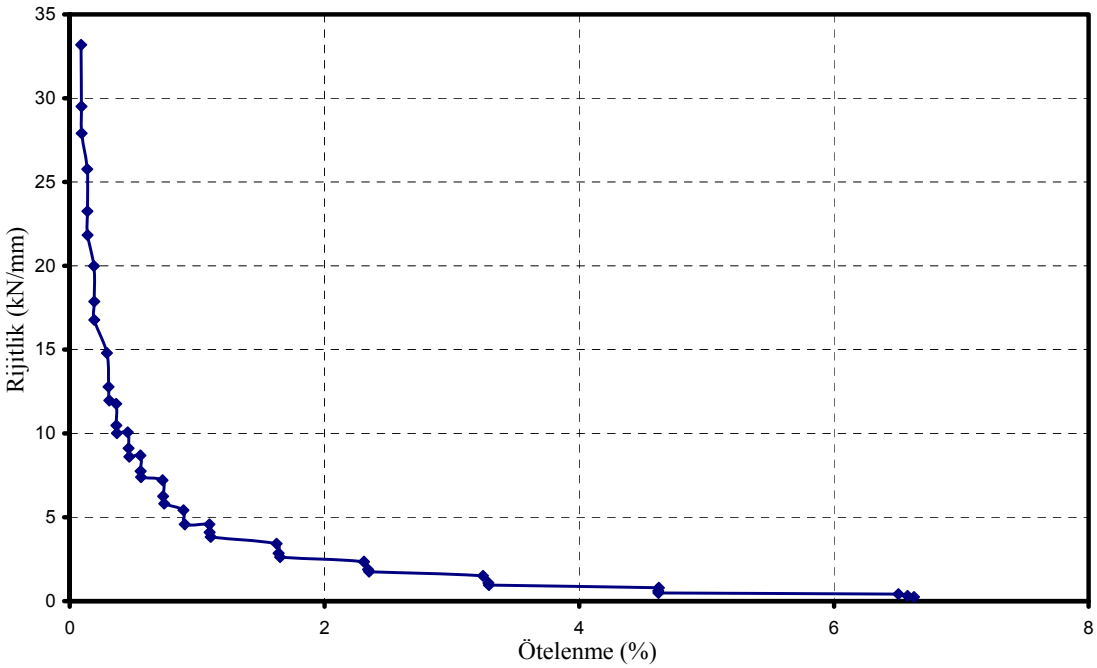
Çizelge 4.2 : Numune 2 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

Numune 2		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	Yük kontrollü	-	20.2	-	-19.5
2	Yük kontrollü	-	24.0	-	-24.5
3	Yük kontrollü	-	29.4	-	-30.3
4	0.095	1.0	28.0	1.0	-28.0
5	0.132	1.3	35.0	1.3	-32.0
6	0.184	1.76	39.2	1.8	-32.8
7	0.292	2.75	45.0	2.76	-37.2
8	0.348	3.4	44.3	3.4	-36.8
9	0.443	4.3	47.8	4.2	-38.5
10	0.554	5.27	52.0	5.28	-40.0
11	0.719	6.85	57.2	6.88	-42.0
12	0.868	8.36	52.0	8.23	-38.4
13	1.078	10.39	51.9	10.22	-42.3
14	1.611	15.3	55.4	15.3	-49.8
15	2.263	21.93	53.1	21.5	-47.3
16	3.229	30.7	45.3	30.7	-46.8
17	4.6	43.6	31.4	43.8	-37.7
18	6.5	61.7	24.7	61.7	-26.5

Şekil 4.29 ve 4.30'da eğrilik-ötelenme eğrisi ve yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanan rijitlik-ötelenme eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.29 : Numune 2 - Eğrilik-ötelenme eğrisi.



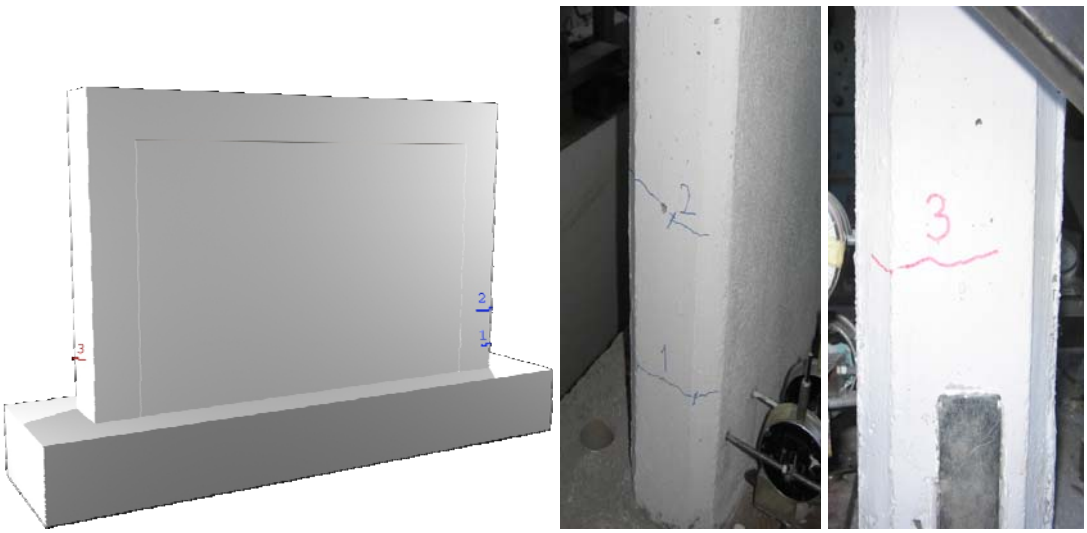
Şekil 4.30 : Numune 2 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.3 Numune 3 – Dolgu Duvarlı Çift Yüzü Sıvalı Çerçeve Deneyi

Çalışma kapsamında üçüncü deney dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çerçevede gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye de ilk 3 çevrim yük kontrollü sonraki çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olmak üzere 18 çevrim uygulanmıştır.

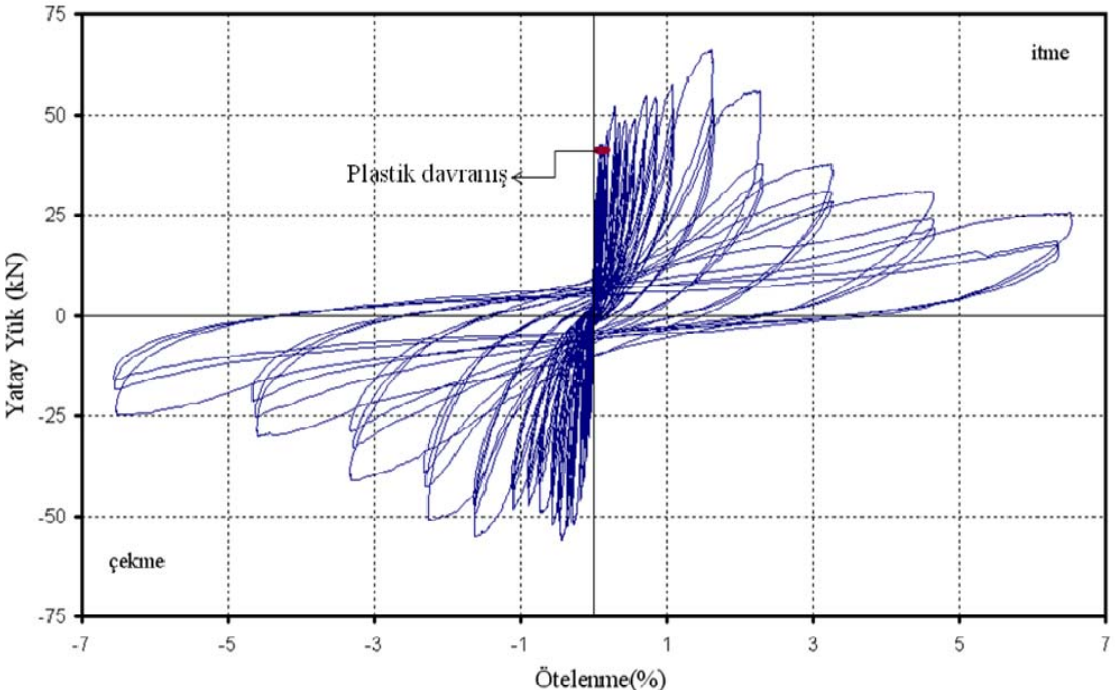
Bu çevrimler sonucunda tüm deney boyunca numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 14. çevrimde, tepe yerdeğiştirme δ=15.0 mm'ye (öteleme % 1.611) gidilirken 66.0 kN, çekmede ise aynı çevrimde tepe yerdeğiştirme δ=15.6 mm'ye (öteleme % 1.611) gidilirken 55.8 kN olarak okunmuştur.

Numunede gözlenen ilk çatlaklar 4. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 42.5 kN, çekmede ise 35.2 kN, öteleme oranı % 0.095 iken, sağ ve sol kolon dış yüzey alt bölgede 1,2 ve 3 numaralı eğilme çatlakları olarak gözlenmiştir (Şekil 4.31). Çatlakların ölçülen genişliği 0.1 mm'den küçüktür. Bununla birlikte betonarme çerçeve ile dolgu duvar birleşim bölgesinde her iki yüzde de duvar-çerçeve arası çizgi şeklinde açılma gözlenmiştir. Duvardaki mevcut sıva çatlakları derinleşerek (~0.4mm) daha belirgin hale gelmişlerdir.



Şekil 4.31 : Numune 3 – Deney sırasında gözlenen ilk eğilme çatlakları.

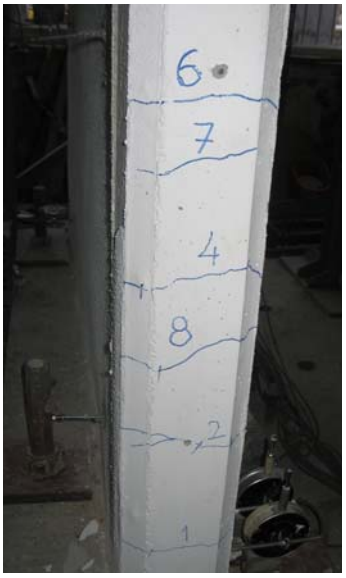
Bir sonraki çevrim olan 5. çevrimde deney sonrası elde edilen yatay yük– yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü üzere numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır. Şekil 4.32'de dolgu duvarlı, çift yüzü sıvalı deney numunesinin yatay yük– ötelenme grafiği verilmiş, çerçevenin elastik davranıştan plastik davranışa geçtiği ötelenme oranı (%0.132) işaretlenmiştir.



Şekil 4.32 : Numune 3 - Yatay yük-ötelenme eğrisi.

5. çevrim boyunca hesaplanan maksimum yükler %0.132 öteleme oranı, tepe yerdeğiştirme δ=0.95 mm'ye gidilirken itme sırasında 42.8 kN, çekmede ise δ=1.55 mm iken 41.3 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim boyunca tekrarlı itme ve çekmeler sonucu mevcut eğilme çatlaklarında ~5'er cm uzamalar kaydedilmiş ve sıva kabarmaları numunenin her iki yüzünde de daha belirgin hale gelmiştir. Bir sonraki 6. çevrimde % 0.184 öteleme oranı, δ= 1.45 mm'ye gidilirken, her iki kolon dış yüzeylerinde eğilme çatlakları oluşmaya devam etmiş, mevcut çatlak boylarında uzama ve çatlak derinliklerinde artmalar gözlenmiştir.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirmesinin δ=2.5 mm (öteleme %0.292) olduğu 7. çevrim (itmede maksimum yük 51.8 kN, çekmede 52.0 kN) ve hedef tepe yerdeğiştirme δ=3.5 mm, öteleme oranı %0.348 olan 8. çevrimlerde (itmede maksimum yük 48.1 kN, çekmede 52.7 kN) genellikle kolon alt bölgelerine yakın eğilme çatlakları (6-7-8 numaralı çatlaklar) oluşmaya devam etmiş, mevcut çatlak boylarında (~5-10cm) uzamalar meydana gelmiştir (Şekil 4.33).



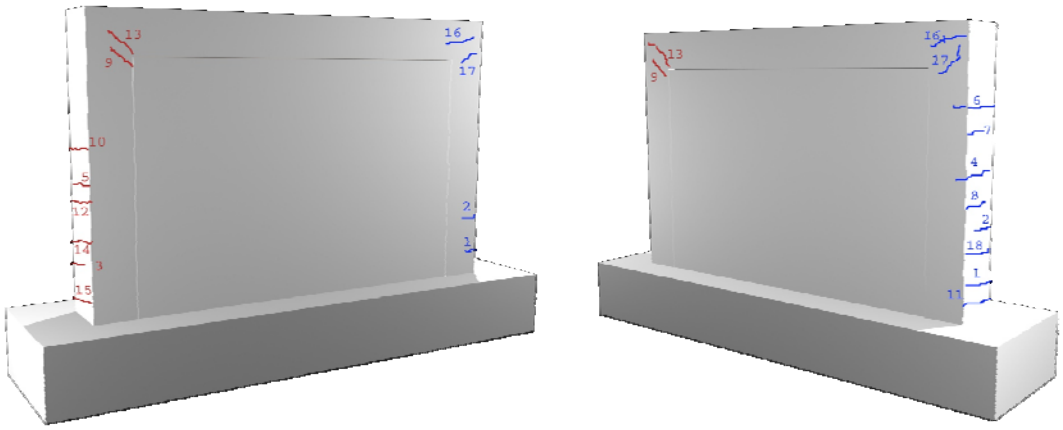
Şekil 4.33 : Numune 3 – Sağ kolon dış yüzeyde gözlenen eğilme çatlakları.

7. ve 8. çevrimler sırasında çatlaklar genellikle kolonların iç ve dış yüzeylerinde gözlenmiş, bununla birlikte dolgu duvar-betonarme çerçeve arası birleşim bölgelerinde çatlaklar çizgi halinde uzamıştır (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 : Numune 3 – Dolgu duvar-betonarme çerçeve birleşim bölgesi çatlakları.

Devam eden 9. ve 10. çevrimlerde her iki kolonda görülen eğilme çatlakları öncelikle kolon alt bölgelerinden, kolon üst bölgelerine doğru artarak yoğunlaşmıştır. Eğilme çatlaklarına ilave olarak sol kolon-kiriş birleşim bölgesi ön yüzünde çekme sırasında 9 ve 13, itme sırasında ise 16 ve 17 numaralı kesme çatlakları gözlenmiştir (Şekil 4.35).



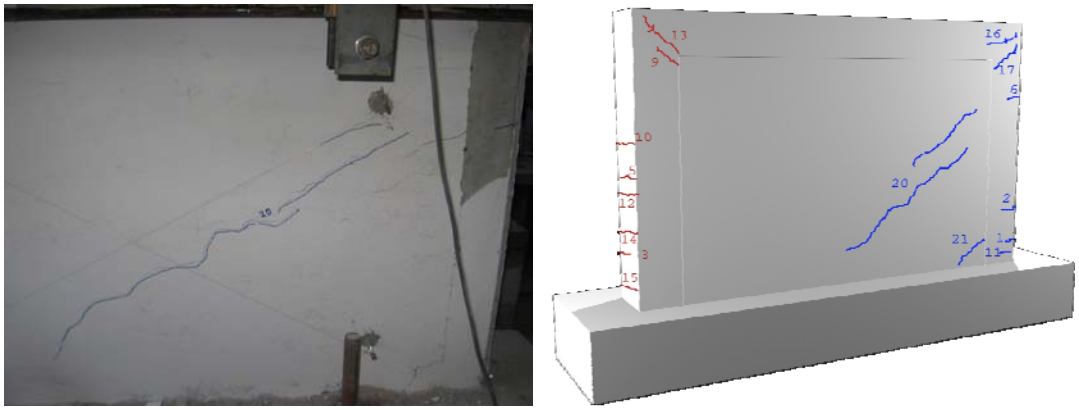
Şekil 4.35 : Numune 3 – 10. çevrim sonrası hasar durumu.

Bununla birlikte sıva çatlaklarında kabarmalar ve sıvada dökülmeler başlamıştır (Şekil 4.36). Duvar sıvasında parçalar halinde kopmalar sebebiyle duvar kesme çatlağı ölçen şekildeğiştirme ölçerler zarar görmüştür. 10. Çevrim sonrası ulaşılan maksimum yatay yük değerleri itme sırasında 49.1 kN, çekmede ise 52.1 kN olarak ölçülmüştür.



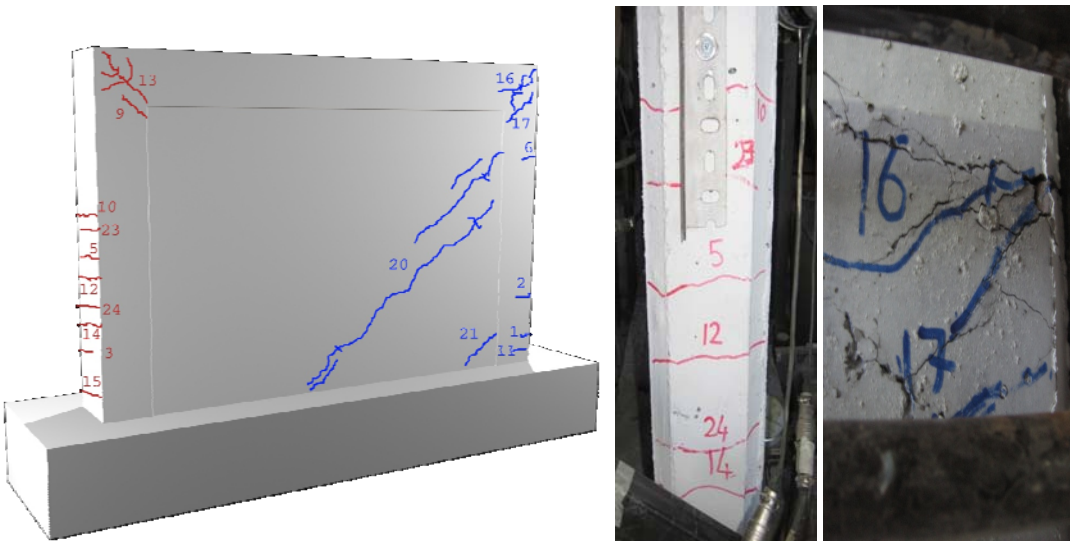
Şekil 4.36 : Numune 3 – Sıvada kabarma ve kopmalar.

Bir sonraki çevrim, %0.719 öteleme oranı δ=6.75 mm hedef tepe yerdeğiştirmesi olan 11. çevrimde (maksimum yükler itmede 54.8 kN, çekmede 49.1 kN) dolgu duvarda yaklaşık ~0.2 mm genişliğinde 20 ve 21 numaralı kesme çatlakları oluşmuş, mevcut çatlaklarda uzamalar ve derinleşmeler devam etmiştir (Şekil 4.37).



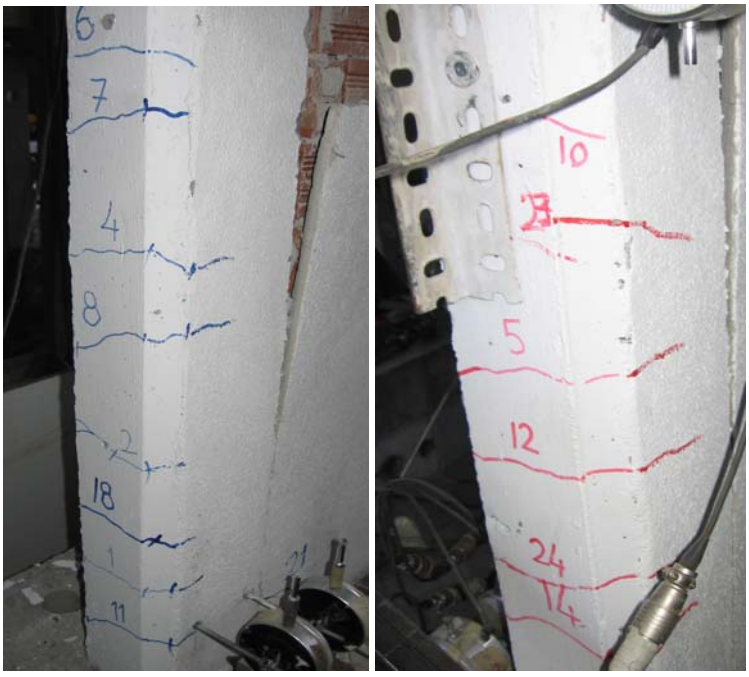
Şekil 4.37 : Numune 3 – Dolgu duvarda oluşan kesme çatlakları ve hasar durumu.

12. çevrim, %0.868 öteleme oranında, maksimum yükler itmede 54.3 kN, çekmede ise 46.9 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde mevcut eğilme çatlaklarının derinlikleri genişlemiş, ek olarak sol kolon orta bölgede 23 ve 24 numaralı eğilme çatlakları oluşmuş, duvardaki 20 numaralı kesme çatlağı temele doğru uzamıştır. Sağ kolon-kiriş birleşim bölgesindeki 16 ve 17 numaralı kesme çatlaklarında çatallanarak uzama (~8 cm) kaydedilmiştir (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 : Numune 3 – 12. çevrim sonrası numune hasar durumu.

Hedef tepe yerdeğiştirme δ=10.0 mm olarak belirlenen (öteleme oranı: %1.078) 13. çevrimde, mevcut eğilme çatlaklarında uzamalar kaydedilmiş (~2-8cm) (Şekil 4.39), duvardaki kesme çatlakları genişlediği için özellikle duvar köşelerinde sıvada büyük parçalar halinde dökülmeler başlamıştır (Şekil 4.40). Tuğla duvar ile betonarme çerçevede ayrışmalar da gözlenmiştir. Bu çevrimde itmede 56.8 kN, çekmede ise 47.8 kN'luk yüke ulaşılmıştır.

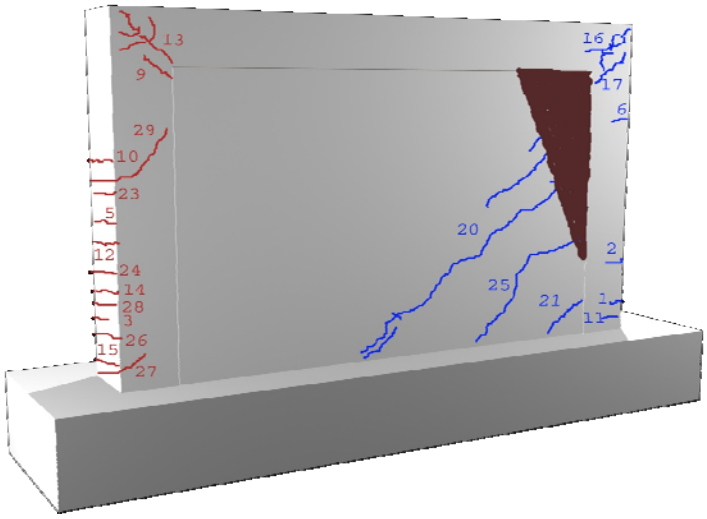


Şekil 4.39 : Numune 3 – Sağ ve sol kolonda görülen eğilme çatlakları.



Şekil 4.40 : Numune 3 – Duvar köşelerinde gözlenen sıva kopmaları.

%1.611 öteleme oranı δ=15.0 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 14. çevrimde, duvardaki kesme çatlaklarında artma ve uzamalar devam etmiştir. Sol kolon alt bölgede 26,27, 28 numaralı eğilme çatlakları ve yine aynı kolon ön yüzünde temelden yüksekliği ~77cm olan 29 numaralı kesme çatlağı oluşmuş (Şekil 4.41), ön yüz duvar köşelerinde sıva düşmeleri büyük parçalar halinde devam etmiştir (Şekil 4.41). Bu çevrimde numunede çatlak sesleri net bir şekilde duyulmuştur.



Şekil 4.41 : Numune 3 – 14. çevrim sonrası numune hasar durumu.

14. çevrimde (öteleme oranı % 1.611) tüm deney boyunca itme ve çekmede ulaşılan en büyük maksimum yük 66.0 kN/55.8 kN değerlerine ulaşılmıştır. Bu çevrimden sonraki çevrimlerde maksimum yükte hızlı düşüşler gerçekleşmiştir.



Şekil 4.42 : Numune 3 – Duvar köşelerinde gözlenen sıva kopmaları.

Öteleme oranı %2.263, tepe yerdeğiştirme δ=21.2 mm olan 15. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 55.9 kN, çekmede ise 51.2 kN'a düşmüştür. Tekrarlı itmeler sonucunda dolgu duvar sağ köşedeki tuğlalarda diyagonal şekilde kopmalar gerçekleşmiştir (Şekil 4.44). Buna ilaveten, sağ kolonda temelden yaklaşık 45 cm yükseklikte 31 numaralı kesme çatlağı (Şekil 4.43), sol kolon ön yüzündeki 29 numaralı çatlak boyunda ve itme sırasında 6 numaralı kesme çatlağında çatallanarak uzamalar kaydedilmiştir.



Şekil 4.43 : Numune 3 – Duvar köşelerinde gözlenen tuğla düşmeleri.

Tekrar eden itme ve çekmeler sırasında yine 15. çevrimde, sağ kolon arka yüz alt bölgede 32 numaralı kesme çatlağı oluşmuş mevcut çatlak boylarında uzamalar gözlenmiştir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44 : Numune 3 – Sağ kolon alt bölgede oluşan kesme çatlağı.

Aynı çevrimin tekrarlı itme ve çekmeleri sırasında bu kez sağ ve sol kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki 13 ve 19 numaralı kesme çatlaklarında kirişe doğru (~20-30cm) paralel olarak uzamalar kaydedilmiştir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45 : Numune 3 –Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde gözlenen kesme çatlakları.

%3.229 öteleme oranı, δ=30.3 mm tepe yerdeğiştirme hedeflenen 16. çevrimde itmede maksimum yük 36.9 kN, çekmede ise 41.7 kN olarak hesaplanmıştır. Duvar köşelerinde, büyük parçalar halinde tuğla düşmeleri devam etmiştir. Dolgu duvarda 45°'lik kesme kırılması açık bir şekilde gözlenebilmektedir (Şekil 4.46). Kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki çatlaklarda çatallanma artmıştır.



Şekil 4.46 : Numune 3-Duvar köşelerinde, tuğla duvarda kesme kırılmaları.

Bu çevrim sırasında tuğlaların düşmesi sonucu numunedeki yerdeğiştirme ölçerler büyük oranda zarar görmüştür. Sağ kolon arka yüz alt bölgedeki 32 numaralı kesme çatlağı temele doğru derinleşerek uzamıştır. Her iki kolon ön ve arka yüz alt bölgede kesme kırılmaları açık bir şekilde görülmektedir.

Maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 43.4 mm olarak ölçüldüğü, çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği 17. çevrimde maksimum yükler itmede 31.0 kN, çekmede ise 30.0 kN olarak ölçülmüştür. Sol kolon dış yüz 27 numaralı kesme çatlağı derinliği artmış (~1.5 mm) kolon ön yüzünde temele kadar uzamıştır. 32 numaralı kesme çatlağındaki genişleme sonucu kolon alt bölgesinde beton kopmaları başlamıştır (Şekil 4.47).



Şekil 4.47 : Numune 3 - Kolon alt bölgelerinde kesme kırılmaları.

Aynı çevrim boyunca sağ ve sol kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki 13 ve 19 numaralı kirişe paralel devam eden çatlakların çatlak uzunluğu ~75-80 cm'e çıkmıştır (Şekil 4.48).



Şekil 4.48 : Numune 3-Kirişe paralel çatlakların görünümü.

Çerçevenin göçme konumuna ulaşmasından sonraki deneyin son çevrimi olan 18. çevrimde hedeflenen δ=61.5 mm'ye ulaşıldığında ölçülen maksimum yükler itmede 25.3 kN, çekmede ise 24.6 kN olup, deneye son verilmiştir. Bu çevrimde tuğla duvar ile betonarme çerçeve tamamen ayrışmıştır. Şekil 4.49'da deney sonrası numunenin son durumu görülmektedir.



Şekil 4.49 : Deneyler sonrası numune 3 hasar durumu.

Tekrarlı yükler altında devam eden çevrimde betonda paspayı dökülmeleri sonrası kolon alt bölgelerinde donatı burkulmaları ve kolon üst bölgedeki kesme kırılmaları açık bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.50,4.51).

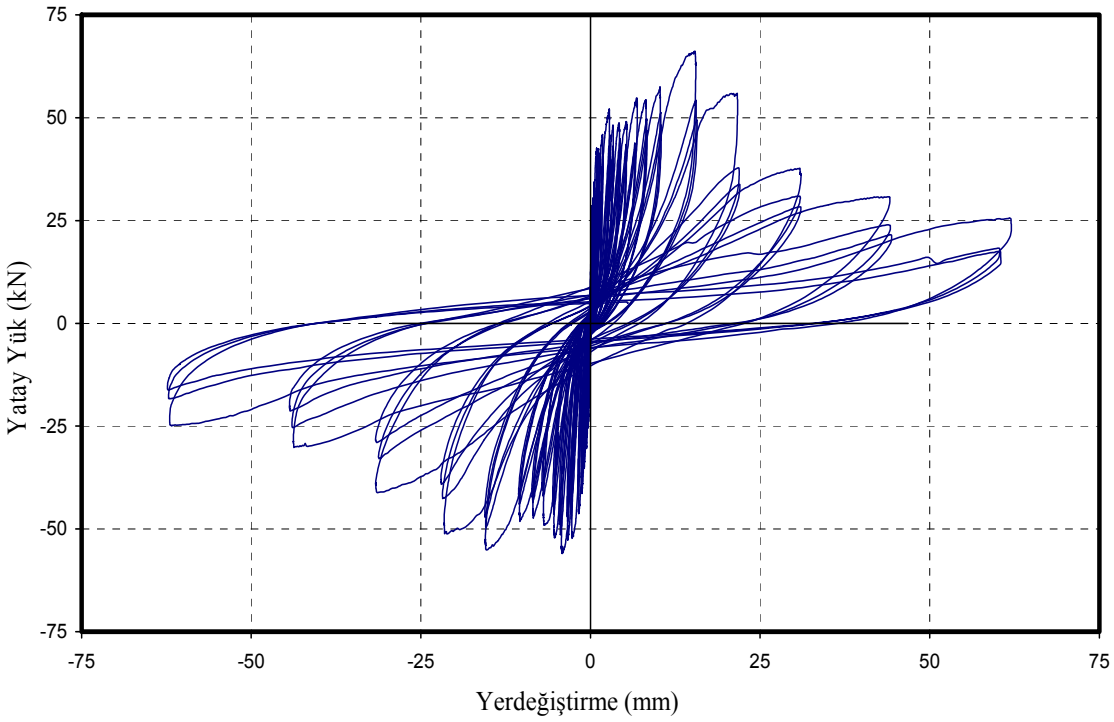


Şekil 4.50 : Numune 3 – Kolon alt bölgesinde donatı burkulmaları.



Şekil 4.51 : Numune 3-Kolon üst bölgede kesme kırılması.

Dolgu duvarlı ve çift yüzü sıvalı deney çerçevesinin göçme şekli de, bir önceki dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı deney çerçevesi gibi kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup kesme kırılması ve basınç etkisiyle göçme konumuna gelmeleri sonucu gerçekleşmiştir. İlk olarak kolonlarda başlayan eğilme çatlaklarını, dolgu duvarlarda oluşan diyagonal kesme çatlakları izlemiş, kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları ve numunenin maksimum yüklere ulaştığı yerdeğiştirme sonrasında gözlenen kolon alt bölgelerinde oluşan kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçmüştür. Dolgu duvarlı ve çift yüzü sıvalı çerçeve numunesinin davranışının yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.52'de verilmiştir.



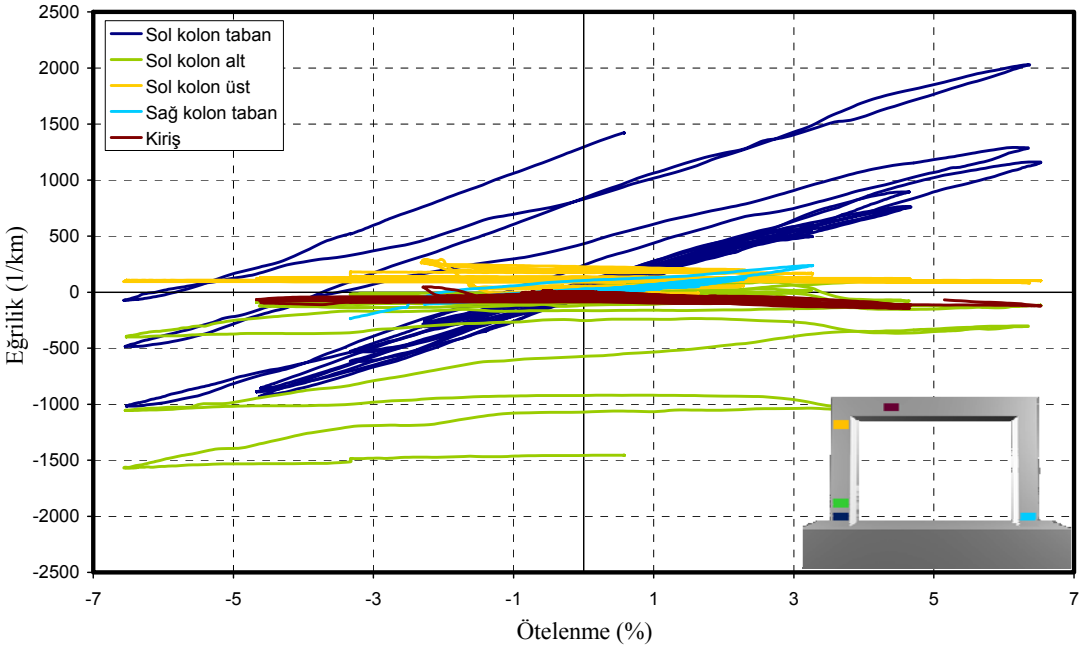
Şekil 4.52 : Numune 3 yatay yük – yerdeğiştirme grafiği.

Numune 3'e uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.3'de görülmektedir.

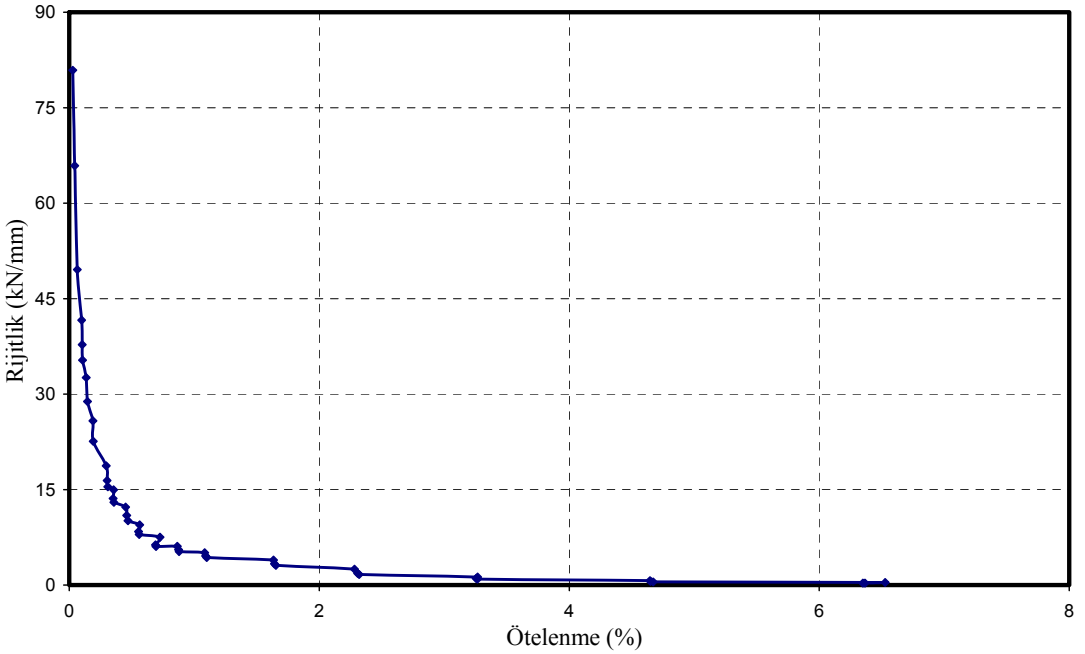
Çizelge 4.3 : Numune 3 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

Numune 3		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	0.024	0.18	23.9	0.28	-24.0
2	0.041	0.21	30.4	0.57	-25.3
3	0.062	0.37	34.4	0.81	-30.5
4	0.095	0.68	42.5	1.12	-35.2
5	0.132	0.95	42.8	1.55	-41.3
6	0.184	1.45	45.9	2.05	-46.2
7	0.292	2.47	51.8	3.03	-52.0
8	0.348	3.01	48.1	3.61	-52.7
9	0.443	3.91	48.2	4.51	-55.0
10	0.554	4.96	49.1	5.56	-52.1
11	0.719	6.53	54.8	7.13	-49.1
12	0.868	7.95	54.3	8.55	-46.9
13	1.078	9.94	56.8	10.54	-47.8
14	1.611	15.0	66.0	15.6	-55.8
15	2.263	21. 2	55.9	21.8	-51.2
16	3.229	30.3	36.9	30.3	-41.7
17	4.6	43.4	31.0	44.0	-30.0
18	6.5	61.45	25.3	62.05	-24.6

Şekil 4.53 ve 4.54'de eğrilik-ötelenme eğrisi ve yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanan rijitlik-ötelenme eğrisi verilmiştir.



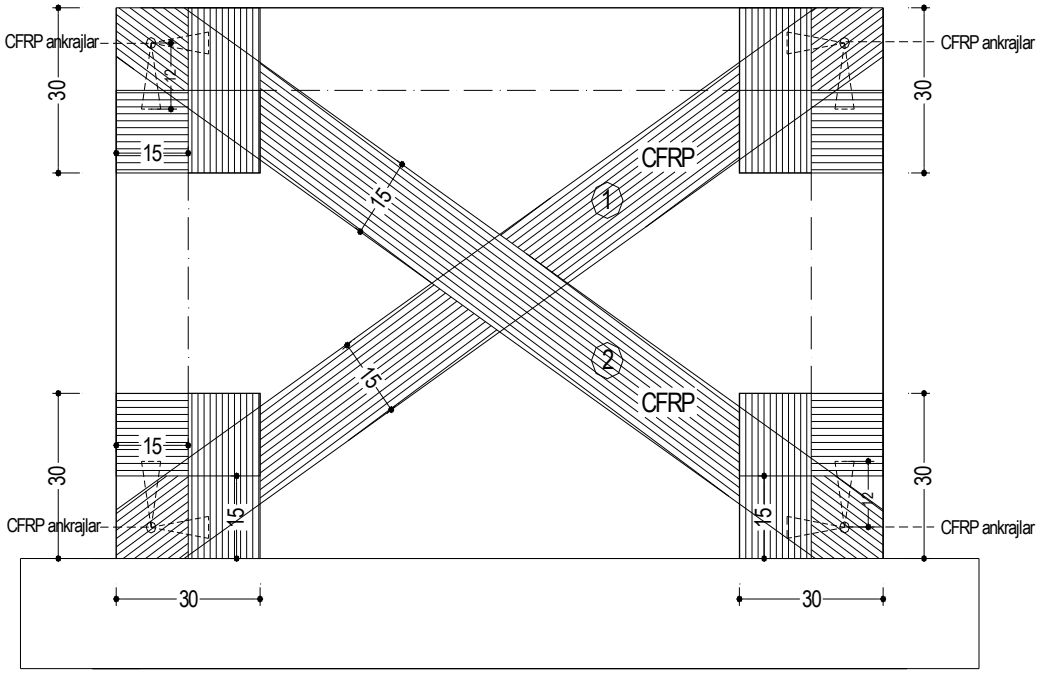
Şekil 4.53 : Numune 3 - Eğrilik-ötelenme eğrisi.



Şekil 4.54 : Numune 3 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.4 Numune 4 – Dolgu Duvarlı / Tek yüzü Sıvalı / Tek yüzü CFRP ile Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi

Çalışmanın dördüncü deneyi dolgu duvarlı, tek yüzü sıvalı, tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçevede gerçekleştirilmiştir. CFRP ile güçlendirme işleminin uygulandığı ilk deney numunesi olan bu deneyde karbon elyaf malzeme ile dolgu duvara tek kat çapraz bant, kolon-kiriş birleşim bölgesi ve kolon alt bölgelerinde ise biri düşey biri yatay olmak üzere iki adet, 30x15 cm boyutlarında karbon elyaf bant yapıştırılması şeklinde güçlendirme işlemi uygulanmıştır. CFRP ile güçlendirme şekli detay çizimleri Şekil 4.55'de gösterilmiştir.



Şekil 4.55 : Numune 4 - Karbon elyaf uygulama detay çizimleri.

Bu deney numunesinde CFRP uygulaması duvarın tek yüzünde ve mevcut bitişik nizam binalarda çift taraflı uygulamanın ve ankrajlamanın yapılamayacağı göz önüne alınarak, çift taraflı ankraj olmadan, sadece betonarme elemanda delik açılıp epoksi ile CFRP malzemenin betonarme eleman içine ankrajlanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ankraj yerleri kolon-kiriş birleşim bölgeleri ve kolon alt bölgesinde olmak üzere 4 noktadan yapılmıştır.

Deneysel çalışmada CFRP güçlendirme malzemesi olarak Zoltek firmasının ürettiği Panex35 türü karbon elyaf malzeme kullanılmıştır. Karbon elyaf malzemenin deney elemanlarına yapıştırılması ise Duratek firmasının ürettiği Av23 Epoksi reçinesi ile gerçekleştirilmiştir.

CFRP uygulamasına geçilmeden önce, ilk olarak karbon lifin uygulanacağı yerler belirlenmiştir (Şekil 4.56). Karbon elyaf malzeme rulodan gerekli boyda kesilerek hazır duruma getirilmiştir. Numunede uygulanacak ankraj yerleri de belirlendikten sonra matkap ile delinmiştir. Tüm ankraj delikleri açıldıktan sonra delik çevresindeki ve CFRP malzemenin uygulanacağı keskin bölgeler tamir harcı ile pahlanarak CFRP malzemenin keskin bölgelerden kopması önlenmek istenmiştir. Daha sonra elektrikli kompresör yardımıyla delikler temizlenerek her türlü toz, kum, vs.'den arındırılmıştır. (Şekil 4.57).



Şekil 4.56 : Numune 4 – Karbon elyaf uygulanacak bölgelerin belirlenmesi.



Şekil 4.57 : Numune 4 – Ankraj deliklerinin açılması ve temizliği.

Karbon lif uygulamasına geçilmeden önce epoksi bazlı reçine Duratek Av23 hazırlanmıştır. AV 23, iki bileşenli epoksi bazlı bir laminasyon reçinesidir. Malzeme A ve B olmak üzere iki bileşen olarak iki ayrı bileşen şeklinde gelmektedir. B bileşeni belirli oranlarda A bileşenine eklenerek temiz bir kapta mikser ile homojen bir karışım olacak şekilde karıştırılmıştır. Malzeme özelliği gereği karıştırma süresinin 2-5 dakikayı aşmamasına dikkat edilmiştir. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra sıra açılan deliklere ankrajların uygulanmasına gelmiştir. Ankraj boyları yaklaşık 25 cm olup enleri ise ikiye bölünerek 15cm olarak kullanılmıştır. Ankraj deliklerine ankrajlar uygulanmadan önce silikon tabancasıyla bol miktarda epoksi enjekte edilmiştir. Daha sonra karbon lif ankrajları bir mil yardımıyla deliklere yerleştirilmiştir. Duvar ankrajları deliklere geçirildikten sonra duvarın ön yüzeyinde yatay ve düşey şeritler halinde CFRP dağıtılarak epoksi ile yüzeye yapıştırılmıştır (Şekil 4.58).



Şekil 4.58 : Numune 4 – Karbon elyaf ankrajlar.

Ankraj deliklerine CFRP ankrajların yerleştirilmesinin ardından duvar ön yüzüne diyagonal olarak yapıştırılacak CFRP bantların uygulamasına geçilmiştir. Uygulanacak yüzey fırça yardımıyla temizlenmiş ve yüzey hazırlığı yapılmış olan duvara Av32, çizgi ile belirlenen bölgelere fırça yardımıyla sürülmüştür. Her sürülen bölgenin ardından daha önce kesilip hazır halde bekleyen karbon lifler yerine yerleştirilmiştir. Karbon lifi epoksi üzerine yerleştirdikten sonra plastik uçlu bir rulo yardımıyla karbon lif epoksili yüzeye gergin bir şekilde yapıştırılmıştır (Şekil 4.59). Dolgu duvarda tek kat olarak kullanılan çapraz karbon liflerin genişliği 15cm'dir.



Şekil 4.59 : Numune 4 – Diyagonal CFRP bantların yapıştırılması.

Deney anlatımı sırasında kolaylık olması amacıyla çapraz CFRP bantlara numara verilmiştir. Kolon-kiriş birleşim bölgesi ve kolon alt bölgelerinde çapraz bantlara ilave olarak 15x30cm ebatlarında iki katman karbon lif, biri düşey biri yatay olacak şekilde uygulanarak güçlendirme işlemi tamamlanmıştır. Güçlendirilen numune deneyi öncesinde CFRP malzemenin betonarme çerçeve ile aderansının tam olarak sağlanabilmesi için 7 gün süre ile beklenmiş ve deneye başlanmıştır.

Bu numuneye, ilk 4 çevrim yük kontrollü sonraki çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olmak üzere 18 çevrim uygulanmıştır. Deneyin ilk dört çevriminde uygulanacak yatay yükler sırasıyla 20, 30, 35, 40 kN olarak belirlenmiştir. 5. çevrimde hedeflenen yerdeğiştirmeye ulaşılmış ve deneye yerdeğiştirme kontrollü devam edilmiştir.

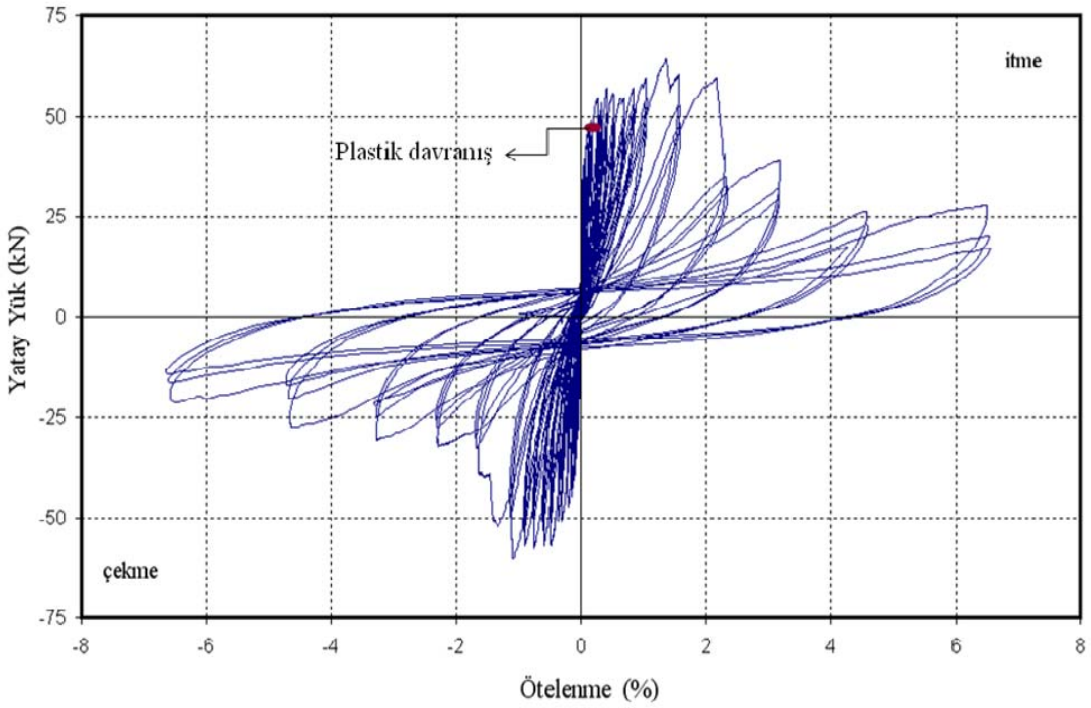
Bu çevrimler sonucunda numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 14. çevrimde, 1.611 öteleme oranında, tepe yerdeğiştirme δ=15.0 mm'ye gidilirken 64.4 kN, çekmede ise 13. çevrimde, (%1.078 öteleme oranı) tepe yerdeğiştirme δ=10.5 mm'ye gidilirken 60.0 kN olarak okunmuştur.

İlk 4 çevrim boyunca numunede, betonarme çerçeve ile dolgu duvar arasında sıva çatlakları dışında hiçbir çatlak oluşmamıştır. Gözlenen ilk çatlaklar 5. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 47.2 kN, çekmede ise 44.1 kN, öteleme oranı % 0.132 iken, sağ kolon ön yüzde yatay CFRP bantın üstünde 1 numaralı eğilme çatlağı ve tuğla duvar ön yüz sıvalı bölgede 2 ve 3 numaralı kesme çatlakları olarak gözlenmiştir (Şekil 4.60). Bununla birlikte betonarme çerçeve ile dolgu duvar birleşim bölgesinde ön yüzde duvar-çerçeve arası çizgi şeklinde açılma gözlenmiştir.



Şekil 4.60 : Numune 4 – 5. Çevrim sırasında gözlenen ilk çatlaklar.

Ayrıca 5. çevrimde deney sonrası elde edilen yatay yük–yerdeğiştirme eğrisinden anlaşıldığı üzere numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır (Şekil 4.61).



Şekil 4.61 : Numune 4 - Yatay yük-ötelenme eğrisi.

6. çevrim boyunca hesaplanan maksimum yükler %0.184 öteleme oranı, tepe yerdeğiştirme δ=1.6 mm'ye gidilirken itme sırasında 48.8 kN, çekmede ise δ=1.55 mm iken 45.2 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim boyunca duvar ön yüzde çekme

sırasında 4 ve 8 numaralı kesme çatlağı ve sol kolon dış yüzeyde 5-6-7 numaralı eğilme çatlakları oluşmuştur (Şekil 4.62).



Şekil 4.62 : Numune 4 – 6. çevrim sırasında oluşan çatlaklar.

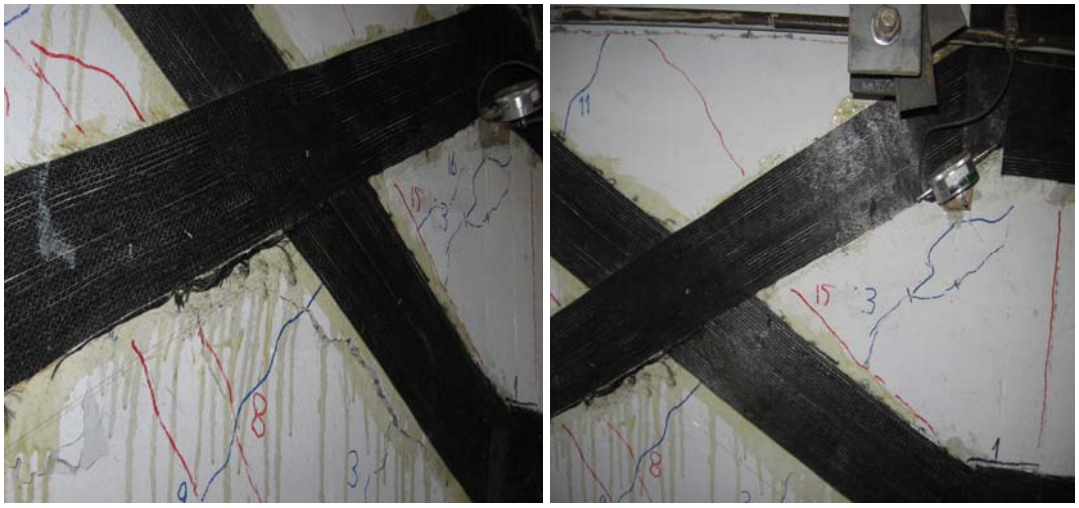
Bir sonraki 7. çevrimde % 0.292 öteleme oranı, δ= 2.6 mm'ye gidilirken, duvarda kesme çatlakları artmış, mevcut çatlak boylarında uzama ve çatlak derinliklerinde artma ve çatallanmalar gözlenmiştir. Duvar ön yüz sol kolon-kiriş birleşim bölgesindeki sıvada ve CFRP bantta kabarma olmuştur (Şekil 4.63).



Şekil 4.63 : Numune 4 – Sıvada ve CFRP bantta kabarmalar.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=3.15 mm (öteleme %0.348) olduğu 8. çevrim (itmede maksimum yük 53.0 kN, çekmede 51.0 kN) ve hedef tepe yerdeğiştirme δ=3.9 mm, öteleme oranı %0.443 olan 9. çevrimlerde (itmede maksimum yük 56.8 kN, çekmede 57.0 kN) genellikle kolon alt-orta bölgelere yakın eğilme çatlakları (12-13-14 numaralı çatlaklar) oluşmaya devam etmiş, duvardaki kesme çatlaklarında

çatallanmalar giderek artmıştır (Şekil 4.64). Sol üst kolon-kiriş birleşim bölgesindeki CFRP bant sıvayla birlikte duvardan büyük ölçüde ayrılmıştır.



Şekil 4.64 : Numune 4 – Dolgu duvarda oluşan kesme çatlakları.

10. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 55.6 kN, çekmede ise 56.6 kN, öteleme oranı % 0.554 iken, arka yüzde sıvasız dolgu duvarda, tuğlalarda dökülmeler gözlenmiştir (Şekil 4.65). Duvar ön yüzünde CFRP çapraz bantların kesişim noktasında sıva ile birlikte ayrışma meydana gelmiştir.



Şekil 4.65 : Numune 4 – Tuğla duvarda kopmalar.

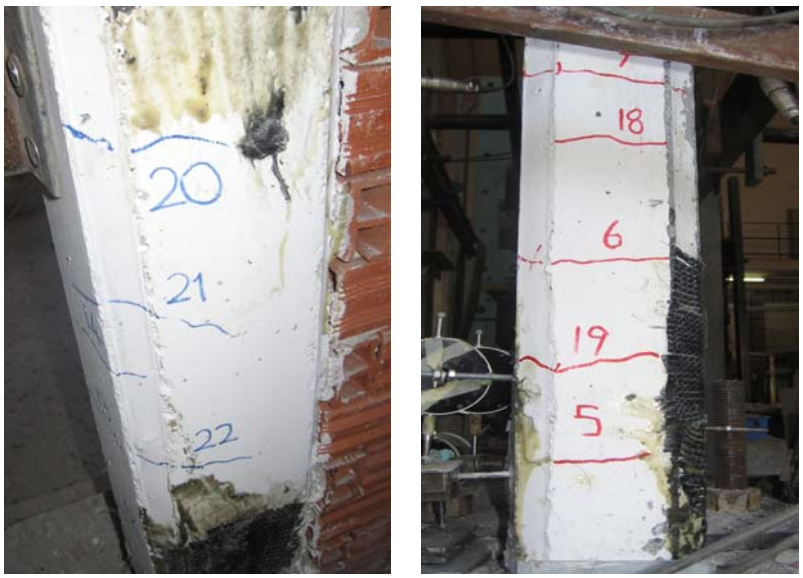
Bir sonraki çevrim, %0.719 öteleme oranı δ=6.55 mm hedef tepe yerdeğiştirmesi olan 11. çevrimde (maksimum yükler itmede 54.5 kN, çekmede 57.5 kN), sol kolon dış yüzeyde çekme sırasında eğilme çatlakları oluşmuş, duvardaki kesme çatlakları

duvar boyunca genişlemiştir. Ayrıca duvar ön yüzündeki sıvada duvardan büyük parçalar halinde kopmalar gerçekleşmiştir (Şekil 4.66).



Şekil 4.66 : Numune 4 – 11. çevrim sonrası sıva kopmaları.

12. çevrim, %0.868 öteleme oranında, maksimum yükler itmede 56.5 kN, çekmede ise 57.1 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde itme sırasında sağ kolon dış arka yüzünde 21,22,23 numaralı eğilme çatlakları oluşmuş, mevcut eğilme çatlaklarının boyları ve derinlikleri artmıştır (Şekil 4.67).



Şekil 4.67 : Numune 4 – 12. çevrim sonrası kolonda eğilme çatlakları.

12. çevrim sırasında 1 numaralı çapraz CFRP bant, sıvanın büyük oranda duvardan ayrılmasıyla birlikte etkisini büyük ölçüde kaybetmiştir. Duvar ön yüzünde büyük parçalar halinde sıva kabarmaları olmuştur (Şekil 4.68).



Şekil 4.68 : Numune 4 – 12. çevrim sonrası duvar sıvasında kabarmalar.

Hedef tepe yerdeğiştirme δ=10.0 mm olarak belirlenen (öteleme oranı: %1.078) 13. çevrimde çapraz CFRP bantlar sıvayla birlikte duvardan kopma durumunda olduğu için kesişme noktaları dışında etkinliğini büyük ölçüde yitirmiştir (Şekil 4.69). Bu çevrimde itmede 59.5 kN, çekmede ise tüm deney boyunca maksimum yük olan 60.0 kN'luk yüke ulaşılmıştır.



Şekil 4.69 : Numune 4 – 13. çevrim sonrası CFRP bantların durumu.

%1.611 öteleme oranı δ=15.0 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 14. çevrimde, itmede maksimum yük 64.4 kN, çekmede ise 52.3 kN olarak kaydedilmiştir. Bu çevrimde de itme sırasında deney boyunca en büyük yatay yük değerine ulaşılmıştır. Çekme sırasında 1 numaralı CFRP bant sağ üst köşe birleşim bölgesinden ankraj noktasından kopmuş, duvardan sıva ile birlikte ayrılmıştır (Şekil 4.70). Bu çevrimden sonraki çevrimlerde maksimum yükte hızlı düşüşler gerçekleşmiştir.



Şekil 4.70 : Numune 4 – 14. çevrim sonrası CFRP bantların durumu.

Aynı çevrimin tekrarlı itme ve çekmeleri sırasında sağ alt köşedeki yatay ilave CFRP bant duvardan ayrışmış (Şekil 4.71), kolonlardaki mevcut eğilme çatlak boylarında uzamalar gözlenmiştir.



Şekil 4.71 : Numune 4 – 14. çevrim sırasında CFRP yatay bantta ayrışma.

Öteleme oranı %2.263, tepe yerdeğiştirme δ=21.2 mm olan 15. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 60.0 kN, çekmede ise 32.1 kN'a düşmüştür. Bu çevrimde 2 numaralı CFRP bant sağ alt köşeden, kolon alt bölgeye yakın bölgeden kopmuş (Şekil 4.72), sıvasız duvar arka yüzünde, tuğlada oluşan kesme çatlakları çok belirgin hale gelmiştir.



Şekil 4.72 : Numune 4 – 15. çevrim sırasında CFRP bantın koptuğu an.

%3.229 öteleme oranı, δ=30.3 mm tepe yerdeğiştirme hedeflenen 16. çevrimde itmede maksimum yük 39.0 kN, çekmede ise 31.0 kN olarak hesaplanmıştır. Duvar iki yüzünde de, parçalar halinde tuğlalarda dökülmeler başlamıştır (Şekil 4.73). Dolgu duvarda 45°'lik kesme kırılması çok açık bir şekilde gözlenebilmektedir.



Şekil 4.73 : Numune 4 – 16. çevrim sırasında tuğlalarda dökülmeler.

Tekrar eden itme ve çekmeler sırasında yine 16. çevrimde, sağ kolon dış taraftan arka yüze doğru 26,27 numaralı kesme çatlakları ve sol kolon arka yüzünde 28 numaralı kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 4.74). Kolonlardaki beton paspaylarının dökülmesi sonucu donatı burkulmaları gözlenebilmektedir.



Şekil 4.74 : Numune 4 – 16. çevrim sırasında kolonlardaki kesme çatlakları.

Maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 43.4 mm olarak ölçüldüğü, çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği 17. çevrimde maksimum yükler itmede 34.5 kN, çekmede ise 27.5 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrim boyunca her iki kolonun alt bölgelerinde bir önceki çevrimde oluşan 26-27-28 numaralı kesme çatlakları uzamış (Şekil 4.75), donatı burkulmaları daha net görülebilir hale gelmiş, tuğlalarda büyük parçalar halinde dökülmeler devam etmiştir (Şekil 4.75).



Şekil 4.75 : Numune 4 – 17. çevrim sırasında kolonlardaki kesme çatlakları



Şekil 4.76 : Numune 4 – 17. çevrim sırasında tuğlalarda dökülmeler.

Çerçevenin göçme konumuna ulaştığı deneyin son çevrimi olan 18. çevrimde hedeflenen δ=61.5 mm'ye ulaşıldığında ölçülen maksimum yükler itmede 27.7 kN, çekmede ise 21.0 kN olup, deneye son verilmiştir. Bu çevrimde her iki kolon alt bölgelerindeki 26,27,28 numaralı kesme çatlakları çerçevenin göçme konumuna gelmesinde etkili olmuştur (Şekil 4.77).



Şekil 4.77 : Numune 4 – 18. çevrim sonrası kolonlardaki kesme çatlakları.

Şekil 4.78,4.79, ve 4.80'de deney sonrası numunenin son durumu görülmektedir.



Şekil 4.78 : Numune 4 – Deney sonrası çerçevenin görünümü.



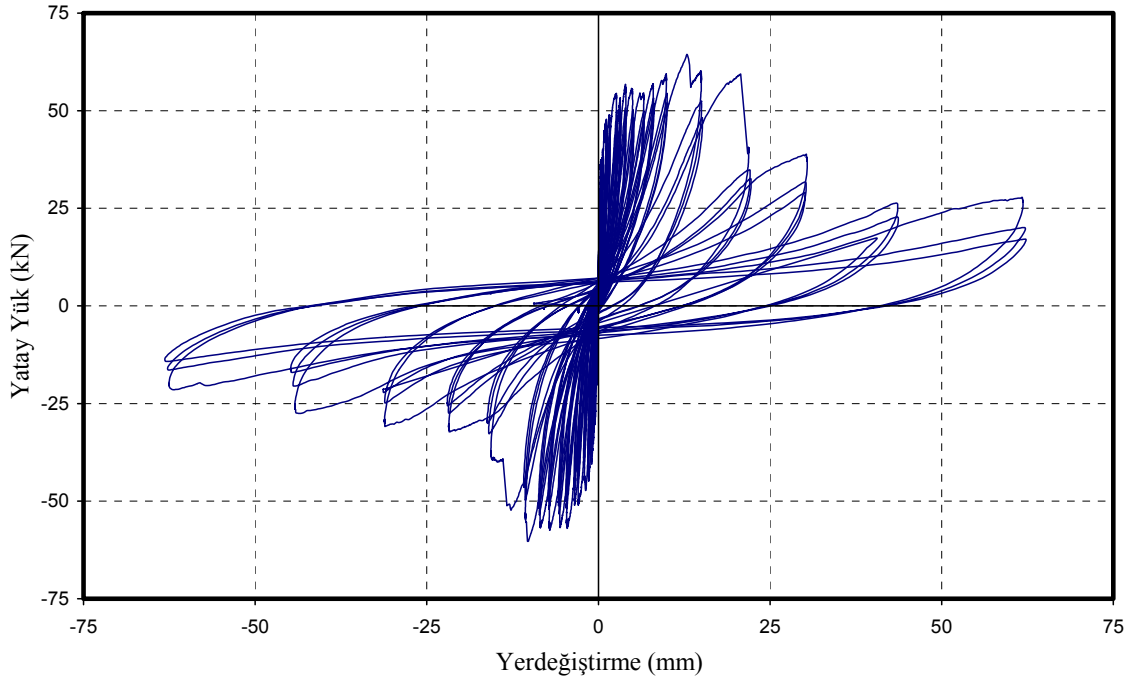
Şekil 4.79 : Numune 4 – Deney sonrası kolon alt bölgelerinin görünümü.



Şekil 4.80 : Numune 4 – Deney sonrası CFRP çapraz bantların görünümü.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı ve tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş deney çerçevesinin göçme konumu, kolonlarda eğilme çatlakları ve duvardaki kesme çatlakları ile başlamış, kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup, kesme kırılması ve basınç etkisiyle göçme konumuna gelmeleri sonucu gerçekleşmiştir. İlk olarak kolonlarda başlayan eğilme çatlaklarını, dolgu duvarlarda oluşan diyagonal kesme çatlakları izlemiş, çapraz CFRP bantlardan 1 numaralı CFRP bantın ankraj noktasından, 2 numaralı bantın ise sağ alt köşeden kopması ile birlikte maksimum yüklerde hızlı bir düşüş gerçekleşmiş, sonraki çevrimlerde oluşan kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları ve numunenin maksimum yüklere ulaştığı yerdeğiştirme sonrasında gözlenen kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçmüştür.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı ve tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve numunesinin davranışının yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.81'de verilmiştir.



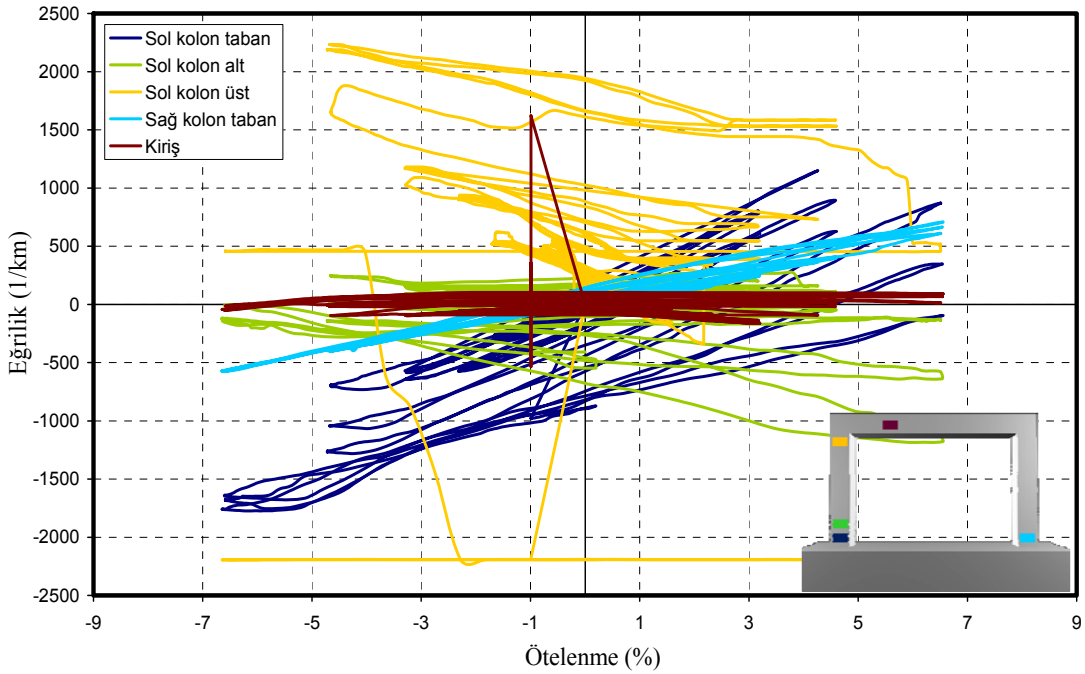
Şekil 4.81 : Numune 4 - Yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi.

Numune 4'e uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.4'de görülmektedir.

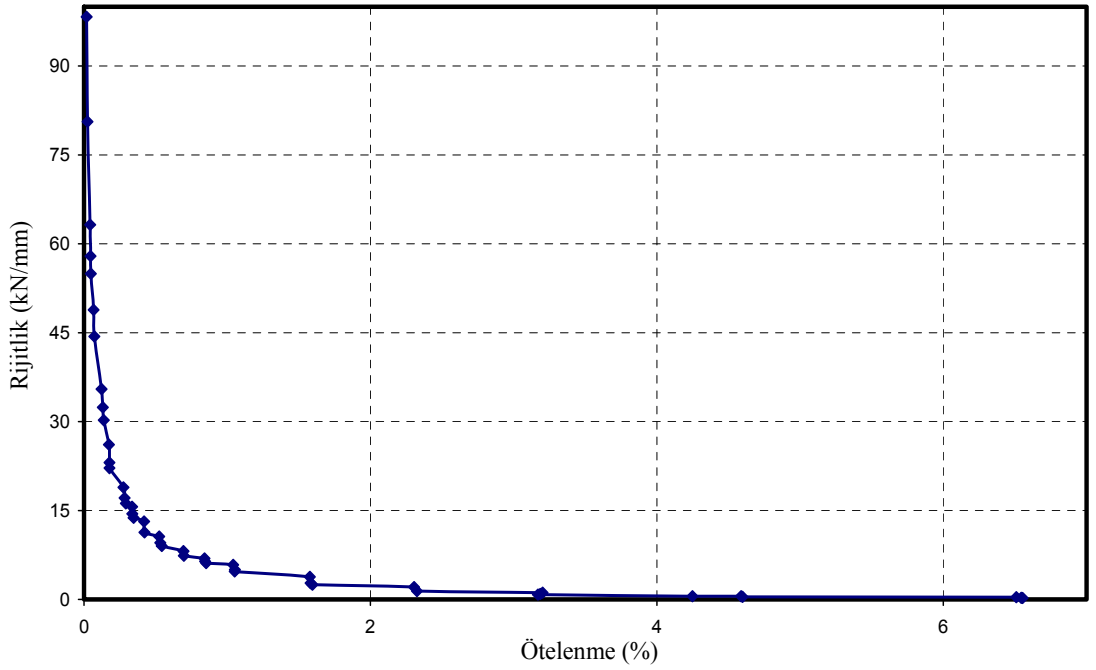
Çizelge 4.4 : Numune 4 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

Numune 4		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	Yük kontrollü	0.20	21.0	0.25	-20.0
2	Yük kontrollü	0.41	30.0	0.47	-30.0
3	Yük kontrollü	0.70	36.0	0.74	-35.0
4	Yük kontrollü	0.98	40.0	0.98	--40.0
5	0.132	1.1	47.2	1.4	-44.1
6	0.184	1.6	48.8	1.9	-45.2
7	0.292	2.62	54.4	2.92	-51.0
8	0.348	3.16	53.0	3.46	-51.0
9	0.443	3.91	56.8	4.51	-57.0
10	0.554	4.96	55.6	5.56	-56.6
11	0.719	6.53	54.5	7.13	-57.5
12	0.868	7.95	56.5	8.55	-57.1
13	1.078	9.94	59.5	10.54	-60.0
14	1.611	15.0	64.4	15.6	-52.3
15	2.263	21. 2	60.0	21.8	-32.1
16	3.229	30.3	38.8	30.9	-31.0
17	4.6	43.4	34.5	44.0	-27.5
18	6.5	61.45	27.7	62.05	-21.0

Şekil 4.82 ve 4.83'de eğrilik-ötelenme grafiği ve yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanan rijitlik-ötelenme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.82 : Numune 4 - Eğrilik-ötelenme eğrisi.



Şekil 4.83 : Numune 4 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.5 Numune 5 – Dolgu Duvarlı / Çift yüzü Sıvalı / Tek yüzü CFRP ile Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi

Çalışmanın beşinci deneyi dolgu duvarlı, çift yüzü sıvalı, tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve deneyidir. Bu deney numunesinde, CFRP diyagonal bantlar yapıştırılarak güçlendirme, her iki yüz sıvalı çerçevede duvarın tek yüzünde, binanın sadece dışından güçlendirme yapılacağı düşünülerek, çift taraflı ankraj olmadan, sadece betonarme eleman ve duvarda delikler açılarak epoksi ile CFRP malzemenin betonarme elemana ankrajlanması şeklinde uygulama yapılmıştır.

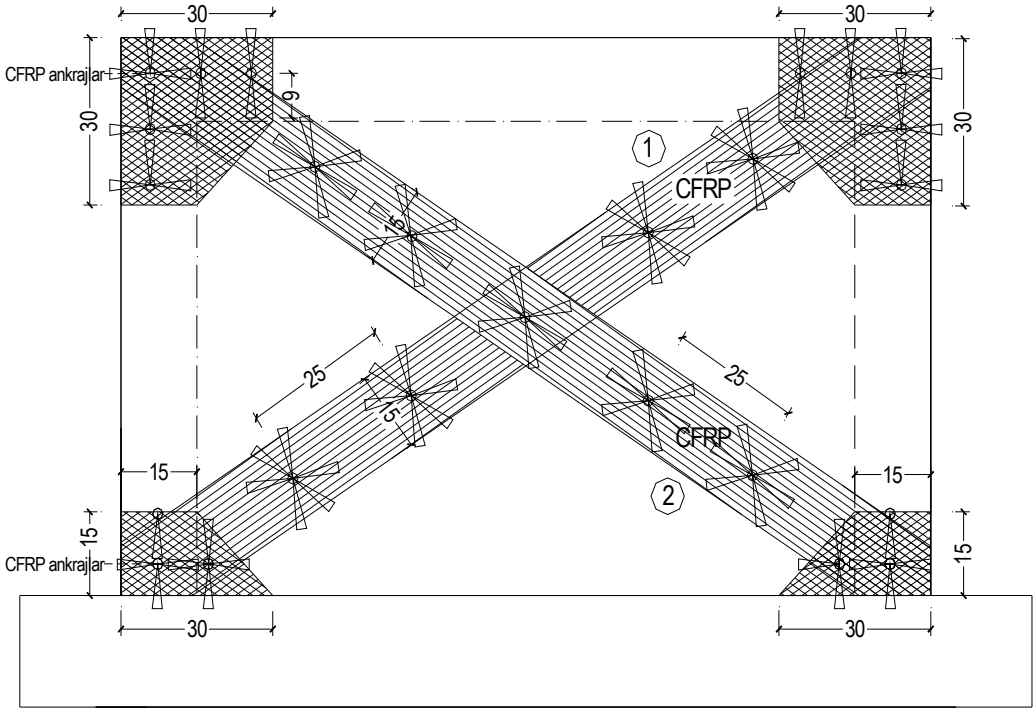
CFRP ile güçlendirme işleminin uygulandığı 4. deney numunesinde CFRP bant, duvara ankrajlandığı kolon-kiriş birleşim bölgesi noktasından kopmuş ve 1 numaralı CFRP malzeme etkisini tamamen kaybetmiştir. Bununla birlikte devam eden çevrimde duvar üzerinde tek kat olarak uygulanan CFRP bantların çekme dayanımları yetersiz kalmış, istenilen yük dayanımına ulaşılmadan CFRP bantlar kopmuş ve etkilerini kaybetmişlerdir. Ayrıca kolon mafsal bölgelerinde uygulanan ilave yatay ve düşey bantların duvara aderansı ve ankraj sayısı yeterli olmadığından, deney sırasındaki tekrarlı itme ve çekmeler sonucu bantlar ile duvar arasında ayrışmalar gözlenmiştir. Tüm bunların sonucunda ise beklenen güçlendirme performansına ulaşılamamıştır.

Dördüncü deney sonrası elde edilen bu veriler sonucunda, numunenin CFRP ile güçlendirmesi için farklı yöntem geliştirilmesi gerekmiştir. Bir önceki deneye göre CFRP çapraz bant yapıştırma işlemi iki kat olacak şekilde uygulanmasına karar verilmiş, ankraj deliklerinin sayısı artırılmış, kolon-kiriş birleşim bölgeleri ve kolon alt bölgelerdeki ilave CFRP uygulamasında farklı model geliştirilmiştir.

CFRP diyagonal bantlar, bir önceki deneydeki gibi 15 cm genişliğinde, fakat bu kez iki kat olacak şekilde çapraz şekilde uygulanmıştır. CFRP malzemenin tuğla duvarla aderansının gerektiği gibi yeterli şekilde sağlanabilmesi için duvarda da ankraj delikleri açılmıştır. Göçme mekanizmasının kolon-kiriş birleşim bölgelerinden ve kolon alt bölgesinden kesme göçmesi şeklinde olmaması için bu bölgelerde ilave iki kat daha CFRP bant ile güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlave iki kat olarak çerçeve köşelerinde uygulanan CFRP malzemelerin lif yönleri çerçeveyle 45°'lik açı yapacak şekilde ve her katmanın lif yönleri birbirine dik olacak şekilde

uygulanmıştır. Bir önceki deney elemanının güçlendirmesinden farklı olarak tüm ankrajlar, köşe bölgelerdeki ek CFRP bantlar ve CFRP çapraz bantların yapıştırılmasından sonra bu elemanların üzerine gelecek şekilde duvara yapıştırılmıştır. CFRP bantlar tuğla duvara 9, betonarme elemanlara da 16 noktadan ankrajlanmıştır.

Numunenin CFRP ile güçlendirme şekli detay çizimleri ve ankraj noktaları Şekil 4.84'de gösterilmiştir.



Şekil 4.84 : Numune 5 - Karbon elyaf uygulama detay çizimleri.

Deneysel çalışmada CFRP güçlendirme malzemesi ve epoksi yapıştırıcı malzemesi olarak bir önceki deneyde kullanılan malzemeler kullanılmıştır.

CFRP uygulamasına geçilmeden önce, karbon lifin uygulanacağı yerler belirlenmiştir (Şekil 4.85). Karbon elyaf malzeme rulodan gerekli boyda kesilerek hazır duruma getirilmiştir. Numunede uygulanacak ankraj yerleri de belirlendikten sonra matkap ile delinmiştir. Daha sonra elektrikli kompresör yardımıyla delikler temizlenerek her türlü toz, kum, vs.'den arındırılmıştır. Önceki deneyde CFRP malzeme ankraj noktasından koptuğu göz önüne alınarak ankraj deliklerinin çevresindeki keskin bölgeler tamir harcı ile daha dikkatli şekilde pahlanarak, bu bölgeden kopmasının önüne geçilmek istenmiştir.



Şekil 4.85 : Numune 5 - Karbon elyaf uygulanacak bölgelerin belirlenmesi.

CFRP malzemenin yapıştırılmasında kullanılacak epoksi karışımın hazırlanmasından sonra karışım diyagonal CFRP bantların yapıştırılacağı bölgeye ve ankraj deliklerine sürülmüş, 15 cm genişliğindeki CFRP çapraz bantlar iki kat olarak duvara yapıştırılmıştır (Şekil 4.86).



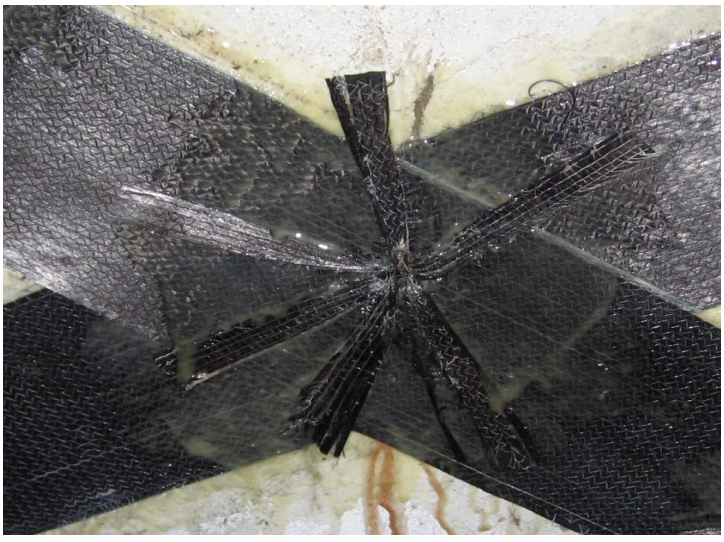
Şekil 4.86 : Numune 5 - Diyagonal CFRP bantların yapıştırılması.

CFRP diyagonal bantların duvara yapıştırılmasının ardından kolon-kiriş köşe birleşim ve kolon alt bölgelerine CFRP bantların uygulanması işlemine geçilmiştir. Şekil 4.87'de detaylı şekilde görüldüğü gibi köşe bölgelere ilave iki kat olarak uygulanan CFRP malzemelerin lif yönleri çerçeveyle 45°'lik açı yapacak şekilde ve her katmanın lif yönleri birbirine dik olacak şekilde yapıştırılmıştır (Şekil 4.87).



Şekil 4.87 : Numune 5 – Köşe bölgelere CFRP bantların yapıştırılması.

Son olarak CFRP yapıştırılması tamamlanan numunenin ankraj işlemlerine geçilmiştir. Anraj işlemi çerçeve arka yüzünden çıkmayacak şekilde sadece duvar içine açılan deliklere CFRP şeritlerin yerleştirilmesi şeklindedir. Ankraj boyları yaklaşık 20 cm olup enleri ise ikiye bölünerek 15cm olarak kullanılmıştır. Ankraj deliklerine ankrajlar uygulanmadan önce silikon tabancasıyla bol miktarda epoksi enjekte edilmiştir. Daha sonra karbon lif ankrajları bir mil yardımıyla deliklere yerleştirilmiş ve duvar yüzünde yıldız şeklinde yayılmıştır (Şekil 4.88).



Şekil 4.88 : Numune 5 – CFRP ankrajların görünümü.

Güçlendirilen numune deneyi öncesinde CFRP malzemenin betonarme çerçeve ile aderansının tam olarak sağlanabilmesi için 7 gün beklenmiş ve deneye başlanmıştır.

Bu numuneye, ilk 2 çevrim yük kontrollü, sonraki çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olmak üzere 18 çevrim uygulanmıştır. Deneyin ilk iki çevriminde uygulanan yatay yükler sırasıyla 20, 30 kN olarak belirlenmiştir. 3. çevrimde hedeflenen yerdeğiştirmeye ulaşılmış ve deneye yerdeğiştirme kontrollü devam edilmiştir.

Tüm çevrimler sonrasında numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 14. çevrimde, 1.611 öteleme oranında, tepe yerdeğiştirme δ=15.1 mm'ye ulaşıldığında 108.0 kN, çekmede ise aynı çevrimde 96.0 kN olarak okunmuştur.

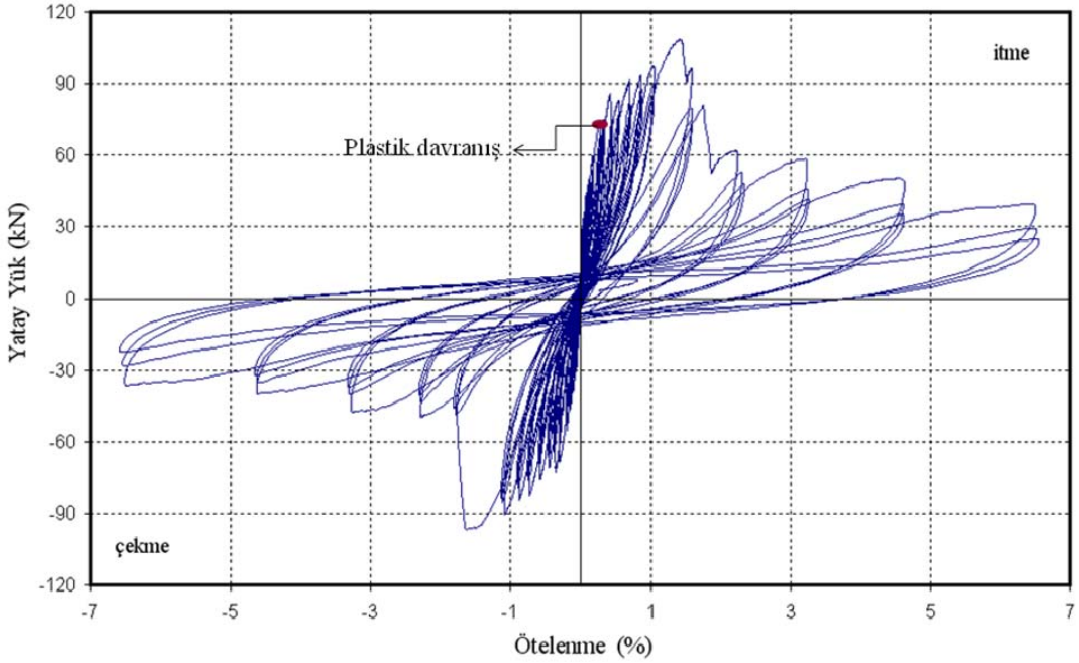
İlk 5 çevrim boyunca numunede, betonarme çerçeve ile dolgu duvar arasındaki sıva çatlakları dışında hiçbir çatlak gözlenmemiştir. İlk çatlaklar 6. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 59.3 kN, çekmede ise 55.1 kN, öteleme oranı % 0.184 iken, duvar ön yüzünde 1 numaralı kesme çatlağı ve her iki kolon dış bölgesinde gözlenen 2,3,4,5 numaralı eğilme çatlakları, tekrarlı itme ve çekmeler sonrasında da duvar ön yüzünde çekme sırasında 6 numaralı kesme çatlağı şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.89). Ayrıca arka duvarda tuğla duvar-betonarme çerçeve arasında sıvada çizgi halinde ayrışma net bir şekilde gözlenebilmektedir.



Şekil 4.89 : Numune 5 – Deney sırasında gözlenen ilk çatlaklar.

7. çevrim boyunca hesaplanan maksimum yükler %0.292 öteleme oranı, hedef tepe yerdeğiştirme δ=2.62 mm'ye ulaşıldığında itme sırasında 74.5 kN, çekmede ise δ=2.92 mm iken 68.5 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim boyunca kolonlardaki mevcut eğilme çatlakları ~5'er cm uzamış, itme sırasında sağ kolon dış yüzey orta bölgeye yakın bölgede 7 numaralı eğilme çatlağı oluşmuş, duvar ön yüzündeki kesme çatlaklarında çatallanmalar ve artış gözlenmiştir. Bununla birlikte tuğla duvar ile kiriş arasındaki çatlaklarda kabarmalar gerçekleşmiştir.

Ayrıca 7. çevrimde deney sonrası elde edilen yatay yük – yerdeğiştirme grafiklerinden anlaşıldığı üzere numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır (Şekil 4.90).



Şekil 4.90 : Numune 5 - Yatay yük-ötelenme grafiği.

Bir sonraki 8. çevrimde % 0.348 öteleme oranı, hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ= 3.6 mm'ye ulaşırken, duvardaki kesme çatlakları çatallanarak artmaya devam etmiş, itme sırasında sağ kolon dış yüzünde orta bölgeye yakın 10 ve 11 numaralı ve sol kolon dış yüzeyinde 13, 14 numaralı eğilme çatlakları oluşmuştur. Bununla birlikte duvar ön yüzünde ~20 cm genişliğinde 12 numaralı kesme çatlağı gözlenmiştir (Şekil 4.91). 2 numaralı CFRP bantta sol üst köşeden sıvayla birlikte kabarma oluşmuştur.



Şekil 4.91 : Numune 5 – 8. çevrim sonrası numunede çatlak oluşumu.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=4.1 mm (öteleme %0.443) olduğu 9. çevrimde (itmede maksimum yük 80.1 kN, çekmede 71.1 kN) duvar-kiriş birleşimindeki çizgi halindeki sıva epey kabarmış, kolon dış yüzeylerindeki mevcut çatlak boylarında her iki yöne doğru ~2-5 cm uzamalar olmuş, itme ve çekme sırasında her iki CFRP çapraz bantta sıvayla birlikte üst köşelerde kabarmalar gerçekleşmiştir.

10. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 82.8 kN, çekmede ise 75.4 kN, öteleme oranı % 0.554 iken, mevcut çatlaklarda uzamalar, çatlak derinliklerinde artmalar devam etmiş, duvar ön yüzündeki sıva kabarmaları çok belirgin hale gelmiştir. Bu nedenle duvardaki şekildeğiştirme ölçerlerden biri zarar görmüştür. Bu çevrime kadar her iki kolon alt bölge ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde çatlağa rastlanmamıştır.

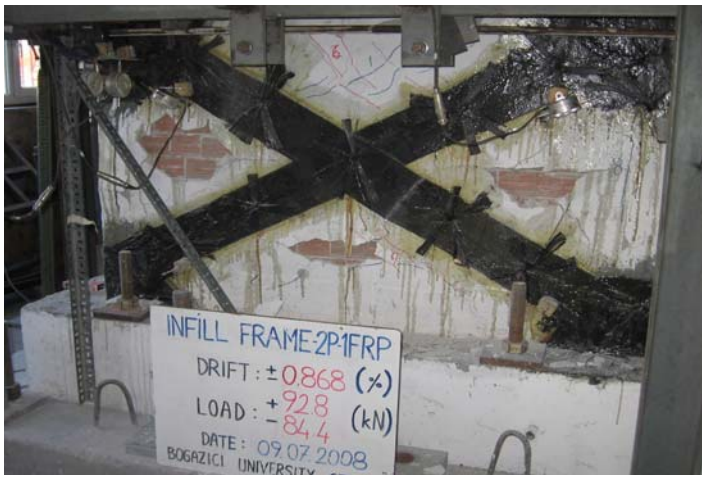
Bir sonraki çevrim, %0.719 öteleme oranı δ=6.6 mm hedef tepe yerdeğiştirmesi olan 11. çevrimde (maksimum yükler itmede 91.0 kN, çekmede 82.3 kN), duvar iki yüzünde de kabaran sıvalar düşmeye başlamıştır (Şekil 4.92). İtme sırasında sağ kolon dış yüzünde alt bölgeye yakın 15 numaralı eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Duvar ön yüzündeki CFRP çapraz bantlar birçok noktadan ankrajlandığı için o noktalarda sıva kabarması oluşmamıştır. CFRP malzemede bu çevrim sonunda da herhangi bir hasara rastlanmamıştır.



Şekil 4.92 : Numune 5 – 11. çevrim sırasında duvardan sıva kopmaları.

12. çevrim, %0.868 öteleme oranında, maksimum yükler itmede 92.8 kN, çekmede ise 84.4 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde sağ kolon dış yüz alt bölgede 16 numaralı eğilme çatlağı ve sağ kolon arka yüzünde alt bölgede 17 numaralı kesme çatlakları oluşmuş, her iki kolondaki eğilme çatlakları arka yüze doğru ~5'er cm

uzamıştır. Duvardaki sıva düşmeleri çevrim boyunca devam etmiştir. Şekil 4.93'de deney numunesinin 12. çevrim sonrasındaki durumu gösterilmektedir.



Şekil 4.93 : Numune 5 – 12. çevrim sonrası numune hasar durumu.

Hedef tepe yerdeğiştirmesi δ=10.1 mm olarak belirlenen (öteleme oranı: %1.078) 13. çevrimde sıvada büyük parçalar halinde kopmalar gerçekleşmiş, 17 numaralı kesme çatlağı temele doğru uzamıştır. Bu çevrimde itmede 97.3 kN, çekmede ise 90.6 kN'luk yüke ulaşılmıştır.

%1.611 öteleme oranı δ=15.0 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 14. çevrimde, itmede maksimum yük 108.0 kN, çekmede ise 96.0 kN olarak kaydedilmiştir. Bu yükler tüm deney boyunca ulaşılan maksimum yükler olmuştur. Tekrarlı itmeler sonucu duvar ön yüzündeki 2 numaralı CFRP bant sol üst köşe ankraj noktasından, aynı çevrimin tekrarlı çekmeleri sonucunda da 1 numaralı CFRP bant, sol alt köşe ankraj noktasından büyük bir gürültüyle kopmuştur (Şekil 4.94).



Şekil 4.94 : Numune 5 – CFRP bantların koptuğu bölgeler.

Şekil 4.95'de CFRP çapraz bantın ankraj noktasından koptuğu bölge detaylı şekilde gösterilmektedir. Her iki çapraz bantın da ankraj noktasından kopması, o bölgedeki CFRP malzemenin delinmesi ve kesit daralması nedeniyle zayıf bölgeden kopmanın gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 4.95 : Numune 5–CFRP bantın koptuğu ankraj noktası.

Aynı çevrim boyunca duvardaki sıva dökülmeleri devam etmiş, 17 numaralı kesme çatlağı çatallanarak temele doğru büyümüştür. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde beton kopmaları gözlenmeye başlamıştır. Bu çevrimden sonraki çevrimlerde maksimum yükte hızlı düşüşler gerçekleşmiştir.

Öteleme oranı %2.263, hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=21.2 mm olan 15. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 80.0 kN, çekmede ise 49.3 kN'a düşmüştür. Çevrim boyunca sağ kolon dış yüzü, orta bölgede 18 numaralı kesme çatlağı, aynı kolonun arka yüzünün orta bölgesinde 19, 20 numaralı kesme çatlakları oluşmuştur (Şekil 4.96). Tuğla duvarda küçük parçalar halinde düşmeler başlamış, duvar iki yüzünde duvar üzerindeki sıva büyük ölçüde dökülmüştür.



Şekil 4.96 : Numune 5–15. Çevrim boyunca kolon orta bölgesinde kesme çatlakları.

%3.229 öteleme oranı, δ=30.5 mm tepe yerdeğiştirme hedeflenen 16. çevrimde itmede maksimum yük 58.1 kN, çekmede ise 47.6 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrimde de itme sırasında sol kolon ön yüzünde, orta bölgeye yakın 21 numaralı kesme çatlağı, çekme sırasında sağ kolon arka yüzünde, orta bölgeye yakın 22 numaralı kesme çatlağı oluşmuş, bununla birlikte çevrim boyunca büyük parçalar halinde tuğla düşmeleri gerçekleşmiştir.

Maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 43.5 mm olarak ölçüldüğü, çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği 17. çevrimde maksimum yükler itmede 50.3 kN, çekmede ise 40.0 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrim boyunca çekme sırasında sol kolon arka yüzünde alt bölgeye yakın kesimde 23 numaralı ve sağ kolon ön yüzünde kolon alt bölgede 25 numaralı kesme çatlağı, devam eden itmeler-çekmeler boyunca itme sırasında sağ kolon orta bölgesinde 24 numaralı kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 4.97).



Şekil 4.97 : Numune 5 – 17. çevrim sırasında kolonlarda oluşan kesme çatlakları.

CFRP uygulamasının olmadığı duvar arka yüzünde tuğlalardan parça kopmaları daha yoğun şekilde gözlenebilmektedir. Ayrıca duvar arka yüzünde sağ kolon alt bölgede ve sol kolon-kiriş birleşim bölgesinde betonda dağılmalar meydana gelmiştir.

Bu çevrim sonrasında kolon-kiriş birleşim bölgesindeki CFRP malzeme ve ankrajların sağlam olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte daha önceki deney numuneleri ile karşılaştırılırsa tuğla duvarda dökülmelere çok daha seyrek olmuştur. Şekil 4.98'de numunenin 17. çevrim sonrası durumu görülmektedir.



Şekil 4.98 : Numune 5 – 17. çevrim sonrası çerçevenin görünümü.

Deneyin son çevrimi olan 18. çevrimde hedeflenen δ=61.5 mm'ye (öteleme oranı % 6.5) ulaşıldığında ölçülen maksimum yükler itmede 39.5 kN, çekmede ise 36.5 kN olup, deneye son verilmiştir. Bu çevrimde de çatlak oluşumu devam etmiş, itme sırasında sağ kolon arka yüzünde orta bölgeye yakın 26 numaralı ve sol kolon arka yüzünde orta bölgede 27 numaralı kesme çatlakları, çekme sırasında da sağ kolon ön yüzünde, orta bölgeye yakın 28 ve 29 numaralı kesme çatlakları oluşmuştur. Bununla birlikte tuğlalarda düşmeler devam etmiştir. Numune arka yüzü, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde beton kopmaları devam etmiş, donatı burkulmaları rahatça gözlemlenebilir hale gelmiştir. Şekil 4.99'da deney sonrası numunenin son hali görülmektedir.



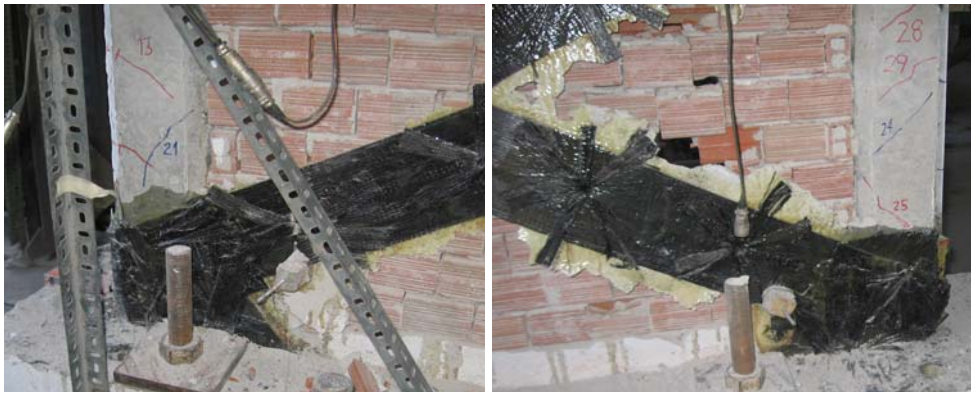
Şekil 4.99 : Numune 5-Deney sonrası numunenin görünümü.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı ve tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 5. deney çerçevesinde hasar oluşumu, kolonlarda eğilme çatlakları ve duvardaki kesme çatlakları ile başlamış, 14. Çevrimde CFRP diyagonal bantların kopmasıyla birlikte kolonlarda kesme çatlakları gözlemlenmiş, maksimum yükte sert düşüşler gerçekleşmiş, kolon mesnet bölgelerindeki donatılar burkulmuş, kesme kırılması ve basınç etkisiyle numune göçme konumuna gelmiştir. Şekil 4.100 ve 4.101'de deney numunesi kolon alt bölgelerinin deney sonrası son durumu gösterilmektedir.



Şekil 4.100 : Numune 5-Deney sonrası kolon alt bölgelerinin görünümü.

Deneyler sonrası duvar ön yüzünde kolon alt bölge ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde CFRP bantlar etkinliğini yitirmemiştir. Duvardaki CFRP diyagonal bantlarda ise ankrajların uygulandığı bölge, sıvayla birlikte çerçeve üzerinde kalabilmişlerdir. Bununla birlikte daha önceki deneylerde gözlenen kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları çok daha az sayıda oluşmuştur. Duvar arka yüzünde ise CFRP uygulamasının olmadığı bölgelerde beton kopmaları gerçekleşmiş, donatı burkulmaları net bir şekilde gözlenmiştir (Şekil 4.101).



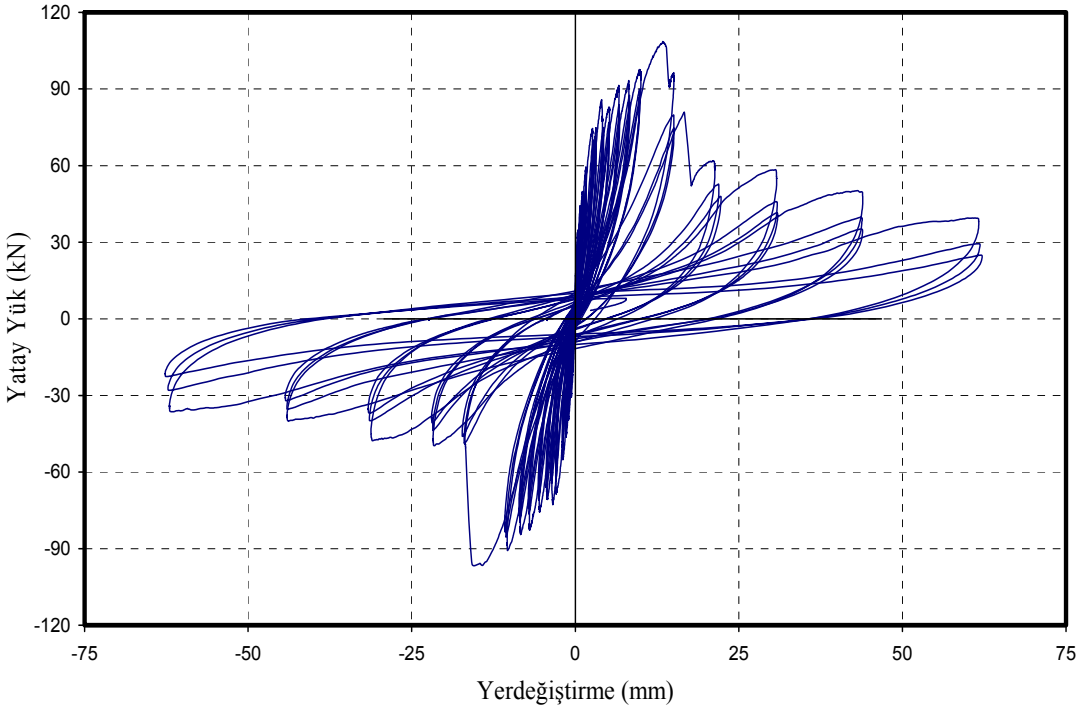
Şekil 4.101 : Numune 5-Deney sonrası kolon alt bölgelerinde CFRP'nin görünümü.

Şekil 4.102'de duvar ön yüzündeki CFRP bantların ve kolon kiriş birleşim bölgelerinin son durumu görülmektedir.



Şekil 4.102 : Numune 5 - Deney sonrası kolon-kiriş birleşim bölgelerinin görünümü.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı ve tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve numunesinin davranışının yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.103'de verilmiştir.



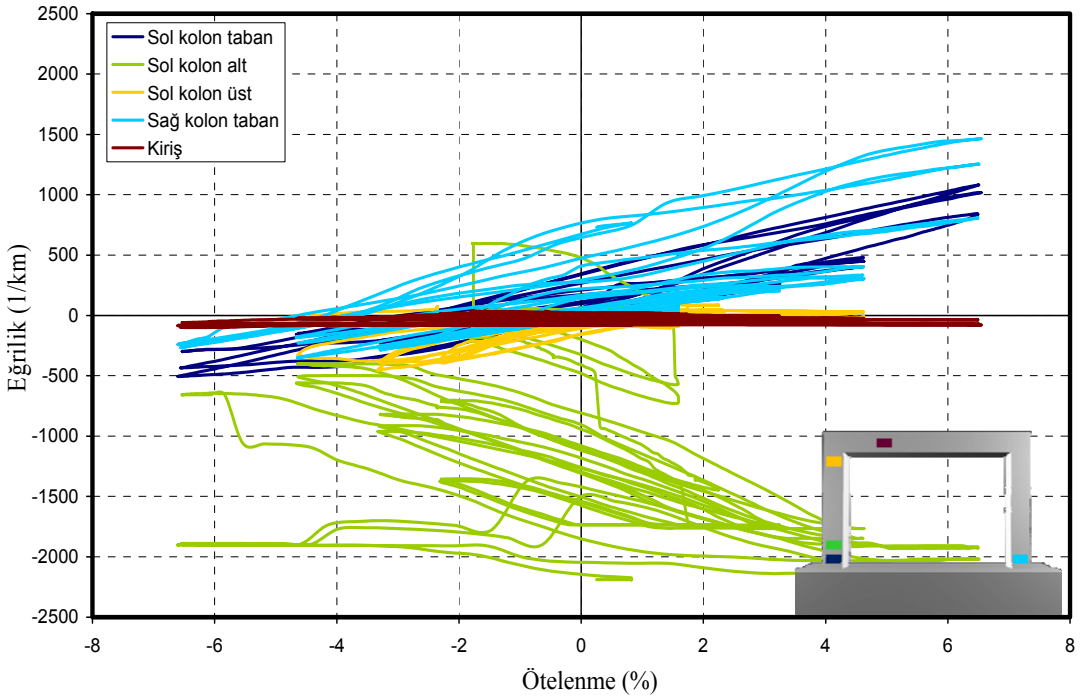
Şekil 4.103 : Numune 5 - Yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi.

Numune 5'e uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.5'de görülmektedir.

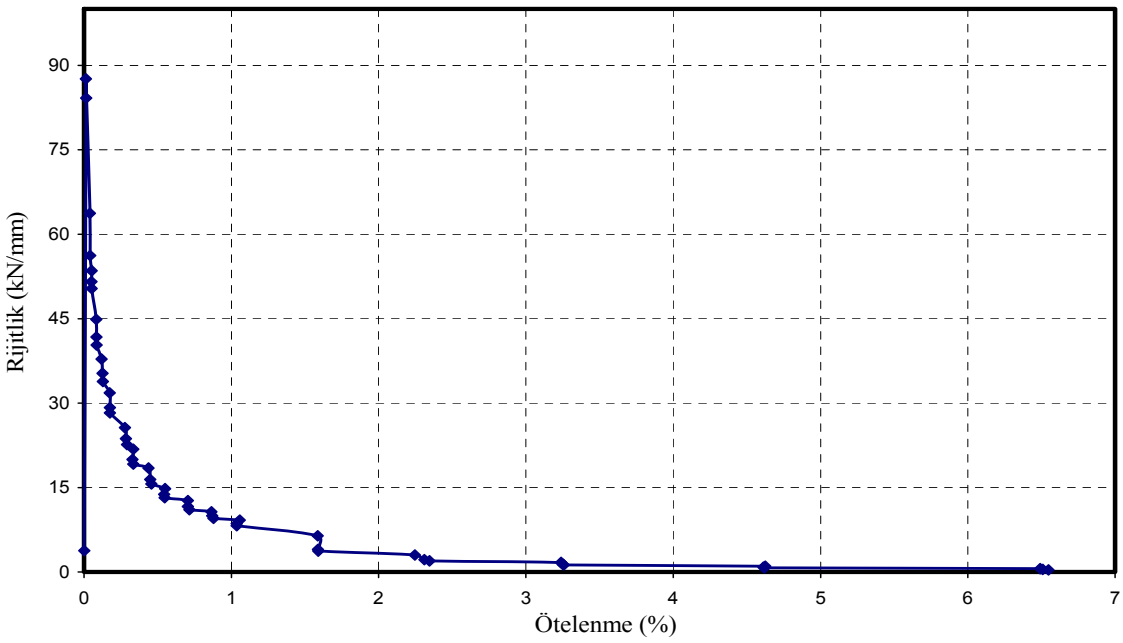
Çizelge 4.5 : Numune 5-Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

Numune 5		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	Yük kontrollü	0.13	20.0	0.34	-20.0
2	Yük kontrollü	0.36	30.0	0.61	-30.0
3	0.062	0.47	35.0	0.74	-30.8
4	0.095	0.76	43.7	1.04	--39.0
5	0.132	1.1	49.6	1.4	-46.2
6	0.184	1.6	59.3	1.9	-55.1
7	0.292	2.62	74.5	2.92	-68.5
8	0.348	3.16	74.9	3.45	-72.6
9	0.443	4.07	80.1	4.35	-71.1
10	0.554	5.12	82.8	5.4	-75.4
11	0.719	6.69	91.0	6.97	-82.3
12	0.868	8.11	92.8	8.39	-84.4
13	1.078	10.1	97.3	10.38	-90.6
14	1.611	15.1	108.0	15.4	-96.0
15	2.263	21. 36	80.0	21.64	-49.3
16	3.229	30.54	58.1	30.8	-47.6
17	4.6	43.56	50.3	43.84	-40.0
18	6.5	61.5	39.5	61.5	-36.5

Şekil 4.104 ve 4.105'de eğrilik-ötelenme grafiği ve yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanan rijitlik-ötelenme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.104 : Numune 5-Eğrilik-ötelenme eğrisi.



Şekil 4.105 : Numune 5 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.6 Numune 6 – Dolgu Duvarlı / Çift yüzü Sıvalı / Çift yüzü CFRP ile Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi

Çalışmanın altıncı ve son deneyi dolgu duvarlı, çift yüzü sıvalı, çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney numunesinde, CFRP diyagonal bantlar yapıştırılarak güçlendirme, her iki yüz sıvalı çerçevede duvarın iki yüzünde de, binanın iki tarafından da güçlendirme yapılacağı göz önüne alınarak, betonarme eleman ve duvarda delikler açılıp epoksi ile CFRP malzemenin çift taraflı ankraj uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

6. deney numunesinin güçlendirme işlemi bir önceki deneyle aynı zamanda gerçekleşmiş, 5. deney numunesinden farklı olarak bu numunede ankrajlar çift taraflı uygulanmıştır.

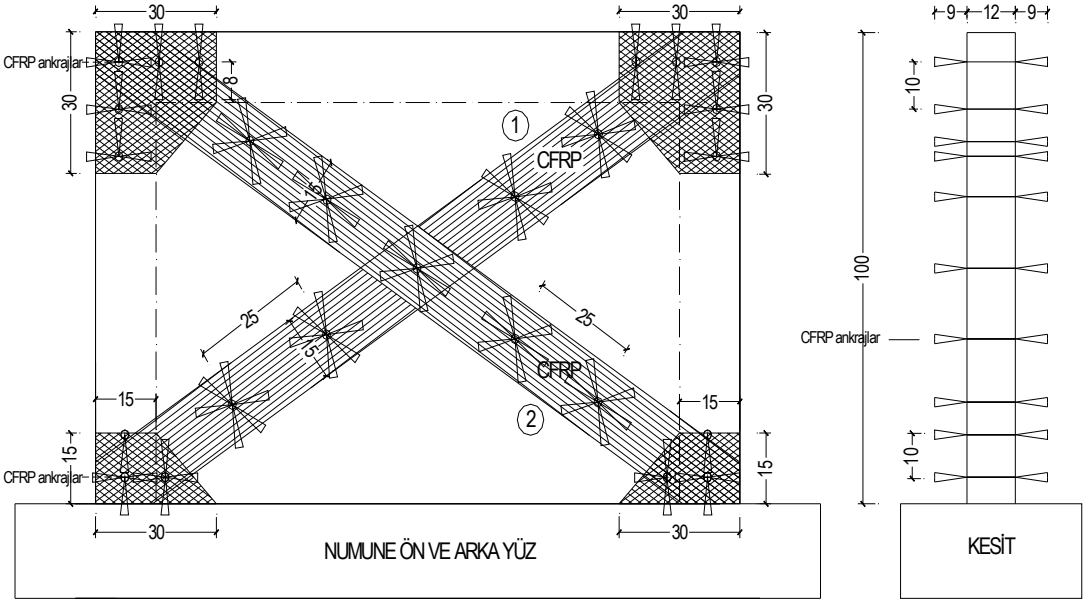
Tuğla duvara uygulanan CFRP diyagonal bantlar, 15 cm genişliğinde, çift kat çapraz şekilde uygulanmış, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ve kolon alt bölgesinde ek çift kat CFRP bant ile güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Beşinci deney elemanının güçlendirmesinden farklı olarak aynı sayı ve konumdaki ankraj delikleri çift taraflı açılmış, tüm ankrajlar köşe bölgelerdeki ek CFRP bantlar ve CFRP çapraz bantların yapıştırılmasından sonra bu elemanların üzerine gelecek şekilde duvara yapıştırılmıştır. Ankrajlamada kullanılacak CFRP bantların boyutları 30x15 cm olup, 12cm'lik bölümü duvar içinde kalacak şekilde, her iki yüzde 9cm boyunda ankraj uygulaması yapılmıştır. CFRP bantlar tuğla duvara 9, betonarme elemanlara da 16 noktadan ankrajlanmıştır.

Deneysel çalışmada CFRP güçlendirme malzemesi ve epoksi yapıştırıcı malzemesi olarak diğer deneylerde kullanılan malzemeler kullanılmıştır. Güçlendirme yöntemi ve uygulama şekli çift taraflı ankrajlama dışında 5. deney numunesi ile aynıdır.

Güçlendirilen numune deneyi öncesinde CFRP malzemenin betonarme çerçeve ile aderansının tam olarak sağlanabilmesi için 14 gün beklenmiş ve deneye başlanmıştır.

Numunenin CFRP ile güçlendirme şekli detay çizimleri ve ankraj noktaları Şekil 4.106'da gösterilmiştir.



Şekil 4.106 : Numune 6 - Karbon elyaf uygulama detay çizimleri.

Çalışmanın son deneyi olan 6. Deney numunesine de ilk 3 çevrim yük kontrollü sonraki çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olmak üzere 18 çevrim uygulanmıştır. Deneyin ilk üç çevriminde uygulanan yatay yükler sırasıyla 35,40,50 kN olarak belirlenmiştir. 4. çevrimde hedeflenen öteleme oranına (%0.095) ulaşılmış ve deneye yerdeğiştirme kontrollü devam edilmiştir.

Tüm deney boyunca numuneye uygulanan en büyük yatay kuvvet itmede 13. çevrimde, 1.078 öteleme oranında, tepe yerdeğiştirme δ=10.4 mm'ye gidilirken 139.6 kN, çekmede ise aynı çevrimde 130.4 kN olarak kaydedilmiştir. 18. Çevrim sonrası deneye son verilmiş, bu çevrim sonrası hesaplanan maksimum yükler itme sırasında 59.0 kN, çekme sırasında ise 47.5 kN olarak ölçülmüştür.

Numunede gözlenen ilk çatlaklar 6. çevrimde maksimum yükler itme sırasında 84.7 kN, çekmede ise 80.2 kN, öteleme oranı % 0.184 iken, duvar-betonarme arası belirgin sıva çatlakları şeklinde olmuştur. Bununla birlikte itme sırasında sağ kolon dış yüzey orta bölgede 1 numaralı, aynı çevrimin çekme sırasında ise sol kolon dış yüzey orta bölgede 2 numaralı çatlak oluşmuştur.

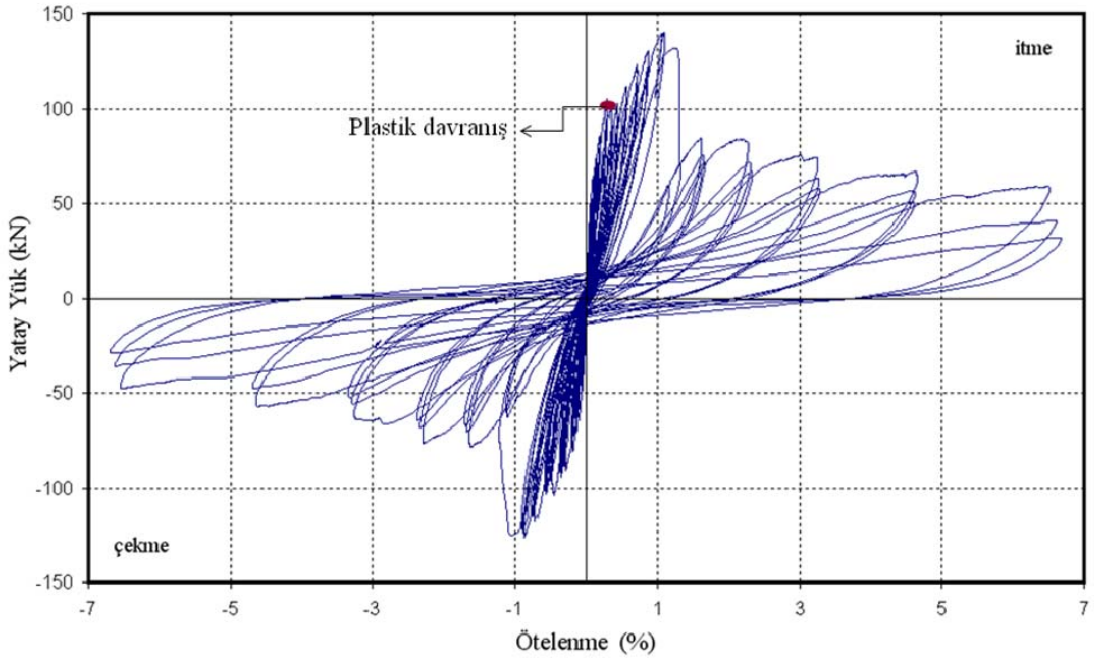
7. çevrim boyunca hesaplanan maksimum yükler %0.292 öteleme oranı, hedef tepe yerdeğiştirme δ=2.77 mm'ye gidilirken itme sırasında 105.3 kN, çekmede ise δ=2.74 mm iken 90.5 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim boyunca 1 numaralı çatlakta numune ön yüzüne doğru ~3cm uzama kaydedilmiş, sıvada kabarmalar gözlenmiş, çekme sırasında sol kolon dış yüzü, orta bölgeye yakın 3 ve 4 numaralı çatlaklar oluşmuştur.

Bir sonraki 8. çevrimde % 0.348 öteleme oranı, hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ= 3.6 mm'ye gidilirken, CFRP çapraz bantları tutan sıvanın duvarda ayrıldığı gözlenmiş, itme sırasında duvar ön yüzünde 5 numaralı ve duvar arka yüzünde 6 numaralı kesme çatlakları oluşmuştur. Aynı çevrimin çekme aşamasında da duvar ön yüzünde 7 numaralı kesme çatlağı tespit edilmiştir. Bununla birlikte numuneden sıva kopmaları oluşmaya başlamış, tuğlalar görünür hale gelmiştir (Şekil 4.107).



Şekil 4.107 : Numune 6 – 8. çevrim sonrası duvar iki yüzündeki kesme çatlakları.

Bununla birlikte 8. çevrimde deney sonrası elde edilen yatay yük – yerdeğiştirme grafiklerinden anlaşıldığı üzere numune elastik sınırlar içerisinden çıkıp plastik davranış göstermeye başlamıştır (Şekil 4.108).



Şekil 4.108 : Numune 6 - Yatay yük-ötelenme eğrisi.

Hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=4.1 mm (öteleme %0.443) olduğu 9. çevrim (itmede maksimum yük 101.6 kN, çekmede 104.3 kN) ve δ=5.3 mm olduğu 10. çevrimlerde (itmede maksimum yük 112.2 kN, çekmede 102.8 kN) duvarlarda kesme çatlakları (9-10-11 numaralı çatlaklar) ve kolonlarda eğilme çatlakları oluşmaya devam etmiş, çatlak genişlik ve boylarında uzamalar gözlenmiştir. Duvar arka yüzünde büyük parçalar halinde sıva dökülmeleri olmuştur. Bununla birlikte duvardan kopan sıva malzemesi CFRP çapraz bantları da duvardan ayırmıştır. Numunede CFRP malzeme uygulaması olmayan sıvalı bölgelerde sıva düşmeleri olmuş, tuğla duvarda herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Ayrıca bu çevrime kadar her iki kolonda da kesme çatlağına rastlanmamıştır. Şekil 4.109'da numunenin 10. çevrim sonrası duvar her iki yüzünün son durumu gösterilmektedir.

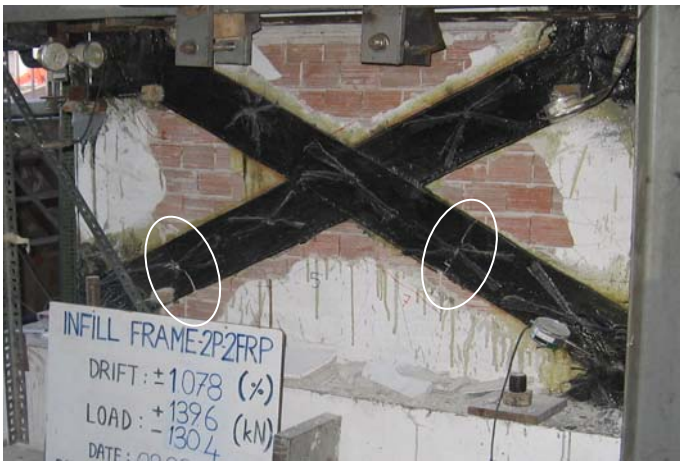


Şekil 4.109 : Numune 6 – 10. çevrim sonrası numune hasar durumu.

Bir sonraki çevrim, %0.719 öteleme oranı δ=6.8 mm hedef tepe yerdeğiştirmesi olan 11. çevrimde (maksimum yükler itmede 122.4 kN, çekmede 117.4 kN), duvardaki 7 ve 10 ve 11 numaralı kesme çatlaklarında ~20-30 cm uzamalar kaydedilmiştir. Bu çevrime kadar her iki kolon dış yüzeylerinde gözlenen eğilme çatlakları önceki deney numuneleri ile kıyaslanacak olursa oldukça azdır. Ayrıca her iki duvar yüzünde de ankrajlar sağlam olduğu için duvarda sıva dökülmeleri çok gözlenmemiştir.

12. çevrim, %0.868 öteleme oranında, maksimum yükler itmede 129.5 kN, çekmede ise 126.2 kN olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde itme sırasında sağ kolon dış yüzünde, orta bölgeye yakın kısımda 12 numaralı eğilme çatlağı oluşmuş, çekme sırasında da sol kolon dış yüzündeki 2,3,4 numaralı çatlakların boylarında da her iki yüze doğru ~2-3 cm uzamalar kaydedilmiştir. Duvar arka yüzünde CFRP malzeme ankraj noktaları haricindeki bölgelerde kabarmış, duvardaki kesme çatlakları boyunca sıvalar düşmeye devam etmiştir.

%1.078 öteleme oranı δ=10.4 mm tepe yerdeğiştirmesi olan 13. çevrimde, itmede maksimum yük 139.6 kN, çekmede ise 130.4 kN olarak kaydedilmiştir. Bu yükler tüm deney boyunca ulaşılan maksimum yükler olmuştur. Bu çevrim sırasında, çekmede, duvar ön yüzündeki 1 numaralı CFRP çapraz bant sol alt bölgeden, itme sırasında da 2 numaralı CFRP çapraz bant sağ alt bölgeden büyük bir gürültüyle kopmuşlardır. Aynı çevrimin tekrarlı itme ve çekmeleri sırasında da CFRP çapraz bantlar duvar arka yüzünde, ön yüzde koptuğu iki ankraj noktasından kopmuşlardır (Şekil 4.110-4.111). Bununla birlikte itme sırasında sağ kolon dış yüzünde 13 numaralı eğilme çatlağı oluşmuştur. Duvar ön yüzündeki kesme dayanımını ölçen şekildeğiştirme ölçerler sıva düşmesi sonucu zarar görmüştür.



Şekil 4.110 : Numune 6 – CFRP bantların koptuğu bölgeler.



Şekil 4.111 : Numune 6–CFRP bantın koptuğu ankraj noktaları.

14. çevrim boyunca hesaplanan maksimum yükler %1.611 öteleme oranı, hedef tepe yerdeğiştirmesi δ=15.4 mm'ye gidilirken itme sırasında 83.8 kN, çekmede ise 78.6 kN olarak hesaplanmıştır. İtme ve çekmede kaydedilen yüklerde sert düşüş gerçekleşmiştir. Bu çevrim boyunca, duvar arka yüzündeki itme sırasında kopan CFRP bantların derinliği artmış, CFRP çapraz bant kesişim noktasından da kopmuştur (Şekil 4.112). 14. çevrime kadar kolon-kiriş birleşim bölgeleri ve kolon alt bölgelerindeki CFRP bantlarda herhangi bir hasar gözlenmemiştir.



Şekil 4.112 : Numune 6–CFRP bantın koptuğu kesişim noktası.

Öteleme oranı %2.263, hedeflenen tepe yerdeğiştirme δ=21.5 mm olan 15. çevrimde hesaplanan yükler itme sırasında 83.7 kN, çekmede ise 76.8 kN'a düşmüştür.

Tekrarlı itmeler ve çekmeler sonucunda CFRP çaprazlar ankraj noktalarından koparak duvardaki etkisini kaybetmiştir. Sağ kolon dış yüzünde 14 numaralı eğilme çatlağı ve sağ kolon arka yüzündeki 15 ve sağ kolon ön yüzündeki 16,17 numaralı kesme çatlakları oluşmuş, 2 numaralı eğilme çatlağı ön ve arka yüze doğru ~20 cm uzamıştır. Bu çevrim boyunca da birleşim bölgelerindeki CFRP bantlarda hasar oluşmamıştır. Ankraj noktalarından kopan CFRP bantlar açılmaya devam etmiştir (Şekil 4.113).



Şekil 4.113 : Numune 6 – 15. çevrim sonrası CFRP çapraz bantta açılma.

%3.229 öteleme oranı, δ=30.5 mm tepe yerdeğiştirme hedeflenen 16. çevrimde itmede maksimum yük 75.2 kN, çekmede ise 64.8 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çevrimde itme sırasında sağ kolon ön ve arka yüzü, kolon orta bölgeye yakın 18, 19 ve 20 numaralı kesme çatlakları gözlenmiş, bu çatlakların boy ve derinliklerinde tekrarlı itme ve çekmeler sonucu hızla uzamalar kaydedilmiştir. Duvardaki sıva her iki yüzde de CFRP bantların olduğu bölge hariç tamamen duvardan ayrılmıştır. Bununla birlikte devam eden itme ve çekmeler sırasında tuğlalarda küçük parçalar halinde dökülmeler başlamıştır. Şekil 4.114'de 16. çevrim sırasında numunenin son hali gösterilmektedir.



Şekil 4.114 : Numune 6 – 16. çevrim sırasında numune hasar durumu.

Aynı çevrim boyunca tuğlalarda düşmeler devam etmiş, kolon ön ve arka yüzü orta bölgedeki eğilme çatlakları çatallanarak kolon alt bölgesindeki kesme çatlakları ile birleşmiştir. 2 numaralı eğilme çatlağı kolon alt bölgesine doğru uzamıştır. Birleşim bölgelerindeki CFRP bantlarda herhangi bir hasar gözlenmemiştir.

Maksimum tepe yerdeğiştirmesinin 44.1 mm olarak ölçüldüğü, çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği 17. çevrimde maksimum yükler itmede 67.0 kN, çekmede ise 57.2 kN olarak ölçülmüştür. Çevrim boyunca tuğlalar küçük parçalar halinde dökülmeye devam etmiş, önceki çevrimde oluşan 20 numaralı kesme çatlağı kolondan temele doğru uzamıştır. Sol kolon dış yüzündeki 2 numaralı çatlak, kolon her iki yüzüne doğru uzamaya devam etmiş, 2 ve 20 numaralı kesme çatlakları çerçevenin göçme konumuna gelmesinde oldukça etkili olmuşlardır (Şekil 4.115).



Şekil 4.115 : Numune 6 – 17. çevrim sırasında kolon alt bölgesinde kesme çatlakları.

Bu çevrim sonrasında da kolon-kiriş birleşim bölgesindeki CFRP malzeme ve ankrajların sağlam olduğu göze çarpmaktadır. Bununla birlikte bir önceki deney numunesinde olduğu gibi, daha önceki deney numuneleri ile karşılaştırılırsa tuğla duvarda dökülmelere çok daha seyrek olmuştur. Şekil 4.116'da numunenin 17. çevrim sonrası durumu gösterilmektedir.



Şekil 4.116 : Numune 6 – 17. çevrim sonrası çerçevenin görünümü.

18. ve deneyin son çevriminde hedeflenen δ=61.5 mm'ye ulaşıldığında ölçülen maksimum yükler itmede 59.0 kN, çekmede ise 47.5 kN olup, deneye son verilmiştir. Bu çevrimde de çatlaklar derinleşerek uzamaya devam etmiş, beton pas paylarının dökülmesi sonucunda, donatı burkulmaları rahatlıkla gözlenir hale gelmiştir.



Şekil 4.117 : Numune 6 – 18. çevrim sırasında beton pas paylarının dökülmesi.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı ve çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 6. deney çerçevesinde hasar oluşumu, bir önceki numunede olduğu gibi kolonlarda eğilme çatlakları ve duvardaki kesme çatlakları ile başlamış, 13. çevrimde CFRP diyagonal bantların kopmasıyla birlikte kolon alt ve orta bölgede kesme çatlakları gözlemlenmiş, 13. çevrim sonrası maksimum yükte sert düşüşler gerçekleşmiş, kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup, kesme kırılması ve basınç etkisiyle numune göçme konumuna gelmiştir (Şekil 4.118).



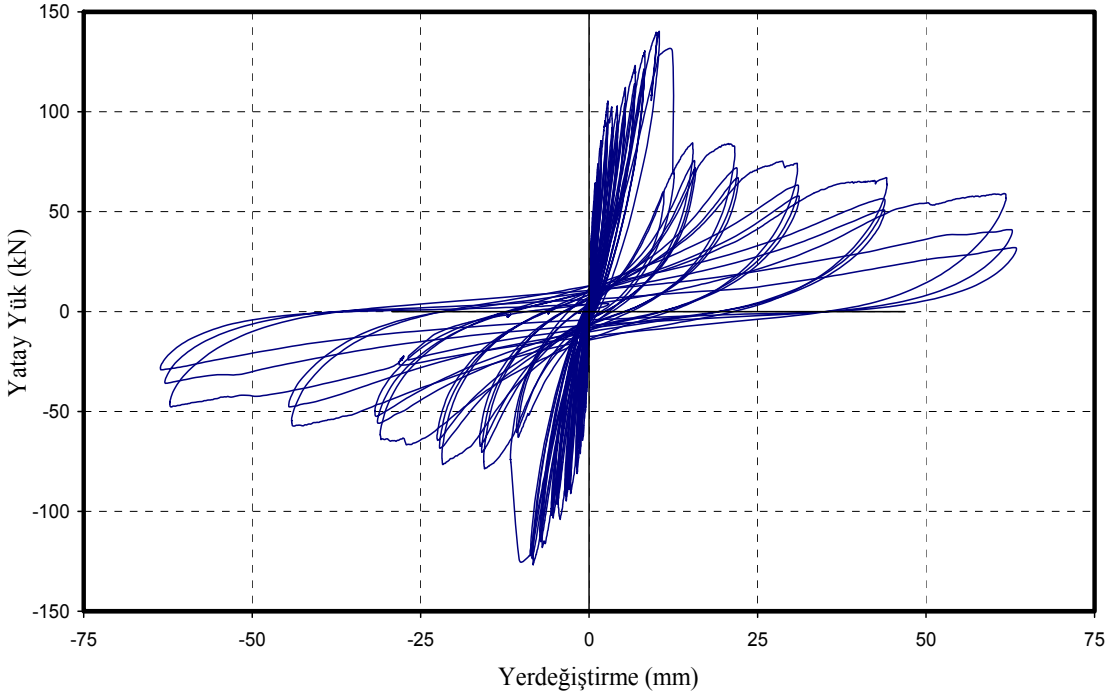
Şekil 4.118 : Numune 6 - Deney sonrası numune genel görünümü.

Duvar iki yüzünde de kolon alt bölge ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde CFRP bantlar etkinliğini yitirmemiştir. Duvardaki CFRP diyagonal bantlarda ise ankrajların uygulandığı bölge, sıvayla birlikte çerçeve üzerinde kalabilmişlerdir. Ayrıca daha önceki deneylerde gözlenen kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları çok daha az sayıda gözlenmiş, kesme çatlakları daha çok kolon orta bölgelerde oluşmuştur. CFRP uygulamasının olmadığı bölgelerde beton kopmaları gerçekleşmiş, donatı burkulmaları net bir şekilde gözlenmiştir (Şekil 4.119).



Şekil 4.119 : Numune 6 - Deney sonrası kolonlarda görülen donatı burkulmaları.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı ve çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve numunesinin davranışının yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.120'de verilmiştir.



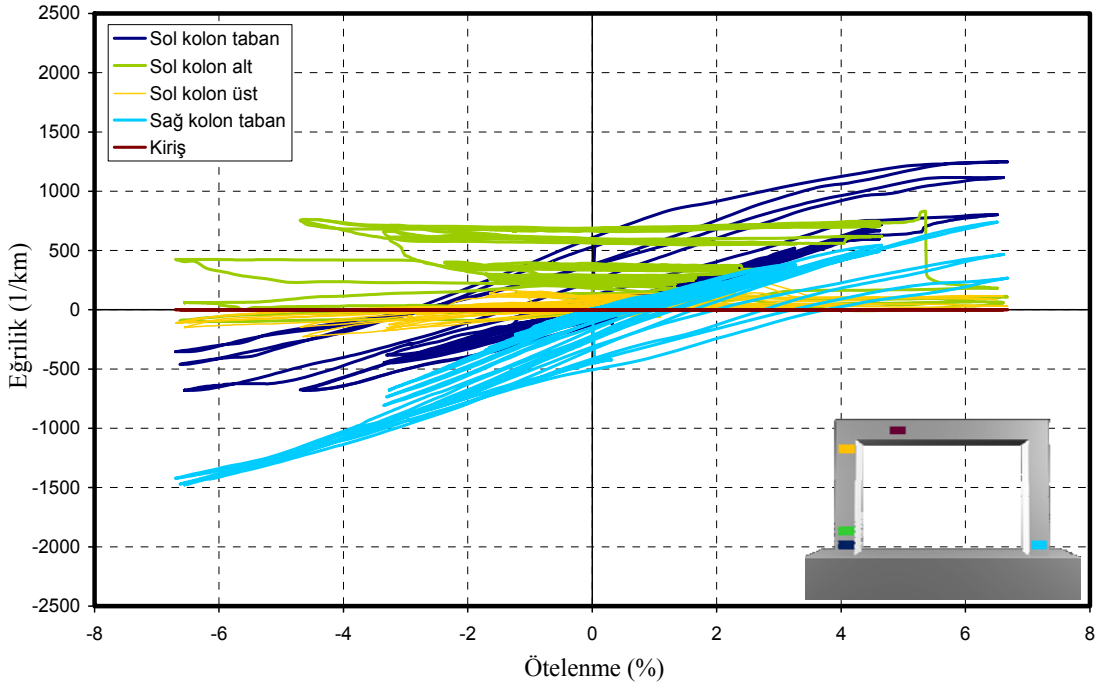
Şekil 4.120 : Numune 6 - Yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi.

Numune 6'ya uygulanan ötelenme oranları ve oluşan maksimum yükler Çizelge 4.6'da görülmektedir.

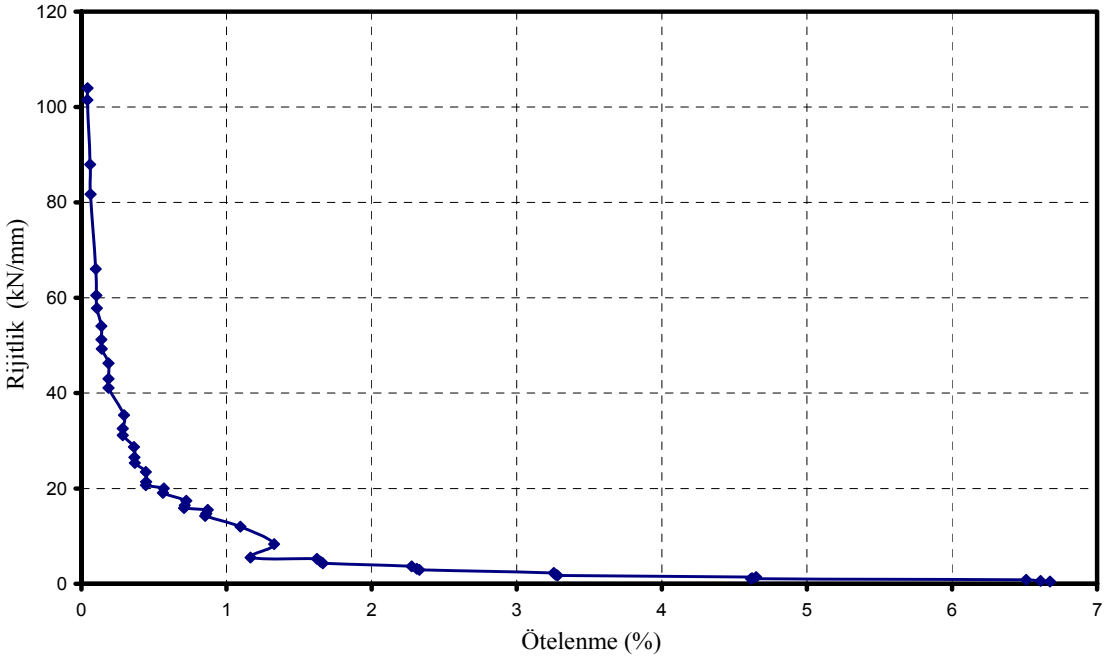
Çizelge 4.6 : Numune 6 Maksimum yük - yerdeğiştirme tablosu.

Numune 6		İTME		ÇEKME	
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yerdeğiştirme (Δ) (mm)	Maksimum Yük (kN)
1	Yük kontrollü	0.34	35.0	0.29	-35.0
2	Yük kontrollü	0.39	40.0	0.37	-40.0
3	Yük kontrollü	0.56	50.0	0.55	-50.0
4	0.095	0.9	64.0	0.9	-64.0
5	0.132	1.3	73.0	1.3	-71.0
6	0.184	1.75	84.7	1.8	-80.2
7	0.292	2.77	105.3	2.74	-90.5
8	0.348	3.35	101.8	3.4	-94.6
9	0.443	4.18	101.6	4.53	-104.3
10	0.554	5.38	112.2	5.33	-102.8
11	0.719	6.81	122.4	6.97	-117.4
12	0.868	8.25	129.5	8.30	-126.2
13	1.078	10.4	139.6	10.4	-130.4
14	1.611	15.4	83.8	15.4	-78.6
15	2.263	21. 58	83.7	21.82	-76.8
16	3.229	30.89	75.2	30.93	-64.8
17	4.6	44.1	67.0	44.1	-57.2
18	6.5	61.5	59.0	61.5	-47.5

Şekil 4.121 ve 4.122'de eğrilik-ötelenme grafiği ve yük-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanan rijitlik-ötelenme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.121 : Numune 6 - Eğrilik-ötelenme eğrisi.



Şekil 4.122 : Numune 6 – Rijitlik-ötelenme eğrisi.

4.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmada, 1/3 ölçekli tek katlı-tek açıklıklı 6 adet betonarme çerçeve üzerinde çalışılmış,

- Boş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı çerçeve,
- Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,
- Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve,

olarak deneyleri tamamlanan numunelerin, her bir çerçeveye ait hasar dağılımları yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri, enerji sönümleme miktarları ve rijitlik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler ile güçlendirme öncesi elde edilen veriler her bir numune kendi arasında karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı verilerle, CFRP malzeme ile tek yüzü ve iki yüzü birden güçlendirilen sıvalı ve sıvasız dolgu duvarlı çerçeve modellerinin performansları, yatay yük altındaki davranışları, enerji yutma kapasiteleri, rijitlik değişimleri, oluşan hasar dağılımları, genel göçme mekanizmaları, başarılı bir uygulama için bazı prensiplerin deneysel olarak ortaya konulması açısından değerlendirilmiştir.

4.7.1 Hasar oluşumu ve göçme şekli ilişkileri

Numuneler deneyler sırasında gösterdikleri performansa göre de değerlendirilmişlerdir. Deney boyunca gözlemlenen çatlaklara numaralar verilmiş, çatlak yerleri işaretlenmiştir. Deneyler sırasında kaydedilen gözlemler, oluşan çatlaklar ve göçme durumları ötelenme oranlarına göre yorumlanmıştır.

Referans numunesi olarak kabul edilen “1. deney numunesi” “boş çerçevenin” göçme performansı değerlendirilmiş, her iki kolonda gözlenen eğilme çatlaklarını, kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları izlemiş, çerçevenin maksimum yatay yük taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından hızla oluşan kolon alt

bölgesindeki kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçme konumuna gelmiştir. Bu numunenin göçmesinde kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları etkili olmuştur. Numunede çatlak sayısı oldukça fazladır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde fazla hasar oluşmamıştır.

"Dolgu duvarlı ve tek yüzü sıvalı" 2 numaralı deney çerçevesinin göçme şekli kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup kesme kırılması ve basınç etkisiyle göçme konumuna gelmeleri sonucu gerçekleşmiştir. Bir önceki boş çerçevedeki gibi kolonlarda başlayan eğilme çatlaklarını, dolgu duvarlarda oluşan diyagonal kesme çatlakları izlemiş, kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları ve numunenin maksimum yüklere ulaştığı yerdeğiştirme sonrasında gözlenen kolon alt bölgelerinde oluşan kesme çatlakları donatının akma konumuna ulaşmasına neden olmuş ve numune göçmüştür. Bu numunede, özellikle kolon alt bölgelerinde gözlenen çatlak sayısı boş çerçeveye göre daha az olmuştur. Çerçevede gözlenen ilk çatlakların kaydedildiği yatay yük değerleri, boş çerçevenin göçme konumunda kabul edildiği maksimum yük değerlerinden daha büyüktür. Deney sonrası numunede tuğla dökülmeleri oldukça fazladır.

3. deney numunesi olan "dolgu duvarlı ve çift yüzü sıvalı çerçevenin" göçme şekli de, bir önceki dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı deney çerçevesi gibi kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup kesme kırılması ve basınç etkisiyle göçme konumuna gelmeleri sonucu gerçekleşmiştir. Bir önceki deney numunesi ile çatlak oluşumu ve göçme performansı açısından çok benzer davranışlar gözlenmiş, deneyler sonrası elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme eğrisine bakılacak olursa maksimum yatay yük, enerji sönümleme ve başlangıç rijitliği gibi değerleri açısından daha iyi performans göstermiştir. Çift taraflı sıva uygulaması çok fazla olmamakla birlikte çerçevenin davranışına olumlu etki etmiştir. Bu numunedeki tuğla düşmeleri bir önceki numuneye göre daha fazladır. Bu da sıvanın numune üzerinden büyük parçalar halinde ayrılırken tuğla duvarı da beraberinde koparması olarak yorumlanmıştır.

CFRP ile güçlendirme işleminin uygulandığı ilk deney numunesi olan 4. deneyde "karbon elyaf ile dolgu duvara tek kat çapraz bant", kolon-kiriş birleşim bölgesi ve kolon alt bölgelerinde ise biri düşey biri yatay olmak üzere iki adet, karbon elyaf bant yapıştırılması şeklinde güçlendirme uygulanmıştır. Kolonlarda başlayan

çatlakların ardından, dolgu duvarlarda diyagonal kesme çatlakları gözlenmiş, çapraz CFRP bantlardan 1 numaralı CFRP bantın ankraj noktasından, 2 numaralı bantın ise sağ alt köşeden kopması ile birlikte maksimum yüklerde hızlı bir düşüş gerçekleşmiştir. Sonraki çevrimlerde oluşan kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme çatlakları ve maksimum yüklere ulaşılan yerdeğiştirmeler sonrasında, kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları numunenin göçmesinde etkili olmuştur. Bu numunede oluşan çatlak sayısı ve duvarda sıva ve tuğla düşmeleri önceki deneylere göre çok daha azdır. Ayrıca kolon mesnet bölgeleri ve kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki bantlar o bölgelerdeki eğilme çatlağı ve kesme çatlağı sayısının azalmasında etkili olmuştur. 4. deney numunesinde CFRP bant, duvara ankrajlandığı kolon-kiriş birleşim bölgesi noktasından kopmuş ve 1 numaralı CFRP malzeme etkisini tamamen kaybetmiştir. Bununla birlikte devam eden çevrimde duvar üzerinde tek kat olarak uygulanan CFRP bantların çekme dayanımları yetersiz gelmiş, istenilen yük dayanımına ulaşılamadan CFRP bantlar kopmuş ve etkilerini kaybetmişlerdir. Kolonlara yapıştırılan yatay ve düşey bantların duvara aderansı ve ankraj sayısı yeterli olmadığından, deney sırasındaki tekrarlı itme ve çekmeler sonucu bantlar ile duvar arasında ayrışmalar gözlenmiştir. Tüm bunların sonucunda ise beklenen güçlendirme performansına ulaşılamamış, duvara tek kat CFRP uygulamasının yetersiz olduğu, ankraj sayısının daha artırılması gerektiği ve bu numuneye uygulanan CFRP uygulamasının doğru olmadığı sonucuna varılmıştır. Dördüncü deney sonrası elde edilen bu veriler sonucunda, diğer iki numunenin CFRP ile güçlendirilmesi için farklı yöntem geliştirilmesi gerekmiştir.

Çalışmanın beşinci deneyi olan, “dolgu duvarlı, çift yüzü sıvalı, tek yüzü CFRP” ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve deneyinde, CFRP diyagonal bantlar yapıştırılarak güçlendirme, her iki yüz sıvalı çerçevede duvarın tek yüzünde, binanın sadece dışından güçlendirme yapılacağı göz önüne alınarak, çift taraflı ankraj olmadan, CFRP malzemenin betonarme elemana tek yüzden ankrajlanması şeklinde uygulama yapılmıştır. CFRP diyagonal bantlar, bir önceki deneydeki gibi aynı genişlikte, fakat iki kat olacak şekilde uygulanmış, CFRP malzemenin tuğla duvarla aderansının güçlü bir şekilde sağlanabilmesi için duvarda da ankraj delikleri açılmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgeleri ve kolon alt bölgelerinde ilave iki kat daha CFRP bant ile güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlave iki kat olarak çerçeve köşelerinde uygulanan CFRP malzemelerin lif yönleri çerçeveyle 45°’lik açı yapacak şekilde ve

her katmanın lif yönleri birbirine dik olacak şekilde uygulanmıştır. Bir önceki deney elemanının güçlendirilmesinden farklı olarak tüm ankrajlar, köşe bölgelerdeki ek CFRP bantlar ve CFRP çapraz bantların yapıştırılmasından sonra bu elemanların üzerine gelecek şekilde duvara yapıştırılmıştır.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı ve tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 5. deney çerçevesinde hasar oluşumu, kolonlarda eğilme çatlakları ve duvardaki kesme çatlakları ile başlamış, 14. çevrimde CFRP diyagonal bantların kopmasıyla birlikte kolonlarda kesme çatlakları gözlenmiş, maksimum yükte sert düşüşler gerçekleşmiş, donatıların burkulması, kesme kırılması ve basınç etkisiyle numune göçme konumuna gelmiştir. Bu numunede kolonlarda gözlenen eğilme ve kesme çatlakları diğer numunelere göre oldukça azdır. Ayrıca kolonlardaki çatlaklar kolon alt bölgesinde orta bölgeye doğru yoğunlaşmıştır.

Deneyler sonrası duvar ön yüzünde kolon alt bölge ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde CFRP bantlar etkinliğini yitirmemiştir. Duvardaki CFRP diyagonal bantlarda ise ankrajların uygulandığı bölge, sıvayla birlikte çerçeve üzerinde kalabilmişlerdir. Bu da tuğla duvarın çerçeveden ayrılmasını engellemiş ve numunenin davranışını olumlu etkilemiştir.

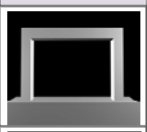
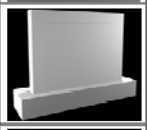
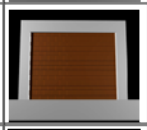
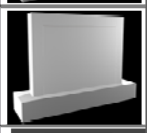
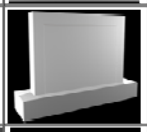
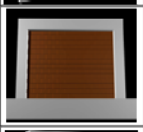
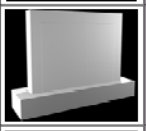
Çalışmanın 6. ve son deneyi "dolgu duvarlı, çift yüzü sıvalı, çift yüzü CFRP" ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve deneyinde, CFRP diyagonal bantlar yapıştırılarak güçlendirme, her iki yüz sıvalı çerçevede duvarın iki yüzünde de, CFRP malzemenin çift taraflı ankraj uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Beşinci deney elemanının güçlendirmesinden farklı olarak aynı sayı ve konumdaki ankraj delikleri çift taraflı açılmıştır. Bu çerçevedeki hasar oluşumu ve göçme performansı bir önceki numuneyle benzerdir. Kolonlarda eğilme çatlakları ve duvardaki kesme çatlakları ile başlamış, 13. çevrimde CFRP diyagonal bantların kopmasıyla birlikte kolon alt ve orta bölgede kesme çatlakları gözlemlenmiş, 13. çevrim sonrası maksimum yükte sert düşüşler gerçekleşmiş, kolon mesnet bölgelerindeki donatıların burkulup, kesme kırılması ve basınç etkisiyle numune göçme konumuna gelmiştir. Deney sonrasında duvar iki yüzünde de kolon alt bölge ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde CFRP bantlar etkinliğini yitirmemiştir. Duvardaki CFRP diyagonal bantlarda ise ankrajların uygulandığı bölge, sıvayla birlikte çerçeve üzerinde kalabilmişlerdir. Daha önceki

deneylerde gözlenen kolon alt bölgelerindeki kesme çatlakları çok daha az sayıda gözlenmiştir.

5. ve 6. deney numunelerinde duvara uygulanan CFRP bantlar yine ankraj noktalarından kopmuşlardır. Bu davranış, o bölgedeki CFRP ankraj kesitinin azalması ve zayıf noktadan kopmuş olması şeklinde değerlendirilmiştir.

Deneyler sırasında numunelerde gözlenen ilk çatlakların oluşum şeması Çizelge 4.7'de gösterilmektedir.

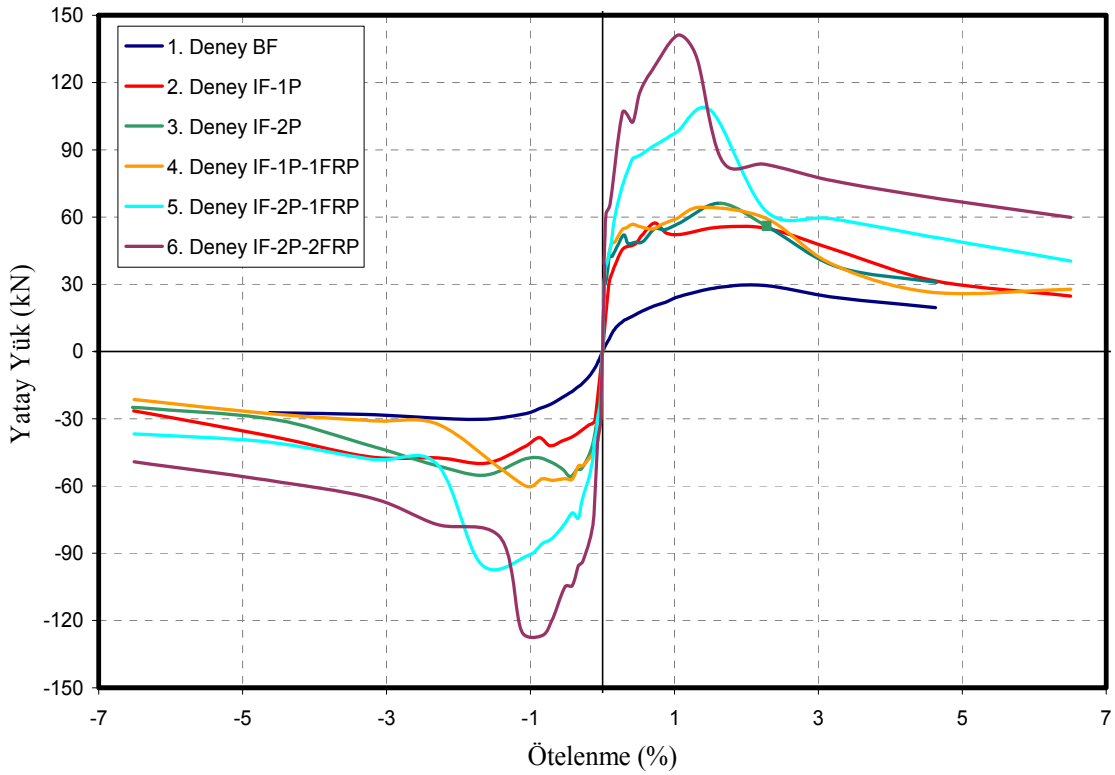
Çizelge 4.7 : Numunelerde ilk çatlakların gözlendiği maksimum yük ve çevrimler.

Numune	Numune adı	Ön yüz	Arka yüz	Çevrim	Ötelenme (%)	İlk çatlak yükleri
1	Boş çerçeve (BF)			6	0.184	10.7 kN/-10.9 kN
2	Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı çerçeve (IF-1P)			5	0.132	35.0 kN/-32.0 kN
3	Dolgu duvarlı / çift yüzü sıvalı çerçeve (IF-2P)			4	0.095	42.5 kN/-35.2 kN
4	Dolgu duvarlı / tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-1P-1FRP)			5	0.132	47.2 kN/-44.1 kN
5	Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-2P-1FRP)			6	0.184	59.3 kN/-55.1 kN
6	Dolgu duvarlı / çift yüz sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve (IF-2P-2FRP)			6	0.184	84.7 kN/-80.2 kN

4.7.2 Yatay yük taşıma kapasitesi ilişkileri

Deneyler sonrasında her numunenin maksimum yatay yük-ötelenme grafik eğrileri elde edilmiştir. Bu değerler sonrası her numunenin hedef tepe yerdeğiştirmedeki maksimum yatay yükleri karşılaştırılabilmiştir.

Bu bölümde deney numunelerinin davranışlarının değerlendirilebilmesi için yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin zarf eğrileri toplu olarak verilmiştir (Şekil 4.123).



Şekil 4.123 : Yatay yük-ötelenme zarf eğrisi.

Referans numunesi olan boş çerçeve numunesi yaklaşık ~30.0 kN'luk bir maksimum yükte göçme konumuna ulaşırken, dolgu duvarlı çerçevelerde gözlenen ilk çatlaklar yaklaşık ~35.0 kN'luk değerde gözlenmiştir. Güçlendirilmemiş dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı (Numune 2) ve çift yüzü sıvalı (Numune 3) deney numunelerin yatay yük taşıma kapasiteleri boş çerçeveye göre sırasıyla yaklaşık 1.9 ve 2.2 kat artmıştır. Bu numuneler kendi aralarında karşılaştırılacak olursa, çift taraflı sıvalı 3. deney numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi tek yüzü sıvalı çerçeveye göre yaklaşık ~1.15 kat fazladır ki, bu da sıvanın numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde çok fazla etkisi olmamakla birlikte olumlu katkı yaptığı şeklinde değerlendirilebilir. Bununla birlikte sıvanın etkisini kaybetmesi sonucu çift yüzü sıvalı numunede sıva malzemesi dökülürken beraberinde tuğla parçalarını da çerçeveden ayırmış ve maksimum yatay yüklere ulaşılan çevrimler sonrasında yatay yük taşıma kapasitesi tek yüzü sıvalı numunenin değerlerinin de altına inmiştir.

Çizelge 4.8'de boş çerçeve ve güçlendirilmemiş tek yüz-çift yüz sıvalı ilk 3 çerçevenin aynı ötelenme oranlarındaki maksimum yatay yük-ötelenme değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8 : İlk 3 numunenin maksimum yatay yük-ötelenme değerleri.

Numune 1		İTME	ÇEKME
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük (kN)
5	0.132	7.8	-8.4
6	0.184	10.7	-10.9
7	0.292	13.7	-14.7
8	0.348	14.6	-16.1
9	0.443	16.2	-18.4
10	0.554	18.0	-20.5
11	0.719	20.3	-23.4
12	0.868	21.8	-25.2
13	1.078	24.6	-27.7
14	1.611	28.6	-30.0
15	2.263	29.4	-29.8
16	3.229	24.0	-27.7
17	4.6	19.6	-27.3

Numune 2		İTME	ÇEKME
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük (kN)
5	0.132	35.0	-32.0
6	0.184	39.2	-32.8
7	0.292	45.0	-37.2
8	0.348	44.3	-36.8
9	0.443	47.8	-38.5
10	0.554	52.0	-40.0
11	0.719	57.2	-42.0
12	0.868	52.0	-38.4
13	1.078	51.9	-42.3
14	1.611	55.4	49.8
15	2.263	53.1	-47.3
16	3.229	45.3	-46.8
17	4.6	31.4	-37.7
18	6.5	24.7	-26.5

Numune 3		İTME	ÇEKME
Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük (kN)
5	0.132	42.8	-41.3
6	0.184	45.9	-46.2
7	0.292	51.8	-52.0
8	0.348	48.1	-52.7
9	0.443	48.2	-55.0
10	0.554	49.1	-52.1
11	0.719	54.8	-49.1
12	0.868	54.3	-46.9
13	1.078	56.8	-47.8
14	1.611	66.0	-55.8
15	2.263	55.9	-51.2
16	3.229	36.9	-41.7
17	4.6	31.0	-30.0
18	6.5	25.3	-24.6

4. Deney numunesinde CFRP uygulamasının doğru şekilde yapılmamasından dolayı numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde istenilen/beklenen değerlere ulaşılamamıştır. Tek yüzü sıvalı tek yüzü güçlendirilmiş 4. numuneyi, güçlendirilmemiş 2 numaralı tek yüzü sıvalı çerçeve ile karşılaştırmak gerekirse yatay yük taşıma kapasitesi hemen hemen aynı devam etmiş, CFRP malzemenin kopmasıyla birlikte numunede gevrek davranış görülmüş ve maksimum yükler 2. ve 3. numunelere göre çok daha düşük değerler göstermiştir.

Karbon liflerin kopması sonucu yatay yük taşıma kapasitesinde meydana gelen ani düşüşler, CFRP'nin çerçeveye olan önemli etkisini gözler önüne sermektedir. Güçlendirilen 3 numunede de CFRP malzemenin kopmasıyla sert düşüşler meydana gelmiştir. 5 numaralı (IF-2P-1FRP) ve 6 numaralı (IF-2P-2FRP) deney numunelerinde CFRP uygulamasının doğru şekilde yapılması sonucu çapraz karbon liflerin kopmasından sonra deney numunelerinin yatay yük taşıma kapasiteleri diğer numunelere göre oldukça fazladır. Tek yüzü güçlendirilmiş çift yüzü sıvalı 5. deney

numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi 3. numuneye oranla 1.6 kat artış göstermiştir. 6. Deney numunesi, çift yüzü sıvalı, çift yüzü güçlendirilmiş numunenin yatay yük taşıma kapasitesi boş çerçeveye oranla 4.7 kat artmış, numune 139.6 kN'luk bir maksimum yatay yük kapasitesine ulaşmıştır.

Bununla birlikte çift yüz ankraj ve çift yüz güçlendirilen 6. Numune, 5. Deney numunesine göre de yatay yük taşıma kapasitesinde olumlu sonuç göstermiştir ki, bu da çift yüz ankrajlamanın numunenin davranışında önemli olduğunu gözler önüne sermiştir. 6. Deney numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi 5 numaralı çerçeveye oranla 1.3 kat fazladır.

Çizelge 4.9'da her numunenin yatay yük-ötelenme değerleri daha rahat karşılaştırma yapılabilmesi için gösterilmektedir.

Çizelge 4.9 : Tüm deney numunelerinin maksimum yatay yük-ötelenme değerleri.

Çevrim	Kat ötelenmesi (%)	Numune 1 BF	Numune 2 IF-1P	Numune 3 IF-2P	Numune 4 IF-1P-1FRP	Numune 5 IF-2P-1FRP	Numune 6 IF-2P-2FRP
		Maksimum yükler (itme / çekme) (kN)					
5	0.132	7.8 / -8.4	35.0 / -32.0	42.8 / -41.3	47.2 / -44.1	49.6 / -46.2	73.0 / -71.0
6	0.184	10.7 / -10.9	39.2 / -32.8	45.9 / -46.2	48.8 / -45.2	59.3 / -55.1	84.7 / -80.2
7	0.292	13.7 / -14.7	45.0 / -37.2	51.8 / -52.0	54.4 / -51.0	74.5 / -68.5	105.3 / -90.5
8	0.348	14.6 / -16.1	44.3 / -36.8	48.1 / -52.7	53.0 / -51.0	74.9 / -72.6	101.8 / -94.6
9	0.443	16.2 / -18.4	47.8 / -38.5	48.2 / -55.0	56.8 / 57.0	80.1 / -71.1	101.6 / -104.3
10	0.554	18.0 / -20.5	52.0 / -40.0	49.1 / -52.1	55.6 / -56.6	82.8 / -75.4	112.2 / -102.8
11	0.719	20.3 / -23.4	57.2 / -42.0	54.8 / -49.1	54.5 / -57.5	91.0 / -82.3	122.4 / -117.4
12	0.868	21.8 / -25.2	52.0 / -38.4	54.3 / -46.9	56.5 / -57.1	92.8 / -84.4	129.5 / -126.2
13	1.078	24.6 / -27.7	51.9 / -42.3	56.8 / -47.8	59.5 / -60.0	97.3 / -90.6	139.6 / -130.4
14	1.611	28.6 / -30.0	55.4 / -49.8	66.0 / -55.8	64.4 / -52.3	108.0 / -96.0	83.8 / -78.6
15	2.263	29.4 / -29.8	53.1 / -47.3	55.9 / -51.2	60.0 / -32.1	80.0 / -49.3	83.7 / -76.8
16	3.229	24.0 / -27.7	45.3 / -46.8	36.9 / -41.7	38.8 / -31.0	58.1 / -47.6	75.2 / -64.8
17	4.6	19.6 / -27.3	31.4 / -37.7	31.0 / -30.0	34.5 / -27.5	50.3 / -40.0	67.0 / -57.2
18	6.5	-	24.7 / -26.5	25.3 / -24.6	27.7 / -21.0	39.5 / -36.5	59.0 / -47.5

4.7.3 Enerji yutma kapasitesi ilişkileri

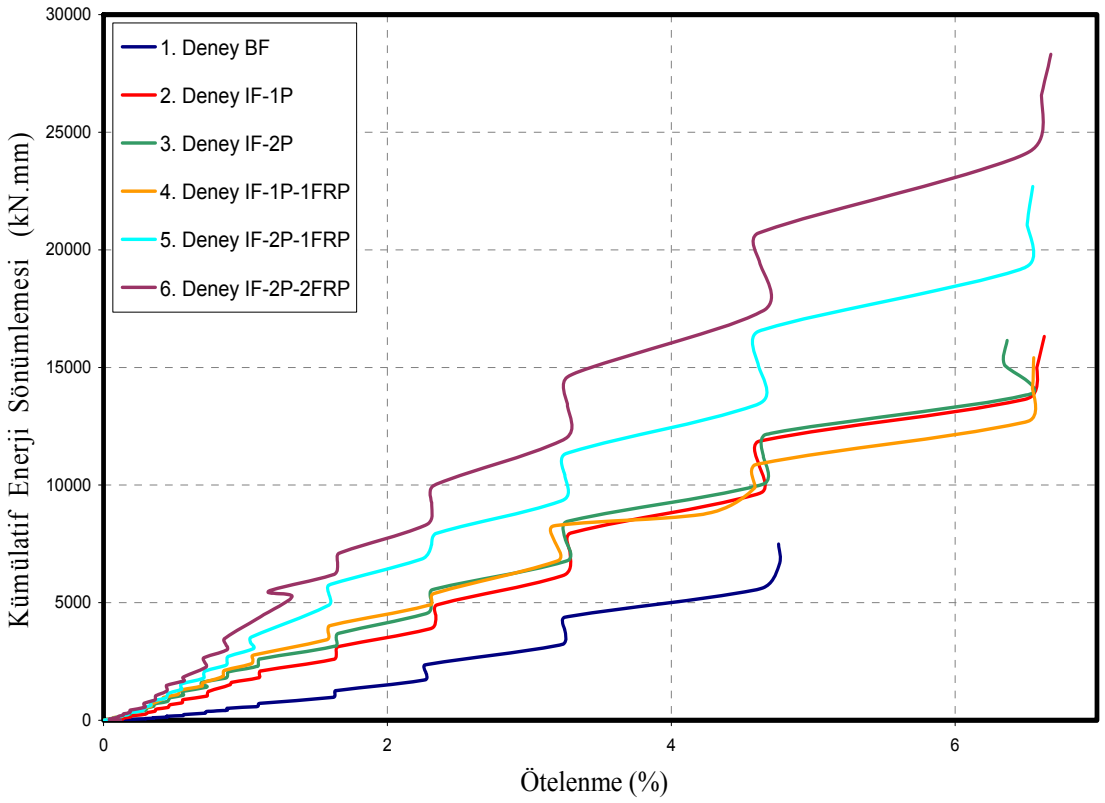
Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında performansı incelenirken enerji yutma kapasiteleri de incelenmiştir. Tersinir tekrarlı yükler altında numunelerin enerji sönümleme kapasiteleri yerdeğiştirme kontrollü çevrimlerin her birine ait tepe noktalarının altında kalan alan değerleri olarak ölçülmüştür. Tüm numunelerin tamamlanmış son çevrime kadar kümülatif enerji yutma kapasiteleri hesaplanmıştır.

Güçlendirilmemiş tek yüz ve çift sıvalı dolgu duvarlı çerçevelerin enerji yutma kapasiteleri referans boş çerçeveye göre oldukça fazladır. Bu numunelerin (2. ve 3. deney numuneleri) enerji yutma kapasiteleri kıyaslanacak olursa birbirine yakın değerler göstermekle beraber çift yüzü sıvalı çerçeve ilk çevrimlerde daha iyi bir performans göstermiş, ilerleyen çevrimlerde sıvanın etkisini kaybetmesiyle yaklaşık aynı değerlerde enerji sönümlemişlerdir. Bununla birlikte dolgu duvarlı ve güçlendirme işleminin uygulanmadığı tek yüzü sıvalı ve çift yüzü sıvalı çerçevelerin enerji sönümleme kapasiteleri boş çerçeveye göre sırasıyla ~1.4 ve ~1.6 kat daha fazladır.

4. deney numunesindeki (IF-1P-1FRP) uygun olmayan güçlendirme yöntemi çerçevenin enerji sönümleme kapasitesine çok fazla bir katkı sağlamamıştır. 4. deney numunesi, güçlendirilmeyen 2 numaralı deney numunesi (1F-1P-1FRP) ile karşılaştırılırsa ilk çevrimlerdeki enerji sönümleme kapasitesi daha fazla iken, ilerleyen çevrimlerde CFRP malzemenin kopmasının ardından güçlendirilmeyen dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı 2. deney numunesinin altında enerji sönümleme değerlerine ulaşmıştır. Bunun nedeni olarak CFRP malzemenin kopması ile birlikte duvardan sıva malzemesini büyük parçalar halinde koparmış olması ve tuğla duvarın da sıvayla birlikte çerçeveden ayrılmış olması şeklinde yorumlanabilir.

Numunelerin enerji yutma değerleri, yerdeğiştirme kontrollü çevrimlerin her birine ait tepe noktalarının altında kalan alan değerleri olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.124'de her numunenin kümülatif enerji sönümleme-ötelenme eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 4.124 : Enerji sönümleme-ötelenme eğrisi.

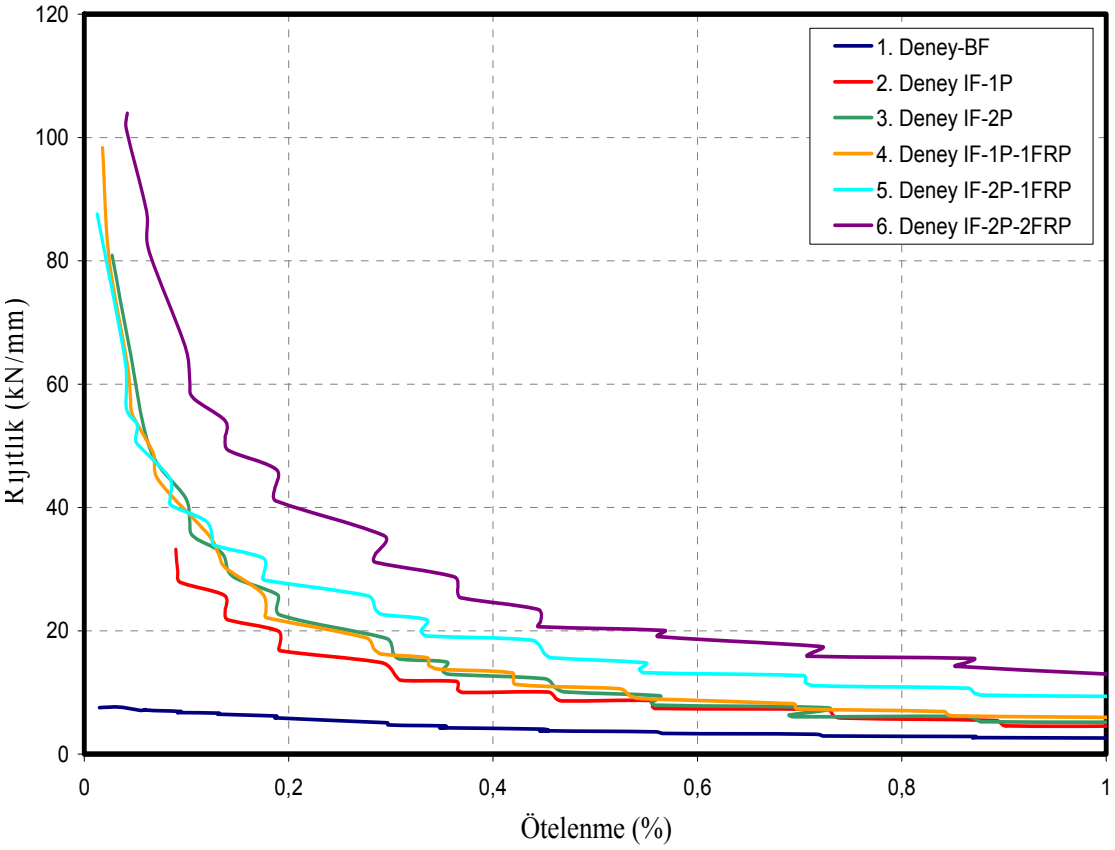
Bu grafiklerden görüleceği gibi dolgu duvarlı çift taraflı ankraj ve güçlendirmenin yapıldığı çerçevenin (Numune 6) enerji sönümleme kapasitesi % 3.229 öteleme oranında boş çerçeveye (Numune 1) göre yaklaşık ~3 kat artmıştır. 5. Deney numunesi, çift yüzü sıvalı tek yüzü CFRP malzemeli deney elemanının enerji sönümlemesi de boş çerçeveye oranla yaklaşık olarak 2.2 kat artış göstermiştir.

Karbon elyafla güçlendirilmiş numuneler de dolgu duvarlı sıvalı numunelere oranla daha fazla enerji sönümlemişlerdir. 6 numaralı çift yüzü sıvalı çift yüzü güçlendirilmiş çerçevenin 3 numaralı çift yüzü sıvalı numuneye göre enerji yutma kapasitesi 1.7 kat fazladır.

4.7.4 Rijitlik ilişkileri

Deney elemanlarının rijitlik değerleri yatay yük-ötelenme eğrilerinden hesaplanmıştır. Tüm numuneler başlangıç ve akma yükü rijitliklerine göre

değerlendirilmiş, dolgu duvarlı çerçevelerin başlangıç rijitliklerinin boş çerçeveye oranla çok büyük değerler gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.125'de tüm numunelerin rijitlik-ötelenme eğrileri karşılaştırılmıştır.

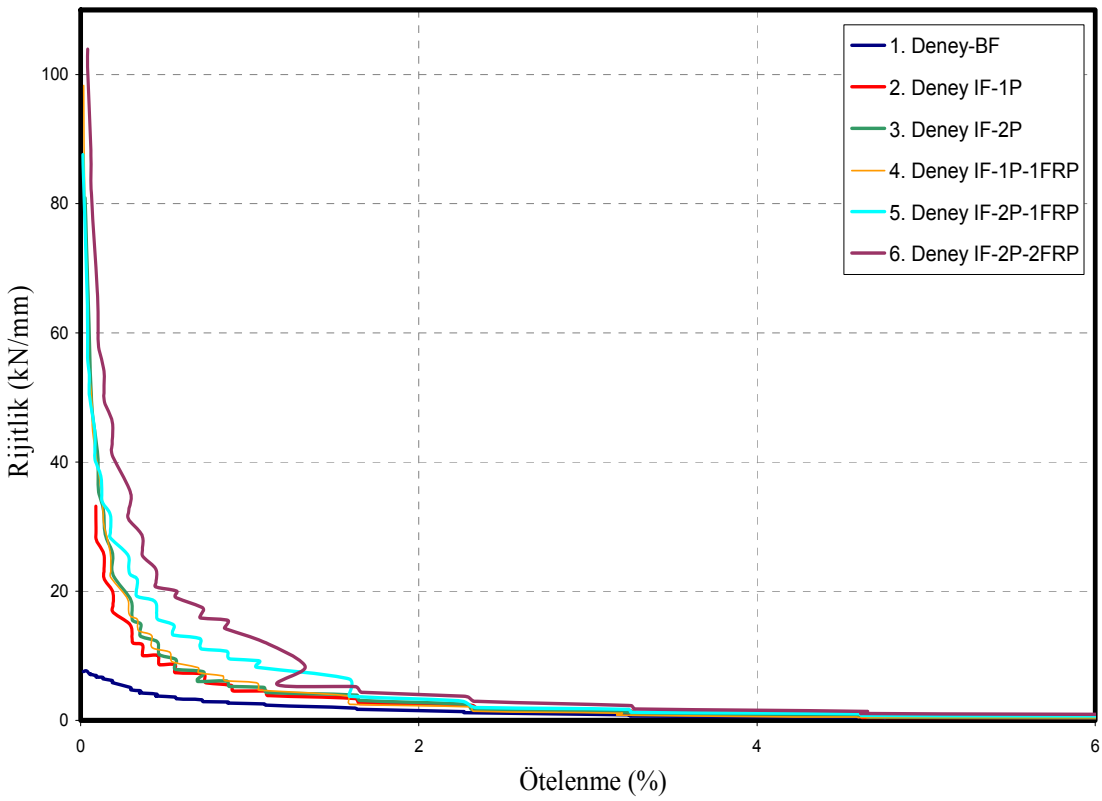


Şekil 4.125 : Rijitlik-ötelenme eğrileri.

Rijitlik-ötelenme eğrilerinden de görüldüğü üzere çift taraflı güçlendirmenin olduğu 6. deney numunesinin rijitliği, referans numunesi olan boş çerçevenin rijitliğinden yaklaşık ~14.7 kat fazladır. Dolgu duvarlı, güçlendirilmemiş 2 ve 3. deney çerçevelerinin rijitliği de başlangıç rijitliklerine göre boş çerçeveye oranla sırasıyla 8.1 ve 10.7 kat daha büyüktür. Ayrıca karbon lifli dolgu duvarın çerçeve rijitliği dolgu duvarlı çerçeveye göre önemli oranda artmıştır Çift taraflı ankraj ve güçlendirmenin de duvarın rijitliğinde katkısı görülmektedir.

CFRP malzemeli ve dolgu duvarlı numunelerin başlangıç rijitlikleri boş çerçeveye oranla oldukça yüksek değerlerde iken, ilerleyen çevrimlerde rijitlikler düşmektedir. Son çevrimlere doğru tüm çerçeve sistemlerindeki rijitlik değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

Şekil 4.126'da tüm ötelenme oranlarını gösteren rijitlik-ötelenme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.126 : Tüm numunelerin ötelenme oranlarını gösteren rijitlik-ötelenme eğrisi.

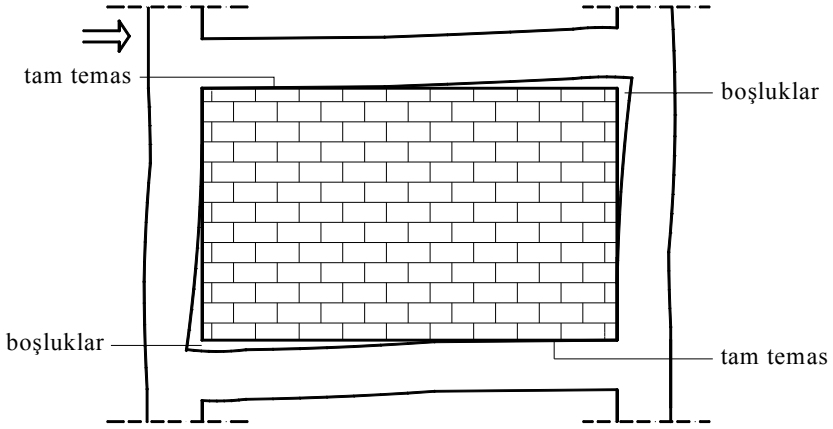
5. ANALİTİK ÇALIŞMA

5.1 Dolgu Duvarlı Çerçeveler İçin Kullanılan Matematik Modeller

Betonarme çerçeveli dolgu duvarlı sistemler, en çok kullanılan yapı sistemleri olmalarına karşın kullanılan hesap yöntemlerinde, dolgu duvarların yapı rijitliğine etkisi çoğu zaman dikkate alınmamaktadır. Bunun nedeni olarak duvarların katkısını dikkate alan hesap modelleri oluşturmanın güç ve karmaşık olması, hesap yöntemlerinin en azından proje tasarımı seviyesinde olmaması, yapının enerji yutma kapasitesine ve rijitliğine katkısı genel olarak bilinmesine rağmen güvenli tarafta kalınması için hesaplarda duvarların etkisinin ihmal edilmesi olarak düşünülebilir [63].

Dolgu duvarların sisteme etkilerinin göz önüne alınabilmesi için dolgu duvarlı çerçeve davranışının modellenmesi gerekmektedir. Yüklerin artışına bağlı olarak dolgu duvarlı çerçevede, duvar ve çerçeve arasında meydana gelen ayrılma ve duvarda oluşan çatlaklar davranışın modellenmesi açısından önemli olmaktadır.

Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yükler altındaki davranışının ve maksimum yük kapasitesinin belirlenmesi karmaşık ve kesin olmayan bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Dolgu duvarların yatay yükler karşısındaki davranışının dayanımının belirlenmesi sadece dolgu duvar özelliklerine ve onu çevreleyen çerçevenin özelliklerine bağlı değildir. Dolgu duvarların davranışının belirlenmesi amacıyla birçok analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Araştırmalar göstermiştir ki duvarın yüklendiği köşegen doğrultusunda, duvar ortasında diyagonal çatlaklar oluşmakta ve yük almayan köşegen doğrultusundaki köşelerde çerçeve ile duvar arasında boşluklar meydana gelmektedir. Buna karşılık duvarın yük aldığı köşegen doğrultusundaki köşelerde ise duvar ile çerçeve arasında tam bir birleşme oluşmaktadır (Şekil 5.1) [6].



Şekil 5.1: Yatay yük etkisindeki dolgu duvar-betonarme çerçeve.

Dolgu duvarlı çerçevelerin modellenmesinde eşdeğer basınç çubuğu modeli ile makro modelleme ve sonlu elemanlar modeli ile modelleme olmak üzere iki farklı yöntem bulunmaktadır. Çatlak oluşumu, duvar-çerçeve etkileşimi, göçme şekilleri, maksimum yük ve yatay yerdeğiştirme değerleri gibi yerel etkiler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak önceden tahmin edilebilmektedir. Fakat bununla birlikte sonlu elamanlar yöntemi ile mikro ölçekte modelleme çok fazla parametre gereksinimi, çok detaylı ve çok uzun süreli çalışma ihtiyacı nedeniyle tercih edilmemektedir. Makro modelleme ise sonlu elemanlarla modellemeye göre çok daha kolay, hızlı ve etkili bir yöntemdir. Makro modelleme, süneklik kapasitesi, enerji dağılımı, göçme yükü seviyesi gibi durumlarla ilgili çerçevelerin global davranışlarını tahmin etmede uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak bununla birlikte makro modelleme, çerçevenin göçme mekanizması, duvar-çerçeve etkileşim gibi durumlarla ilgili detaylı bilgi verememektedir. Bu çalışmanın amacı da kolay ve güvenilir basit bir model geliştirerek analitik çözümden elde edilen sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırmaktır. Çalışma boyunca uygulanacak makro modellemede eşdeğer basınç çubuğu modeli kullanılmış, eşdeğer basınç çubuğu genişliği ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

5.2 Doğrusal Olmayan Statik Yöntem ile Yapı Performansının Belirlenmesi

Doğrusal olmayan yapısal analiz, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılan ve yapının elastik ötesi davranışını belirlemede kullanılan analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi günümüzde karşımıza en çok iki şekilde çıkmaktadır.

Bunlar doğrusal olmayan statik hesap ve doğrusal olmayan dinamik zaman tanım alanında analizdir. Bu analizlerden doğrusal olmayan dinamik zaman tanım alanında analizler en çok güvenilen analizlerdir. Ancak bu analizlerin karmaşıklığı ve zaman alıcılığı, doğrusal olmayan statik itme analizlerinin kullanılmasına sebep olmaktadır. FEMA 356'da [64] doğrusal olmayan statik itme analizlerinin kullanılması desteklenmekte ve bu analizlerle yapısal davranışın belirlenmesi için yöntemler verilmektedir [65]. Elastik ötesi statik itme analizi yapılarak yapıların kapasite eğrileri, yatay yer değiştirmeleri, göreli kat ötelemeleri, katlardaki maksimum plastik dönmeler ve plastikleşen kesitlerin sistemdeki dağılımları belirlenebilmektedir [66]. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde ve analitik çalışmada doğrusal olmayan statik itme analizi kullanılmıştır.

Yapıların doğrusal hesap yöntemleri ile yapılan analizlerinde doğrusal elastik teori geçerlidir. Yapı malzemesinin doğrusal elastik davrandığı ve yer değiştirmelerin küçük olduğu kabulleri geçerli olmaktadır. Doğrusal analiz yöntemleri ile yapılan hesaplar sonucu, göçmeye karşı sabit bir güvenlik sağlanamazken, elastik sınır ötesindeki taşıma kapasitesinden de faydalanılamaz. Doğrusal analiz yöntemleri, yapı sistemlerinin elastik kapasiteleri ve ilk akma bölgesi hakkında iyi sonuçlar vermekle birlikte, yapının göçme mekanizmasının doğrusal analiz yöntemleri ile belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Doğrusal olmayan statik itme analizi temel olarak, yapının yatay kuvvetler altındaki dayanımını ifade eden yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elde edilmesine ve bunun değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Yapı sistemlerinin deprem performanslarının belirlenmesinde doğrusal yöntemin kullanılmış olması büyük bir kolaylık getirmekte ve mevcut bilgisayar çözümleme programlarının kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Buna karşılık doğrusal olmayan değerlendirme yöntemi elastik ötesi davranışı daha gerçekçi biçimde ele almakta ise de iki bakımdan zorluk ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, taşıyıcı sisteme ait daha çok parametreye ihtiyaç duyulmasıdır. Bu, özellikle mevcut binalar için bazen aşılması çok zor olan büyük belirsizlikler ortaya çıkarmaktadır. İkinci zorluk ise, mevcut doğrusal çözüm programlarının kullanılamaması ve çok daha ayrıntılı çözüm tekniklerini içeren programlara ihtiyaç duyulmasıdır [67].

Doğrusal olmayan davranış esaslı yöntemler üzerindeki çalışmalar uzun yıllara dayanmaktadır. Bu çalışmalardan önemli olanlar, FEMA273, FEMA356 ve ATC40 raporlarıdır. FEMA273 ve FEMA356'da doğrusal değerlendirme yöntemi de bulunmaktadır. FEMA 356'nın doğrusal olmayan yöntem yaklaşımı, ATC40 yaklaşımının genişletilmesi şeklinde oluşturulmuştur.

Yakın zamana kadar ülkemizde olası deprem etkileri altında mevcut binaların taşıyıcı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışları ve bu etkiler altında binanın göstereceği deprem performansı tahmin edilememekteydi. Bu gereksinim sonucu olarak, mevcut Deprem Yönetmeliği 1998'in bazı bölümlerinde kapsamlı, bazı bölümlerinde ise küçük değişiklikler yapılarak ve mevcut binaların değerlendirilmesi ile ilgili yeni bölüm eklenerek Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007 hazırlanmıştır [67].

DBYBHY 2007 [68] esaslarına göre tasarlanmış mevcut betonarme binada aynı yönetmelikte yer alan doğrusal ve doğrusal olmayan statik hesap yöntemleri ile belirlenen kesit hasar bölgeleri önemli ölçüde birbirine yakın çıkmıştır. Doğrusal olmayan statik hesap yöntemi ile belirlenen kesit hasar bölgeleri, gerçek davranışa daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum, mevcut binaların deprem güvenliği ve performansının değerlendirmesinde doğrusal olmayan yöntemin üstünlüğünü göstermektedir.

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizlerinde yapılan çözümler belirli kabuller altında geçerlidir. Deprem mühendisliği alanında yapılan çalışmalarda yapılan kabullerin önemi çok büyüktür. Bu çalışmada da modellemede ve analizlerde belirli kabuller yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapılmış olan kabuller altında geçerlidir.

5.2.1 Plastik mafsal teorisi

Çalışmada, malzemenin doğrusal olmayan davranışını dikkate almak üzere plastik mafsal teorisi kullanılmıştır. Buna göre, plastik şekil değiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin doğrusal elastik davranış gösterdiği kabulü yapılmıştır [65].

Doğrusal olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde artan yükler altında iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırını aşmakta ve bu kesitler civarında

plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Süneklik oranının büyük olduğu ve doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerinin "Plastik Mafsal" adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayılmaktadır.

Çerçeve sistemlerde plastik mafsallar kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, kiriş açıklık ortasında, kiriş veya kolonda tekil yüklerin etkidiği yerlerde, zemin kat kolonlarının temele bağlandığı noktalar gibi kesit zorlarının büyük olduğu kesitlerde meydana gelmektedir.

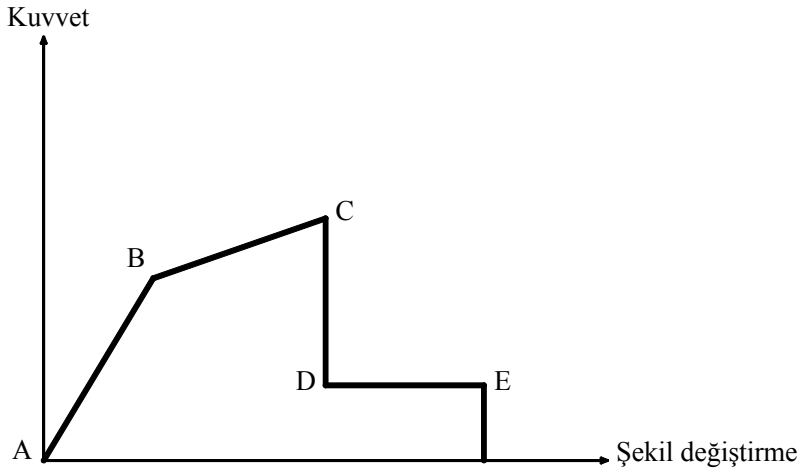
Artan dış yükler altında plastik mafsalın dönmesi artarak dönme kapasitesi adı verilen bir sınır değere eşit olunca, meydana gelen büyük plastik şekildeğiştirmeler nedeniyle kesit kullanılamaz hale gelir. Yapı sisteminin bir veya daha çok kesitindeki plastik mafsal dönmelerinin dönme kapasitesine ulaşması ise, yapının mekanizma durumuna ulaşmasına ve tümünün kullanılamaz hale gelmesine, göçmesine neden olmaktadır [6].

Deneyleri tamamlanan numunelerin bilgisayar yardımı ile çözümlemesi yapılmıştır. SAP 2000 [69] bilgisayar programı ile betonarme çerçevelere doğrusal olmayan yük artımı yöntemi uygulanmıştır. Doğrusal olmayan yük artımı için DBYBHY 2007 [68] yönetmelik esasları dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında yatay yükler için hedeflenen yerdeğiştirme değerine kadar yük parametresini artırarak yerdeğiştirme kontrollü analiz yapılmıştır. Belirli bir yük parametresinden sonra sistemde yeteri kadar plastik mafsalların oluşmasıyla sistem mekanizma durumuna gelmekte ve bu noktadan sonra yatay yük-yerdeğiştirme bağıntısında artan yerdeğiştirme değerlerine karşılık azalan yatay yük değerleri karşı gelmektedir. Bu aşamada sistemin yatay yük taşıma kapasitesine ulaştığı anlaşılmaktadır.

5.2.1.1 Plastik mafsal şekildeğiştirme sınır durumları

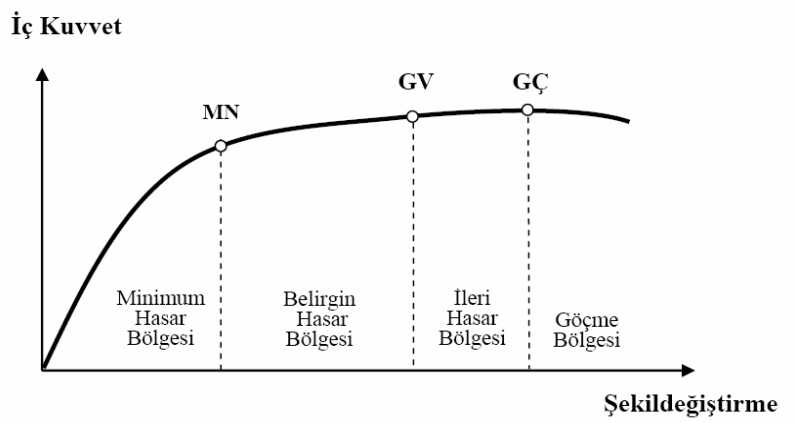
Doğrusal olmayan statik çözümlemelerde kesitin doğrusal olmayan davranışını ifade etmek üzere Şekil 5.2'deki yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılır. Yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin karakteristik köşeleri olan A-B-C-D-E noktalarının tanımı kesitin geometrik özelliklerine, malzeme tanımına ve yükleme koşullarına göre değişir [70].

Plastik mafsal şekildeğiştirmeleri için FEMA 356 tarafından önerilen özellikler Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.2'de gösterilen plastik mafsal yatay yük-şekildeğiştirme ilişkisinde A ve B noktaları arasında kesit doğrusal davranmakta, B noktasında plastik şekildeğiştirme başlangıcı olarak tanımlanmakta, C noktasında kesit taşıma gücü değerine ulaşmakta, D noktasından sonra artan şekildeğiştirme durumları için kesit taşıma kapasitesi küçük değerler almakta ve E noktasından sonra kesit taşıma gücünü tamamen kaybetmiş olmaktadır [64].



Şekil 5.2 : Plastik mafsal kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi.

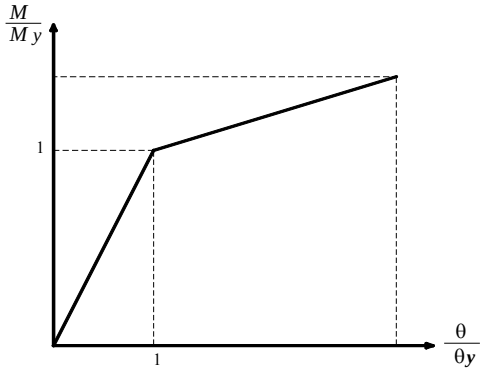
Kesit taşıma gücüne erişinceye kadar plastik şekildeğiştirme durumları için DBYBHY 2007'de [68] 3 sınır durum tanımlanmıştır. Bunlar Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ)'dır. Minimum hasar sınırı ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır. Kritik kesitlerinin hasarı MN'ye ulaşmayan elemanlar "Minimum Hasar Bölgesi'nde, "MN" ile "GV" arasında kalan elemanlar "Belirgin Hasar Bölgesi'nde, "GV" ve "GÇ" arasında kalan elemanlar "İleri Hasar Bölgesi'nde, "GÇ'yi aşan elemanlar ise "Göçme Bölgesi'nde yer alırlar (Şekil 5.3) [68].



Şekil 5.3 : Kesit hasar bölgeleri.

Bu çalışmada kullanılan SAP 2000 programında, elemanların doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için farklı mafsal tipleri kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında dolgu duvarları temsil eden eşdeğer sanal çubuklarının doğrusal olmayan davranışlarını tanımlamak için P mafsalı ve yatay kuvvete maruz kalmış elemanlar için M3 plastik mafsalı kullanılmıştır. Modellemeyi gerçekleştirmek için eleman ve kesit özelliklerini, malzeme ve plastik mafsal özelliklerini ve yük değerlerini modele girmek gerekir. Doğrusal olmama durumu doğrusal olmayan mafsal tanımlamalarıyla numunelere verilmektedir. Xtract [71] programı ile elde edilen kolon-kiriş kesitlerinin moment-eğrilik bağıntıları bu mafsal türüne giriş bilgisi olarak girilmiştir.

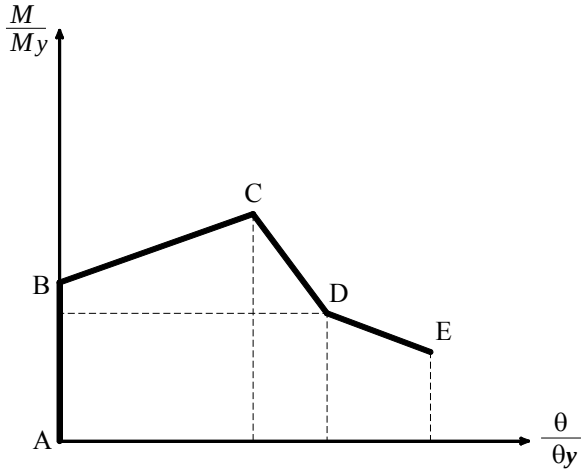
Şekil 5.4'de görüldüğü gibi M3 mafsalı moment-dönme ilişkisinde momentler kesitte plastik şekildeğiştirmelerin başladığı M_y momentine göre, dönme değerleri ise kesitte plastik şekildeğiştirmelerin başladığı θ_y dönmesine göre oranlanarak normalize edilmiş şekilde ifade edilmiştir. (1.1) noktası koordinatı plastik şekildeğiştirmelerin başladığı noktayı temsil etmektedir.



Şekil 5.4 : M3 mafsalı moment-dönme ilişkisi.

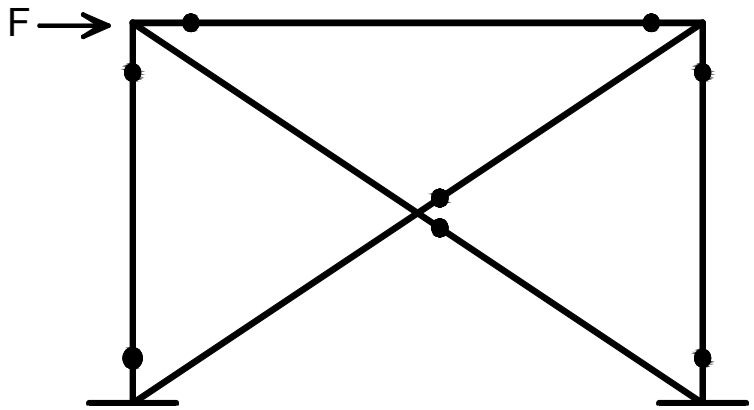
Plastik mafsallar çerçeve elemanlarının modellenmesinde önemli rol üstlenmişlerdir. Plastik mafsalların bulunma durumu sistemin göçmesine yol açmamakla birlikte, mafsallar yeterli sayıya ulaşınca sistem göçmektedir. Tanımlanan plastik mafsalın uzunluğu, boyuna donatı miktarı, enine donatı aralıkları, ankraj durumu gibi birçok parametreye göre değişkenlik göstermektedir. Bununla ilgili, doğrusal elastik olmayan davranışın idealleştirilmesi için, DBYBHY 2007, ATC 40 ve ACI 318-99'da plastik mafsal uzunluğunun, kesitin eğilmeye dik olan kenarının yarısı kadar alınabileceği vurgulanmıştır.

Modellerin elastik olmayan davranışını analiz edebilmek için kullanılan mafsallarda A,B,C,D,E değerlerine karşılık gelen oranlar her numune için ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : Çerçevedeki M3 mafsalları moment-eğrilik ilişkisi.

Her numunenin maksimum kapasitesini ve davranışını gözlemleyebilmek için itme analizleri yapılmıştır. Numunelerin artan yatay yükler altındaki göçme yükleri hesaplanmış ve zarf eğrileri elde edilmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ve moment-eğrilik ilişkileri 8 noktadan oluşabilecek plastik mafsal itme eğrisini tanımlamak için kullanılmıştır. İtme eğrilerini elde etmek için plastik mafsallar tanımlanmış, tanımlanan plastik mafsal noktaları Şekil 5.6'da sunulmuştur. Dolgu duvarlı çerçevenin doğrusal olmayan davranışını açıklamak için doğrusal olmayan davranışın beklendiği bölgelerde plastik mafsallar tanımlanmıştır. Modelde tüm plastik deformasyonların plastik mafsallarda olduğu tanımlanmaktadır. Plastik mafsallar harici bölgelerde elemanlar elastik eleman olarak davranmaktadır.

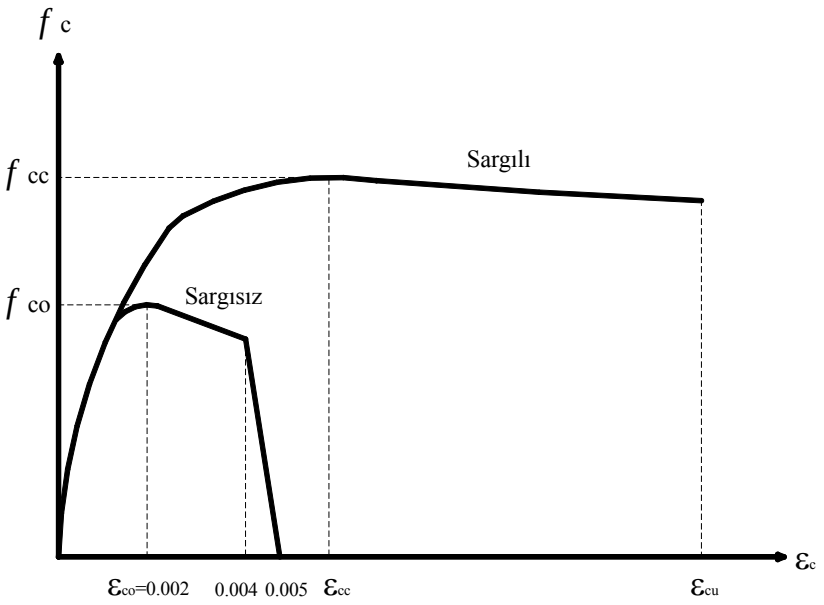


Şekil 5.6 : Çerçeve numuneleri için tanımlanan plastik mafsal noktaları.

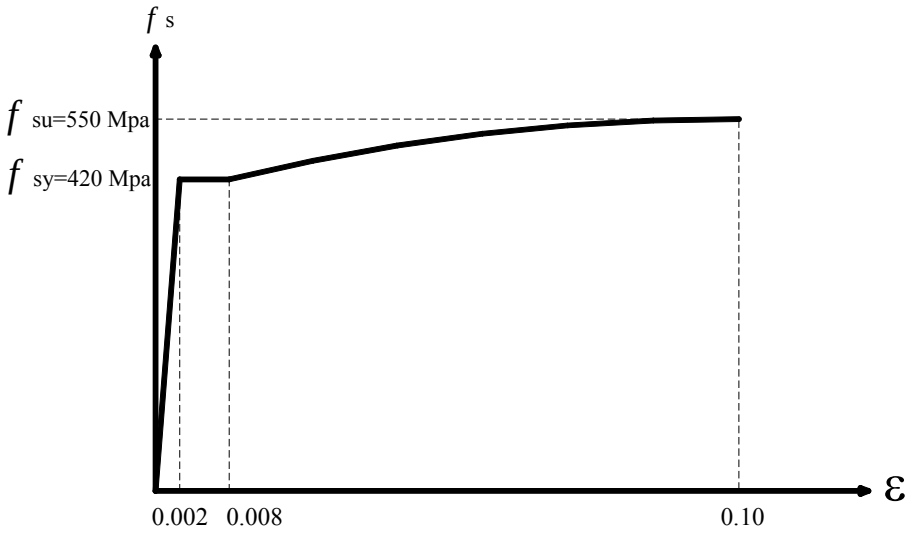
Yeterli sayıda plastik mafsal oluştuğu durumda göçme mekanizması oluşur. Çerçeveli yapılarda göçme mekanizmasının kolonlarda olması istenmez. Dolgu duvarlı çerçevelerde göçme durumu, köşe ezilmesi, kesme kırılması, diyagonal basınç kırılması ve çerçeve göçmesi şeklinde olmaktadır. Hasar oluşum sırası ve plastik mafsal oluşum bölgeleri çerçevenin göçme şekli ile ilgili bir fikir verebilir.

Kolon ve kirişlerin moment-eğrilik diyagramlarını elde edebilmek için Xtract programından yararlanılmıştır. Xtract programı betonarme kesiti sonlu eleman ağına bölmekte, sargılı ve sargısız beton için farklı davranış modelleri kullanabilmektedir [72].

Kesitin sargısız kabuk betonu, sargılı gövde betonu ve donatı çeliği olmak üzere üç bileşenden oluştuğu kabul edilmiştir. Kesit moment-eğrilik ilişkisinin hesabında; S420 donatı çeliği modeli ve beton malzeme modelleri (Mander sargılı ve sargısız beton modeli) için DBYBHY 2007'de tanımlanan modeller kullanılmıştır [68]. Beton ve çelik için davranış modellerinin oluşturulmasında, yapılan malzeme deneylerinde elde edilen ilgili ortalama büyüklükler kullanılmıştır. Numuneler için, Xtract programına girilen malzeme davranış modelleri Şekil 5.7 ve 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.7 : Beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 5.8 : Donatı çeliği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

SAP2000 programında hazırlanan kuramsal modelde, yapı sistemini oluşturan her farklı kesit için bünye bağıntısının tanımlanması gerekmektedir. Çatlama momenti, akma momenti ve en büyük moment ile bunlara karşı gelen eğrilik değerleri tanımlanmaktadır. Girilen moment-eğrilik ilişkisi zarf eğrisinin içerisine, parametreleri ilgili malzeme ve kesit özelliklerine göre kalibre edilmiş tekrarlı çevrimlerin yerleştirilmesi gerekmektedir.

Bilgisayar programı SAP 2000 [69], mafsalın atandığı kesitteki iç kuvvetlerinin, kullanıcı tarafından atanan akma koşuluna ulaşıp ulaşmadığını kontrol ederek mafsalların akma noktasına eriştiğini kontrol etmektedir. SAP 2000 ile doğrusal olmayan yük artırımı yapılırken izlenen yol aşağıdaki gibidir;

- Yapı elemanlarının oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin tanıtılması
- Kesit özelliklerinin girilmesi
- Yük parametresinin girilmesi
- Plastik mafsal özelliklerinin tanıtılması
- Plastik mafsalların yapı elemanlarına atanması
- Doğrusal olmayan analizin tanımlanması
- Çözüm

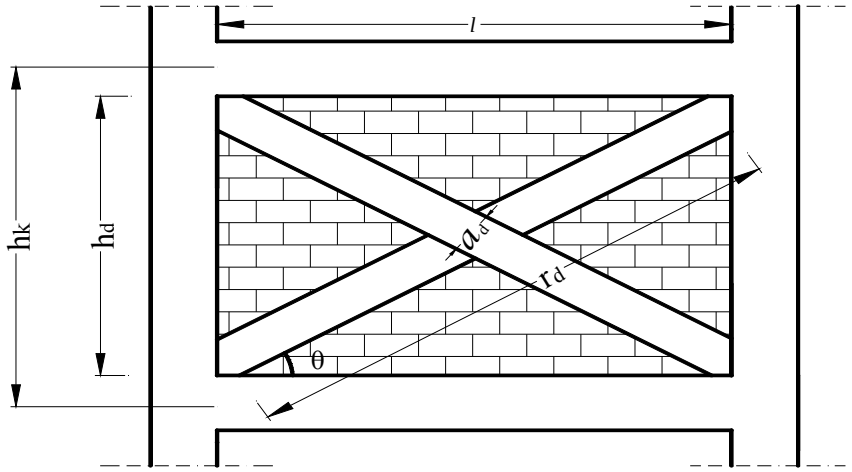
5.2.2 Eşdeğer basınç çubuğu modeli

Yapısal davranışı tam olarak yansıtmamakla birlikte betonarme yapıların hesaplarında dikkate alınmak üzere dolgu duvarlar kırılma davranışlarına bağlı olarak çeşitli şekillerde modellenmektedir. Dolgu duvarların kırılma davranışları malzeme (tuğla, harç gibi) özelliklerine, mimari gereksinimlere bağlı olarak ortaya çıkan boşluklara (kapı, pencere boşluğu gibi) ve çerçevenin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Çalışmada literatürde de kabul gören dolgu duvarların iki ucu mafsallı eşdeğer diyagonal basınç çubukları olarak modellemesi gerçekleştirilmiştir [65]. Eşdeğer basınç çubuğu modelinin kolay, basit ve hızlı bir yöntem olmasından dolayı modellemede bu yöntemden faydalanılmıştır.

Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı, dolgulu çerçeveler için çok basit bir hesap tarzı getirmektedir. Bu yaklaşımda, kat hizalarına etki eden yatay kuvvetler altındaki dolgunun, kuvvetin etki ettiği bu düğüm noktası ile diyagonaldeki düğüm noktası arasında bir basınç çubuğu gibi davrandığı varsayılmaktadır. Çerçeve ve dolgunun diyagonal uçlarda temas halinde olduğu ve yatay yük etkisinde yapının tüm serbest düğüm noktalarında aynı yerdeğiştirmeyi yapacağı kabul edilmiştir [63].

Eşdeğer basınç çubuğu, yükün etki ettiği köşeler arasında tek çubuk olarak modellenmiştir. Dolgu duvar modeli için P plastik mafsalı duvarın orta noktasına yerleştirilmiştir. Plastik mafsal uzunluğu çubuğun köşegen uzunluğudur. Önerilen yarı-deneysel model en-boy oranına duyarlı bir modeldir. Çubuk uçları mafsallı olarak tanımlanmıştır.

Dolgu duvar davranışının, eşdeğer sanal basınç çubuğu olarak tanımlanabilmesi için DBYBHY 2007'de birçok parametre kullanılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğu modeli Şekil 5.9'da gösterilmektedir. a_{duvar} eşdeğer sanal çubuk genişliği (mm), h_k kolon boyu (mm), h_d duvar boyu (mm), r_d dolgu duvar köşegen uzunluğu (mm), t_{duvar} duvar kalınlığı, I_k kolon atalet momenti, E_{duvar} duvar elastisite modülü, θ eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açıdır. DBYBHY 2007'de tanımlanan eşdeğer basınç çubuğu denklemleri 5.1 ve 5.2'de verilmiştir [68].



Şekil 5.9 : Eşdeğer basınç çubuğu modeli.

$$a_{duvar} = 0.175\ (\lambda_{duvar}\ h_k)^{-0.4}\ r_d \qquad \textbf{(5.1)}$$

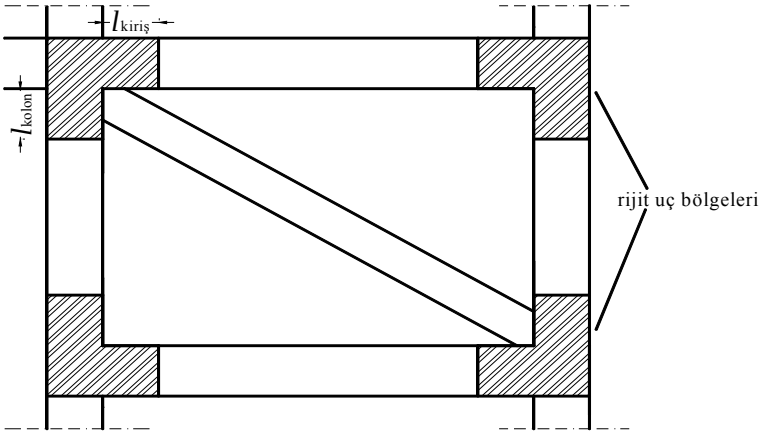
$$\lambda_{duvar} = \left[\frac{E_{duvar}\, t_{duvar} \sin 2\theta}{4 E_c\, I_k\, h_{duvar}}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad \textbf{(5.2)}$$

FEMA 356 ve DBYBHY 2007 yönetmeliklerinde, duvarın başlangıç rijitliğini belirlemek için Denklem 5.1 ve 5.2 kullanılmıştır. Bununla birlikte eşdeğer çubuk kalınlığı, dolgu duvar uygulama modeline ya da dolgu duvar üzerinde güçlendirme

yapılmış ise güçlendirme malzemelerine göre değişkenlik gösterebilir. Eşdeğer çubuk kalınlığı FEMA 356'da belirtilen güçlendirilmemiş dolgu duvar kalınlığı olarak alınmıştır. FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı DBYBHY 2007'deki güçlendirilmiş duvar modeli için önerilen kalınlıkla aynıdır.

Klinger [79], çalışmalarında delikli tuğla duvar kullanmasına rağmen duvar kalınlığını, eşdeğer çubuk kalınlığı olarak almıştır.

Eşdeğer basınç çubuğu ile modellenen çerçeve sistemi, gerçekteki duvarlı sisteme göre duvarın onu çerçeveleyen elemanlara yaptığı tutma etkisinin eşdeğer çubuk tarafından yapılamaması nedeniyle daha esnek olmaktadır. Bu etkinin sistem davranışına yansıtılabilmesi için çerçeve elemanlarının uçlarında belirli uzunluktaki bölümleri rijit bölgeler olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5.10) [6].



Şekil 5.10 : Rijit uç bölgeleri.

Eşdeğer basınç çubuğu modeli üzerinde ilk olarak 1960'lı yıllarda Polyakov [73] ve Holmes [74] bir takım çalışmalar yapmışlardır. Daha sonra Smith ve Carter [75] önceki çalışmaları düzenleyerek, rijitlik ve eşdeğer çubuk genişliği ile ilgili teorik bağıntılar önermişlerdir. Bu bağıntılar daha sonraki çalışmalarda da kullanılmıştır. Smith ve Carter [79], çubuk genişliğinin, panel üzerindeki yanal yük, dolgu duvarın özellikleri, dolgu duvar boyutları ve çerçeve-duvar arası temas yüzeyi ile ilişkisini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, kiriş rijitliğinin çerçevenin davranışını kolonun etkisi kadar çok etkilemediği belirtilmiş olup, kiriş ile duvar panelinin temas yüzeyinin yarısı hesaplamalara dahil edilmiştir. Smith ve Carter'ın [79] eşdeğer basınç çubuğu genişliği denklemi Denklem 5.3'de verilmiştir.

$$\frac{\alpha}{h}=\frac{\pi}{2\lambda h} \qquad \lambda=\sqrt[4]{\frac{E_{in}\times t_{in}\times \sin 2\theta}{4\times E_c\times I_c\times h_{in}}} \tag{5.3}$$

λh : duvar-çerçeve rijitlik ilişkisi parametresi (boyutsuz parametre)

E_{in} : duvar elastisite modülü

t_{in} : duvar kalınlığı

θ : eşdeğer basınç çubuğunun yatay ile olan açısı

E_c : kolonun elastisite modülü

I_c : kolonun atalet momenti

h_{in} : duvar panelinin yüksekliği

h : kat yüksekliği

α : duvar ile kolon arası temas uzunluğu

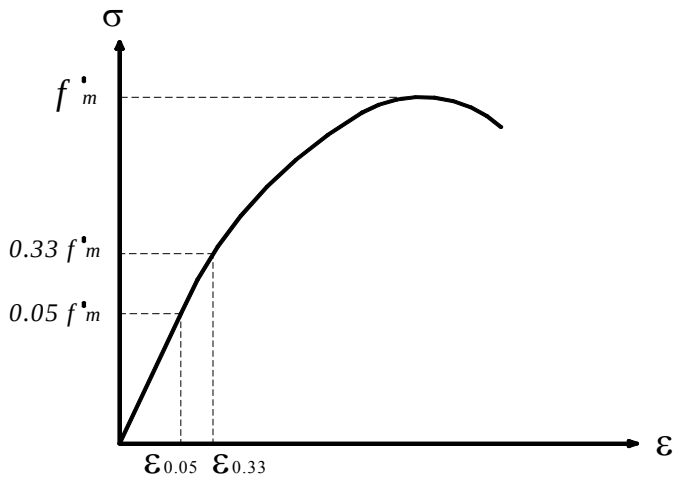
Deprem gibi yatay yükler etkisinde binada oluşacak kesme kuvvetlerinin deneysel sonuçlarının Smith ve Carter [75] tarafından önerilen dolgu duvarın basınç çubuğu olarak modellenmesiyle yaptığı analiz sonuçlarıyla %11.7 farkla benzer olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar bize dolgu duvarı eşdeğer diyagonal basınç çubuğu şeklinde modellemenin bina analizlerinde doğru ve güvenilir olduğu görüşünü vermektedir.

Duvar malzemesinin dayanımı çerçevenin davranışını değiştirmede doğrudan etkilidir. Bu durum, duvar malzemesinin kalınlığı ve elastisite modülü parametrelerinin doğru bir şekilde analizlere girmesi gerçeğini ortaya koymaktadır. [63].

Elastisite modülü, dolgu duvarın çerçeve içindeki davranışını ve rijitliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Dolgu duvar homojen bir yapıya sahip olmadığı için yatay, düşey ve çapraz yönlerindeki elastisite modülü birbirinden farklı değerler alacaktır. Tuğla basınç dayanımı, harç tabakası basınç dayanımı, tuğla yüksekliği ve harç tabakası kalınlığı gibi özellikler dolgu duvar elastisite modülünü etkilemektedir. Bununla birlikte sıvalı ve sıvasız duvarlarda elastisite modülü farklı değerler almakta, sıva kalınlığı da elastisite modülünü etkilemektedir [6].

Dolgu duvar elastisite modülünü belirleyebilmek için yapılan bazı kuramsal ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda dolgu duvar elastisite modülünün bulunması için farklı yöntemler ortaya konmuştur. Bu sonuçlar ve yöntemler ile dolgu duvarların elastisite modülü hesaplanabilmektedir.

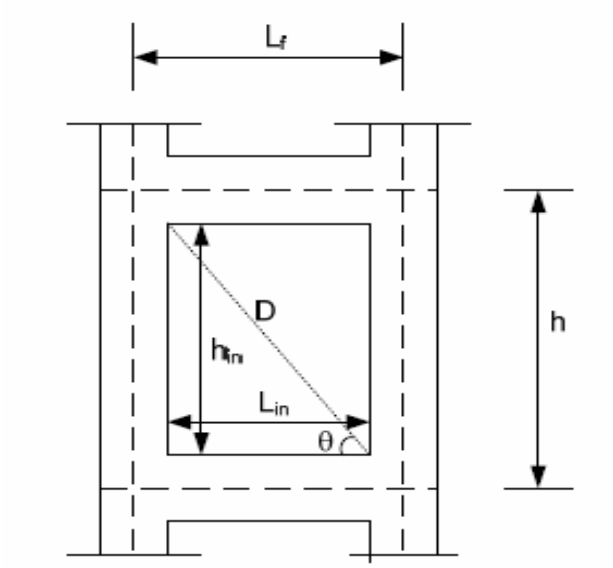
Kuramsal olarak yapılan çalışmalarda dolgu duvar elastisite modülü genellikle duvar basınç dayanımının 'f' bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda ise, duvar elemanının artan yükler altındaki yatay yük-yerdeğiştirme bağıntısı elde edilmekte ve bu bağıntıdan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine geçilmektedir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin eğimi dolgu duvar elastisite modülünü vermektedir. ACI 530-95 [76] yönetmeliğine göre dolgu duvar basınç deneyinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme bağıntısında en büyük gerilme değerinin "f", %5 ve %33'lük değerine karşılık gelen iki nokta arasındaki doğrunun eğimi dolgu duvar elastisite modülü değeri olarak kabul edilmektedir (Şekil 5.11). Dolgu duvar elastisite modülü Denklem 5.4 ile hesaplanabilmektedir. Tez çalışmasında dolgu duvar rijitlik değerleri bu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.11 : Dolgu duvar gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

$$E_m = (\sigma_{0.33} - \sigma_{0.05}) \; / \; (\varepsilon_{0.33} - \varepsilon_{0.05}) \qquad \textbf{(5.4)}$$

Mainstone [77] üzerinde çalıştığı 1/1 ve küçük ölçekli deneyler sonucu eşdeğer çubuk modeli genişliği ile ilgili deneysel formüller geliştirmiştir (Şekil 5.12) (5.1).



Şekil 5.12 : Dolgu duvarlı çerçeve parametreleri.

Eşdeğer sanal çubuğun genişliğini hesaplamak için farklı araştırmacılar değişik bağıntılar önermişlerdir. Paulay ve Priestley [78], eşdeğer sanal çubuk genişliği için belirli bir katsayı önermişlerdir. Bu katsayı eşdeğer sanal çubuk uzunluğunun %12.5-%25'i arasında bir değer olarak belirtilmiştir (5.5).

$$a_d = \%12.5\ r_d - \%25\ r_d \qquad \textbf{(5.5)}$$

Denklemde r_d olarak ifade edilen eşdeğer basınç çubuğu uzunluğu ise Denklem 5.6 bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$r_d = \sqrt{h_k^2 + l^2} \qquad \textbf{(5.6)}$$

Klinger [79], yaptığı çalışmada, etkin çubuk genişliğinin genellikle duvar çapraz karbon lifli kompozit genişliğinin 3-8 katı aralığında olduğunu vurgulamıştır.

Al-Chaar ve diğerleri [80], FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeveler için analitik bir formül önermiş ve etkili net çubuk kalınlığı hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Dolgu duvarda açıklık bulunması, duvar hasar durumu ve FRP uygulamasına göre etkili basınç çubuğu genişliğini hesaplamak için 5.7 formülünü

geliştirmişlerdir. Al-Chaar ve diğerleri [80], önerdikleri yöntemde artan diyagonal yükler altında çubuk alanındaki değişimi dikkate almamışlardır. Deneylerde ortaya çıkan sonuçlara göre FRP kalınlığı, uygulanma şekline bağlı olarak rijitlik ve maksimum yük artırımı için bir takım faktörler sunmuşlardır. Buna göre çubuğun kapasitesi çubuk yönündeki minimum ezilme kuvveti ve kesme kuvveti değerleri olarak alınmıştır. Bu modelde deney sonuçları ile aynı değerleri veren gerçek rijitlik ve yerdeğiştirme değerini sağlayan bilineer itme eğrisi elde edilmiştir. Bu çalışmada plastik mafsallar doğrusal olmayan davranışın beklendiği elemanların uç noktalarına ve eşdeğer çubuğun orta noktasına yerleştirilmiştir.

$$a_{\text{mod}} = a \times (R_1)_i \times (R_2)_i \times \xi_1 \qquad \textbf{(5.7)}$$

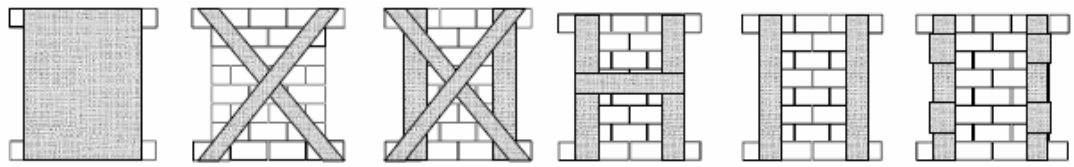
a_{mod} : değiştirilmiş eşdeğer basınç çubuğu genişliği

a : denklem 5.1 kullanılarak hesaplanmış eşdeğer basınç çubuğu genişliği

$(R_1)_i$, $(R_2)_i$: duvarda hasar bulunma ve açıklık oranına göre azaltma katsayıları

ξ_1 : FRP malzeme kullanım şekli ve oranına gore dayanım artırma katsayısı

Al-Chaar ve diğerleri [80], çalışmasında dolgu duvar dayanımını artırmak için kullanılan farklı karbon lifi kaplama yöntemlerinde, karbon lifi kaplama düzenine (Şekil 5.13) ve katman sayısına göre hesaplarda kullanılmak amaçlı farklı dayanım artırma katsayıları belirlemiştir. Bu katsayılar çeşitli deneyler sonucu elde edilmiştir.



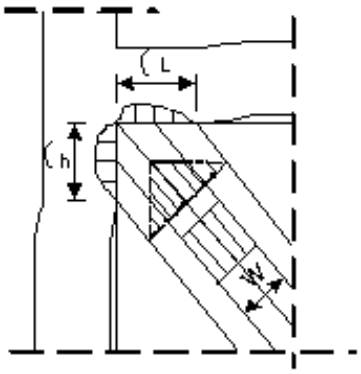
Şekil 5.13 : Karbon lif kaplama düzenleri.

Al-Chaar ve diğerlerinin [80] yaptığı çalışma sonucu karbon liflerle dayanım artırma katsayısı değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Karbon lif dayanım artırma katsayısı değerleri.

Karbon lif kaplama düzeni	ξ_1
2 tabaka tamamen kaplama	1,51
1 tabaka diyagonal kaplama	1,48
1 tabaka tamamen kaplama	1,41
2 tabaka diyagonal kaplama	1,33
1 tabaka diyagonal kaplama	1,29
1 tabaka H kaplama	1,20

Drysdale ve diğerleri [81], Şekil 5.14'de gösterilen ve denklemleri verilen (5.9-5.10) yatay ve düşey temas genişlikleri modelini önermişler ve eşdeğer basınç çubuğu genişliğini hesaplamak için Denklem 5.8'i kullanmışlardır.



Şekil 5.14 : Eşdeğer çubuk modelinin çerçeve ile yatay ve düşey temas genişlikleri.

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{\alpha_h{}^2 + \alpha_L^2} \qquad \textbf{(5.8)}$$

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2\lambda_h} = \frac{\pi}{2}\sqrt[4]{\frac{4 \times E_c \times I_c \times h_{in}}{E_{in} \times t_{in} \times \sin 2\theta}} \qquad \textbf{(5.9)}$$

$$\alpha_L = \frac{\pi}{\lambda_L} = \pi\sqrt[4]{\frac{4 \times E_b \times I_b \times L_{in}}{E_{in} \times t_{in} \times \sin 2\theta}} \qquad \textbf{(5.10)}$$

α_h : dolgu duvar ile kolon arası düşey temas yüzeyi genişliği

α_L : dolgu duvar ile kiriş arası yatay temas yüzeyi genişliği

w : eşdeğer basınç çubuğu genişliği

E_cI_c : kolon eğilme rijitliği

E_bI_b : kiriş eğilme rijitliği

h_{in}, L_{in}, t_{in} : dolgu duvarın yükseklik, uzunluk ve kalınlık değerleri

θ : eşdeğer basınç çubuğunun yatay ile olan açısı

Daha önce yapılan çalışmalar ve Mainstone'un önerdiği formüller doğrultusunda Dave ve Seah [82], eşdeğer basınç çubuğu genişliği ile ilgili 5.11 bağıntısını geliştirmişlerdir. Formül 5.11'deki değişkenler 5.12 ve 5.13 bağıntılarında verilmiştir. Çubuk alanının, dolgu duvar kalınlığı ve eşdeğer çubuk genişliği ile orantılı olduğu tezi savunulmuştur.

$$w = \frac{\pi}{1.5\lambda_h}\cos\theta + \frac{\pi}{1.5\lambda_L}\sin\theta \qquad \textbf{(5.11)}$$

$$\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_{in} \times t_{in} \times \sin 2\theta}{4 \times E_c \times I_c \times h_{in}}} \qquad \textbf{(5.12)}$$

$$\lambda_L = \sqrt[4]{\frac{E_{in} \times t_{in} \times \sin 2\theta}{4 \times E_b \times I_b \times L_{in}}} \qquad \textbf{(5.13)}$$

Durrani ve Leo [83], yaptıkları çalışmada eşdeğer basınç çubuğu genişliğini belirlemek için 5.14 denklemini önermişlerdir. Bu denklem daha sonraki çalışmalarda da kullanılmıştır. Deneysel denklem sonuçlarını belirleyebilmek için 5.15, 5.16 ve 5.17 numaralı denklemlerde sonlu eleman deney sonuçları kullanılmıştır. Eşdeğer çubuk alanı, duvar panelinin kalınlığı ve eşdeğer basınç çubuk genişliğinin çarpımının sonucudur. Denklemlerde kullanılan simgelerin açıklamaları Denklem 5.1'in altında verilmiştir.

$$w_{eff} = \gamma \times \sqrt{L_{in}^2 + h_{in}^2} \times \sin 2\theta \qquad \textbf{(5.14)}$$

$$\gamma = 0.32\sqrt{\sin 2\theta}\left[\frac{h^4 \times E_{in} \times t_{in}}{m \times E_c \times I_c \times h_{in}}\right]^{-0.1} \qquad \textbf{(5.15)}$$

$$m = 6 \times \left[1 + \frac{6}{\pi} \arctan\left(\frac{E_b I_b h}{E_c I_c L_f}\right) \right] \quad \textbf{(5.16)}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_{in}}{L_{in}}\right) \quad \textbf{(5.17)}$$

Flanagan [84], eşdeğer çubuk alanının doğrusal olmayan karakteristik davranış gösterdiğini vurgulamış, Smith ve Carter'ın [75] denklemine benzer bir denklem geliştirmiştir (5.18). Denklem 5.14, dolgu duvarlı çerçevelerin rijitliğini belirli değer aralığında kabul etmektedir. C sınır durumu değeri, dolgu duvar modeli ve çerçeve modeline göre değişebilmektedir. Örneğin C değeri betonarme çerçeveli, beton duvarlı yapılarda ağır hasara rastlandığında "8" olarak alınabilir. Flanagan [84], ayrıca rijit kolonlu çerçevelerde etkili çubuk genişliğini $0.20h_{in}/\cos\theta$ ile sınırlandırmıştır. λ değeri Denklem 5.19'da verilmiştir.

$$A = \frac{\pi t}{C\lambda \cos\theta} \quad \textbf{(5.18)}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_{in} \times t_{in} \times \sin 2\theta}{4 \times E_c \times I_c \times h_{in}}} \quad \textbf{(5.19)}$$

t : dolgu duvar kalınlığı

C : deneysel sabit değer

Saneinejad and Hobbs [85], çalışmalarında elastik ve doğrusal olmayan malzeme özelliklerini içeren bir model sunmuşlardır. Önerilen çubuk modelinde temas uzunluğu, temas eden duvarın uzunluğunun %40'ı ile sınırlandırılmıştır. Çubuk alanı ve temas uzunluğu hesaplama formülleri Denklem 5.20, 5.21 ve 5.22'de verilmiştir. Saneinejad ve diğerleri [85], analitik çalışmalarda duvar ve çerçeve ölçülerinin kabaca aynı değerde (h_{in}=h ve L_{in}=L_f) alınabileceğini belirtmişlerdir.

$$A_d = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c h t \dfrac{\sigma_c}{f_c} + \alpha_b l t \dfrac{\tau_b}{f_c}}{\cos\theta} \le 0.5 \frac{t h_{in} \dfrac{f_a}{f_c}}{\cos\theta} \quad \textbf{(5.20)}$$

$$\alpha_c h = \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_c M_{pc}}{\sigma_c t}} \leq 0.4 h_{in} \quad \textbf{(5.21)}$$

$$\alpha_b L_f = \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_b M_{pb}}{\sigma_b t}} \leq 0.4 L_{in} \quad \textbf{(5.22)}$$

Daha sonra El-Dakhakhni [86], yukarıdaki denklemleri bazı sadeleştirmeler ile kendi çalışmalarında kullanmıştır. Dolgu duvarın yatay yükün uygulandığı köşelerde plastikleştiği varsayılarak, β_c, β_b, σ_c and σ_b değerleri için yukarıdaki denklemlerde üst sınır değerleri alınabilir. El-Dakhakhni'nin etkili çubuk alanını hesaplayabilmek için önerdiği formül Denklem 5.23'de verilmiştir.

$$A = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c h_{in} t}{\cos\theta} \qquad \alpha_c h_{in} = \sqrt{\frac{2(M_{pj} + 0.2M_{pc})}{t f_{bmp}}} \leq 0.4 h_{in} \quad \textbf{(5.23)}$$

M_{pj} : minimum (M_{pb}; M_{pc})

M_{pj} : kolon veya kirişin minimum plastik moment kapasitesi

f_{bmp} : duvar basınç dayanımı

t : duvar kalınlığı

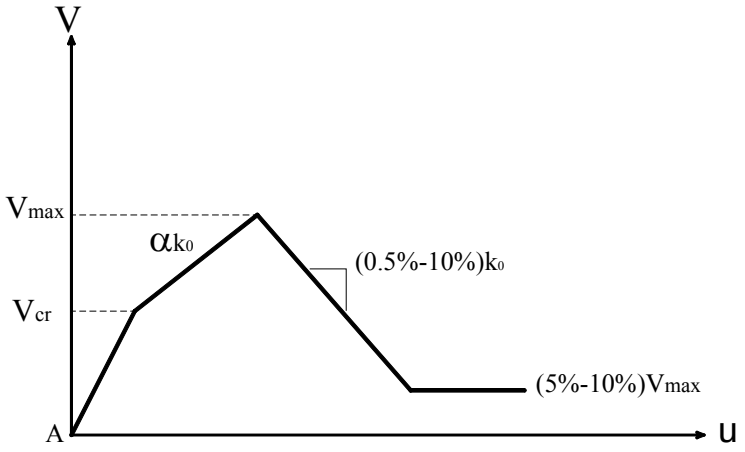
$\alpha_c h_{in}$: kolon boyunca temas yüzeyi uzunluğu

h_{in} : duvar yüksekliği

Eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini belirlemek, basınç çubuğunun başlangıç rijitliğini belirleyebilmek açısından önemlidir. Eşdeğer çubuğun başlangıç rijitliği (K_o) hesabı, Denklem 5.24'de verilmiştir. Bu denklemde w_{strut} ve D sırasıyla basınç çubuğunun genişliğini ve duvar panelinin diyagonal uzunluğunu temsil etmektedir.

$$K_0 = \frac{w_{strut} \times t_{in} \times E_{in}}{D} \quad \textbf{(5.24)}$$

Fardis ve Panagiotakis, dolgu duvara gelen kesme kuvveti ve yatay yükle ilgili bir model geliştirmişlerdir. Modellemelerinde FRP'nin etkisi göz önüne alınmamıştır. 4 doğrudan oluşan multi-lineer çubuk davranışı modellenmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 : Fardis'in önerdiği dolgu duvar yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi.

Denklem 5.25'te gösterildiği gibi de duvarın elastisite modülü ve dolgu duvarın geometrik özelliği ile modelin başlangıç rijitliği bulunabilmektedir. Analitik çalışmada eşdeğer basınç çubuğu kavramı dolgu duvar modelinin uygulamasında kullanılmıştır.

$$k_0 = \frac{G_w t_w l_w}{h_w} \; ; \; \alpha \mathrm{k}_0 = \frac{E_w t_w a}{d} \cos^2 \theta \; ; \; \mathrm{V_{cr}} = \mathrm{f_{ws}} t_w l_w \; ; \; \mathrm{V_{max}} = 1.3 \mathrm{V_{cr}} \qquad \textbf{(5.25)}$$

G_w : diyagonal basınç deneylerinden elde edilen kesme modülü

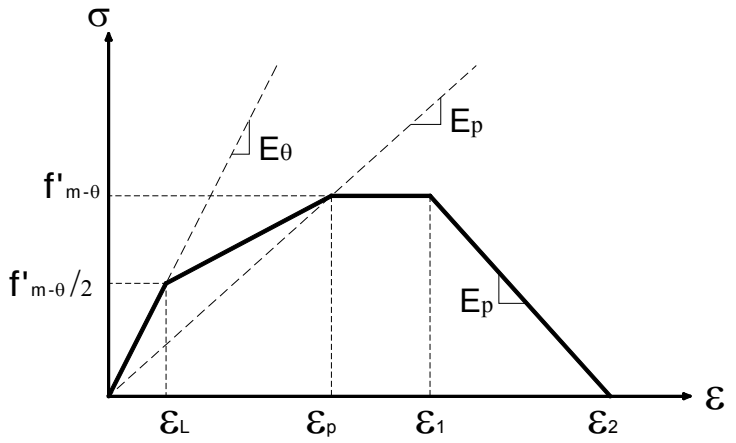
f_{ws} : diyagonal basınç deneylerinden elde edilen kesme dayanımı

l_w : duvar uzunluğu

h_w : duvar yüksekliği

a : Mainstone denklemi kullanılarak elde edilen eşdeğer çubuk genişliği

El-Dakhakhni [87] beton duvar panelli çelik çerçeveler üzerinde çalışarak eşdeğer basınç çubuğu yöntemi ile bir makro model sunmuştur. Modellemede basınç çubuğu genişliği Denklem 5.26 kullanılarak belirlenmiş ve deney boyunca sabit değer olarak alınmıştır. El-Dakhakhni tarafından önerilen eksenel yük-uzama ilişkisi Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : El-Dakhakhni tarafından önerilen dolgu duvar modeli.

$$w_{eff} = \gamma \times \sqrt{L_{in}^2 + h_{in}^2} \times \sin 2\theta \quad \textbf{(5.26)}$$

$$\gamma = 0.32\sqrt{\sin 2\theta}\left[\frac{h^4 \times E_{in} \times t_{in}}{m \times E_c \times I_c \times h_{in}}\right]^{-0.1} \quad \textbf{(5.27)}$$

$$m = 6 \times \left[1 + \frac{6}{\pi}\arctan\left(\frac{E_b I_b h}{E_c I_c L_f}\right)\right] \quad \textbf{(5.28)}$$

5.26-5.28 denklemleri eşdeğer basınç çubuğu kalınlığını hesaplamak için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar FRP ile sargı tekniğinin duvarın dayanım ve rijitliğini artırdığını göstermiştir. FRP sarılım şekli, kaç kat kullanıldığı da duvarın dayanımını olumlu etkilemiştir. Bunlara dayanarak güçlendirilmiş duvarların elastisite modülü üzerinde değişiklikler yapılmış, 5.30 denklemi kullanılarak güçlendirilmiş duvarların elastisite modülleri hesaplanmıştır. Eşdeğer basınç çubuğu kalınlığını bulmak için de farklı hesaplamalar vardır. Örneğin Hakam duvarın brüt kalınlığını kullanmış iken Al-Chaar net kalınlığı kullanmıştır. Eşdeğer çubuk modelinde brüt kalınlığın baz alındığı bu çalışmada, kalınlığın hesaplanması için Denklem 5.31, sabit k değeri için ise 5.29 denklemi kullanılmıştır.

$$k = \left[\frac{0.67}{(l/h)} \times \left(\frac{L_{flag} + L_{flag} + \sum W_{cross-diagonals}}{L_{diagonal}}\right) + 1\right] \quad \textbf{(5.29)}$$

$$E_{bmpF} = E_{bmp} \times k \quad \textbf{(5.30)}$$

$$A_{strut} = w_{strut} \times t_{strut} \quad \textbf{(5.31)}$$

Tez çalışması kapsamında dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubuğu yöntemi ile modellenmiş, eşdeğer basınç çubuğu genişliklerini hesaplamak için DBYBHY 2007 yönetmeliğinde belirtilen bağıntılar kullanılmıştır. Karbon lifli kompozit malzeme ise çekme çubuğu olarak modellenmiş, DBYBHY 2007'de [68] çekme çubuğu olarak modelleme ile ilgili gerekli bağıntılar verilmiştir. Buna göre çekme çubuğunun çekme dayanımı 5.32 Denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_f = 0.003.E_f.w_f.t_f \quad \textbf{(5.32)}$$

Çekme çubuğunun kesme dayanımı, çekme dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilecektir. Çekme çubuğunun eksenel rijitliği için 5.33 Denklemi kullanılmıştır.

$$k_t = \frac{w_f \, t_f \, E_f}{r_{duvar}} \quad \textbf{(5.33)}$$

Bu denklemlerde E_f , w_f ve t_f sırasıyla lifli polimer şeritin elastisite modülü, genişliği ve kalınlığı, r_{duvar} dolgu duvar köşegen uzunluğudur.

5.3 Modelleme Sonuçları

Bölüm 4'te deneysel olarak incelenmiş betonarme çerçeveler ele alınarak bu bölümde söz konusu betonarme çerçevelerin kuramsal olarak doğrusal olmayan davranışları incelenmiş ve yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin elde edilebilmesi amacıyla doğrusal olmayan yük artımı çözümlemesi gerçekleştirmiştir. Kuramsal olarak elde edilen bu yatay yük-yerdeğiştirme bağıntıları deneyler sonucunda elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme bağıntıları ile karşılaştırılmıştır.

Her numunenin analitik çalışmada elde edilen maksimum yatay yük değerleri, kat yatay yer değiştirmeleri, sistemde oluşan plastik kesitlerin dağılımları ve her plastik kesitin oluştuğu yük değerleri, başlangıç rijitlik ve maksimum yükte ölçülen rijitlik değerleri, enerji sönümleme miktarları hesaplanmış, deneylerde hesaplanan değerler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

5.3.1 Numune 1 – boş çerçeve

1 numaralı boş çerçeve numunesinin kuramsal analizinde kolonlardaki kesme kırılmaları göçmede etkili olmuş, ilk plastik mafsallar her iki kolonun alt bölgesinde oluşmuştur.

Artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsallar Şekil 5.17'de görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda, sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.2 ve Şekil 5.17'de gösterilmiştir.

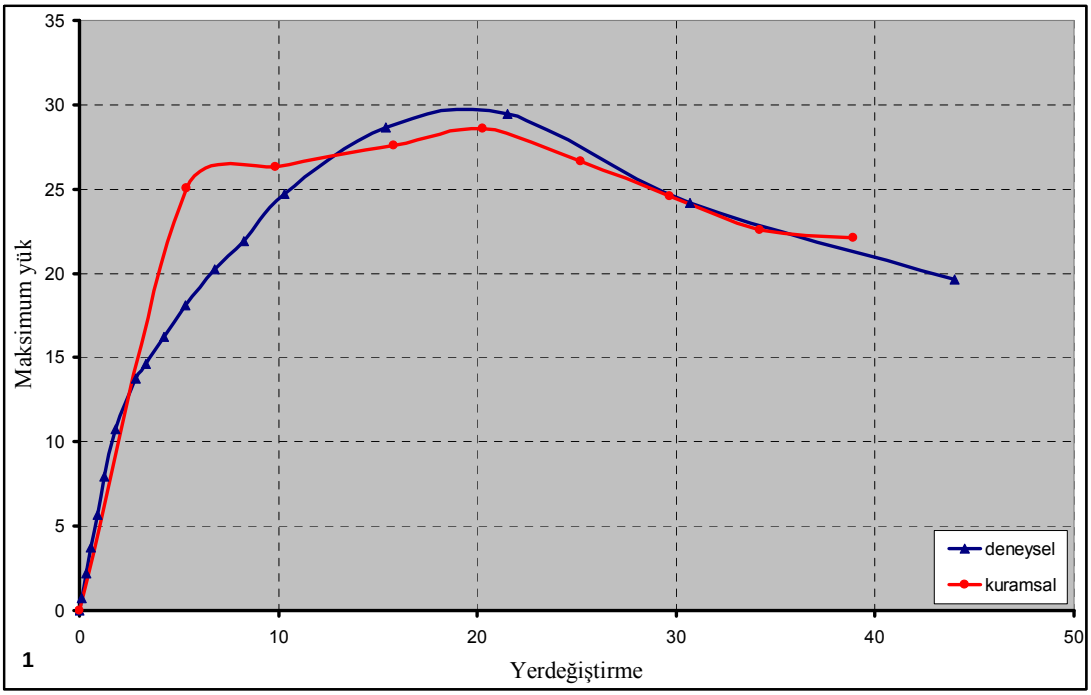
Çizelge 5.2 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	13.3	2.82
2	24.7	10.3
3	29.4	21.54



Şekil 5.17 : Numune 1-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Boş çerçeve numunesi için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18 : Numune 1-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 28.5 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada 29.4 kN olarak hesaplanmıştır. Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 1.09 kN/mm, deneysel çalışmada da 1.24 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır. Numune 1 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 40 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 1176.24 kNmm ve 1258.16 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur.

Boş çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Numune 1-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92

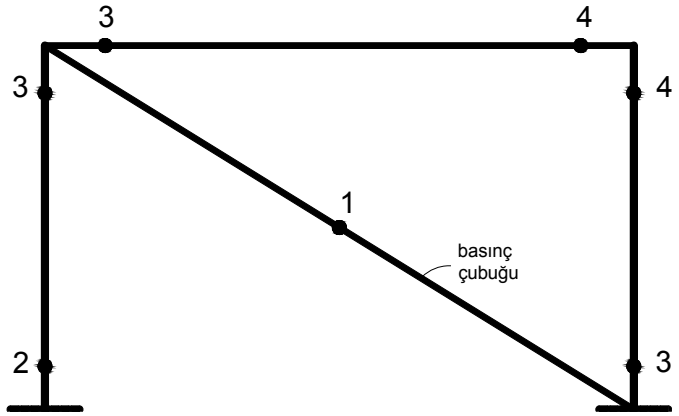
5.3.2 Numune 2 – dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçeve

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı 2 numaralı numunenin kuramsal analizinde de kolonlardaki kesme kırılmaları göçmede etkili olmuştur. Boş çerçevede ilk plastik mafsallar kolonlarda gözlenirken, dolgu duvarlı çerçeve davranışında olması beklenildiği gibi ilk plastik mafsal dolgu duvarlar üzerinde gözlenmiştir.

Artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsal Şekil 5.19'da görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda artan yatay yük etkisinde sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.4 ve Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

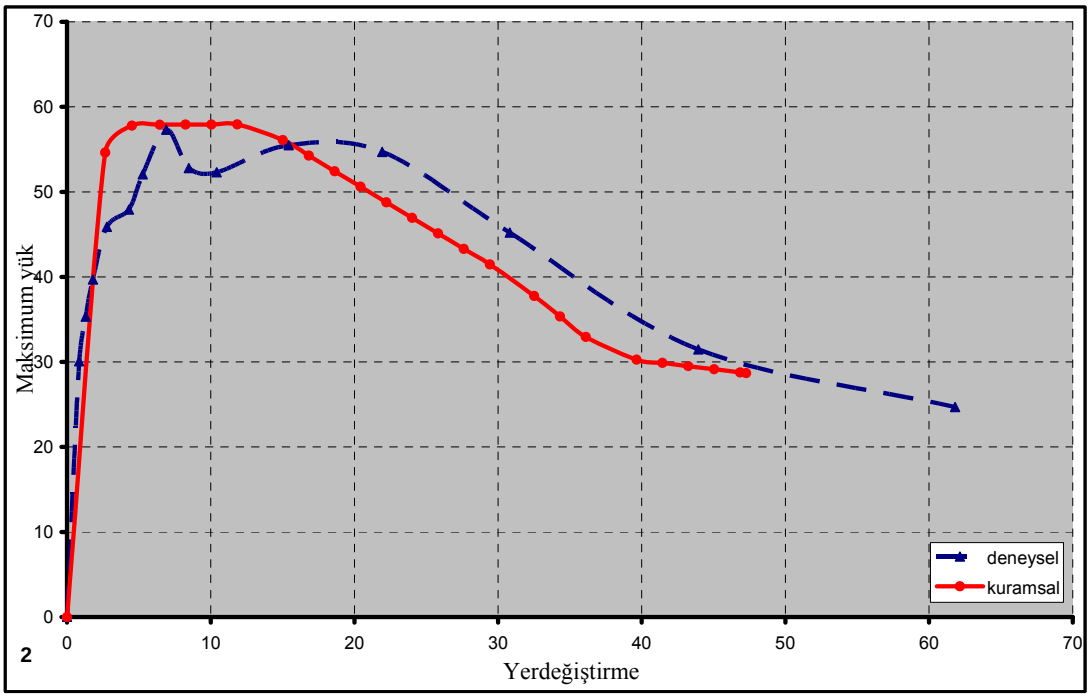
Çizelge 5.4 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	54.6	2.7
2	57.3	15.8
3	41.1	31.2
4	37.3	32.5



Şekil 5.19 : Numune 2-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı numune için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.20'de gösterilmektedir.



Şekil 5.20 : Numune 2-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 57.9 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada 57.2 kN olarak hesaplanmıştır. Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 8.29 kN/mm, deneysel çalışmada da 8.17 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır. Numune 2 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 46 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 1949.39 kNmm ve 1929.11 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Numune 2-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92
Eşdeğer çubuk (P) (Gerilme-Şekildeğiştirme)	0.0/0.0	1691.65/0.0	1618.1/0.01	367.75/0.03	367.75/0.04

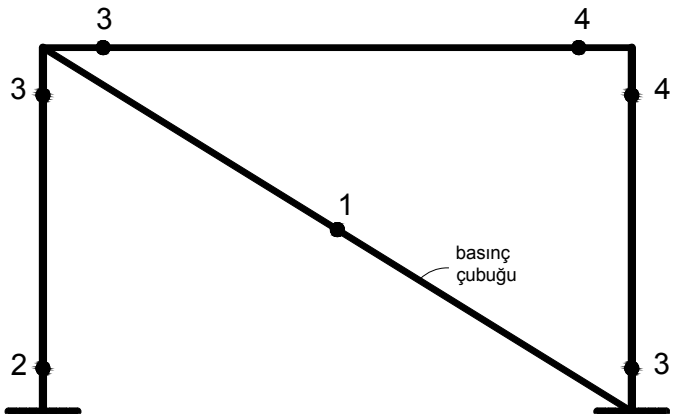
5.3.3 Numune 3 – dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çerçeve

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı 3 numaralı numunenin kuramsal analizinde de kolonlardaki kesme kırılmaları göçmede etkili olmuştur. Çerçevede ilk plastik mafsallar dolgu duvarlar üzerinde gözlenmiştir.

Artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsal Şekil 5.21'de görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda artan yatay yük etkisinde sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.6 ve Şekil 5.21'de gösterilmiştir.

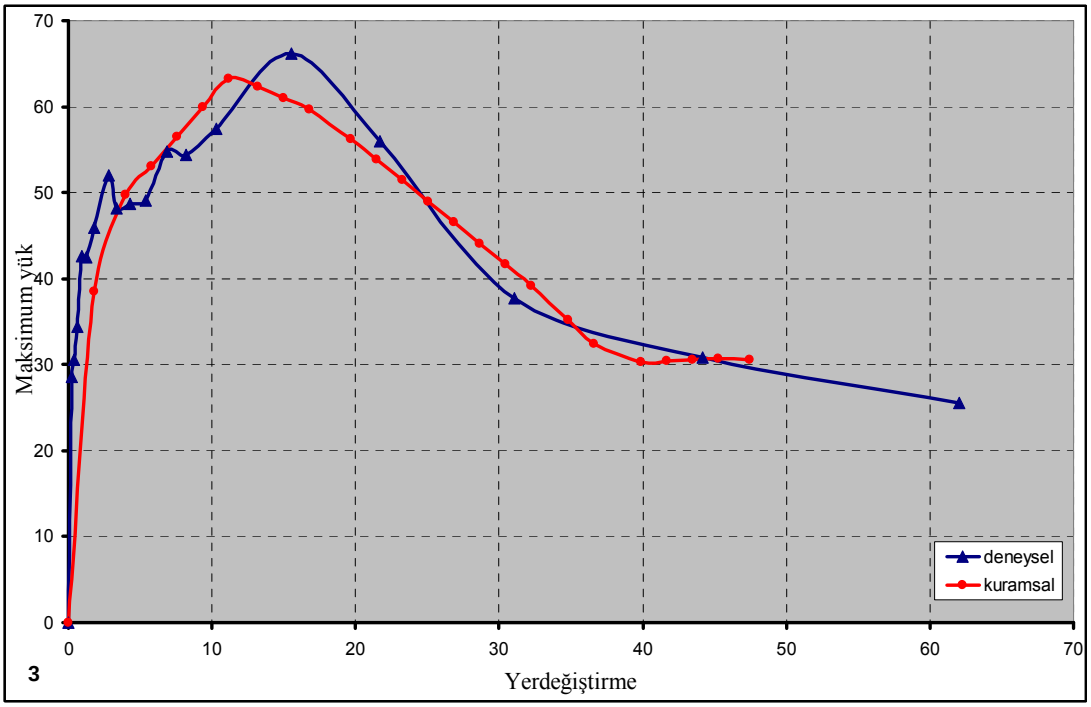
Çizelge 5.6 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	49.7	3.9
2	56.3	19.6
3	39.21	32.2
4	35.2	34.8



Şekil 5.21 : Numune 3-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı numune için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.22'de gösterilmektedir.



Şekil 5.22 : Numune 3-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 63.3 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada 66.0 kN olarak hesaplanmıştır.

Numune 3'de deneysel çalışmada gözlenen ilk çatlaklar 42.5 kN'luk yatay yük etkisi altında ortaya çıkarken, analitik çalışmada ilk çatlakların oluştuğu maksimum yük değeri 49.7 olarak hesaplanmıştır.

Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 3.9 kN/mm, deneysel çalışmada da 4.3 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır. Numune 3 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 46 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 1911.16 kNmm ve 1962.77 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Numune 3-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

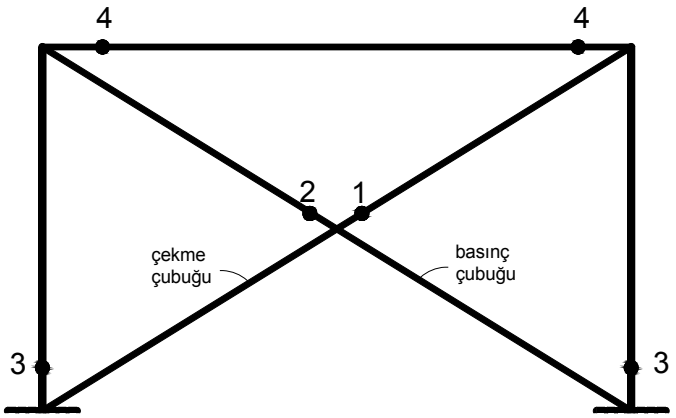
Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92
Eşdeğer çubuk (P) (Gerilme-Şekildeğiştirme)	0.0/0.0	1471.0/0.0	1765.2/0.01	294.2/0.03	294.2/0.04

5.3.4 Numune 4 - dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 4 numaralı numunenin kuramsal analizinde, artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsallar Şekil 5.23'de görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.8 ve Şekil 5.23'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

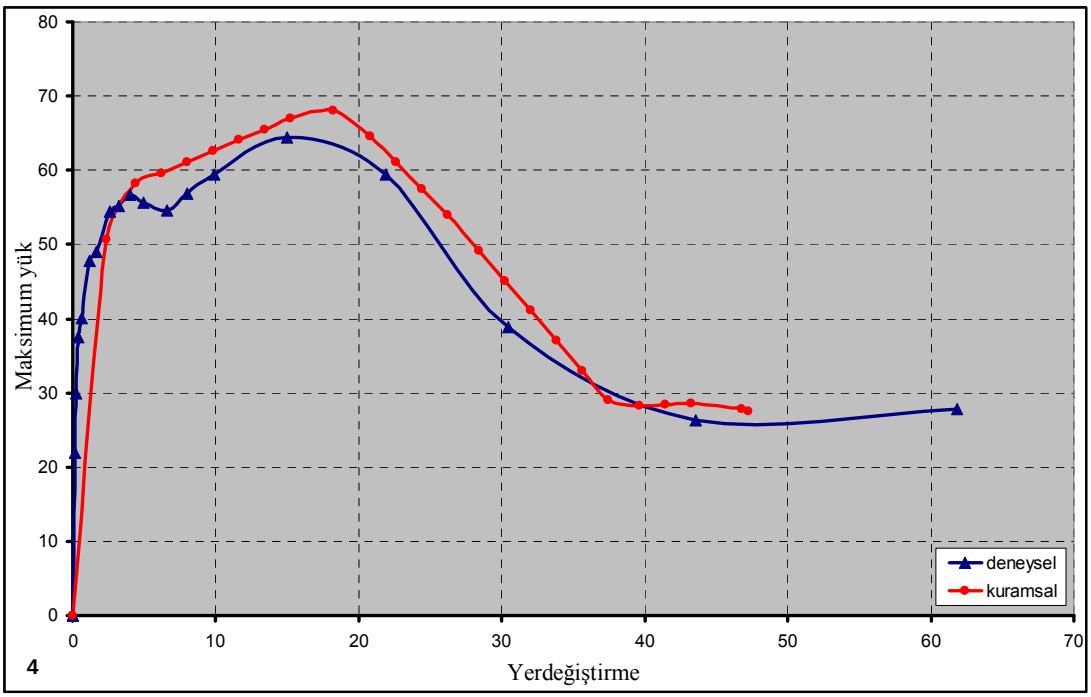
Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	56.7	4.4
2	65.4	18.9
3	33.5	34.3
4	28.9	37.4



Şekil 5.23 : Numune 4-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel

çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.24'de gösterilmektedir.



Şekil 5.24 : Numune 4-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 68.1 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada 64.4 kN olarak hesaplanmıştır. Numune 4'de deneysel çalışmada gözlenen ilk çatlaklar 47.2 kN'luk yatay yük etkisi altında ortaya çıkarken, analitik çalışmada ilk çatlakların oluştuğu maksimum yük değeri 56.7 olarak hesaplanmıştır.

Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 4.24 kN/mm, deneysel çalışmada da 4.3 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır.

Numune 4 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 46 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 2072.13 kNmm ve 2111.8 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur.

Dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Numune 4-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

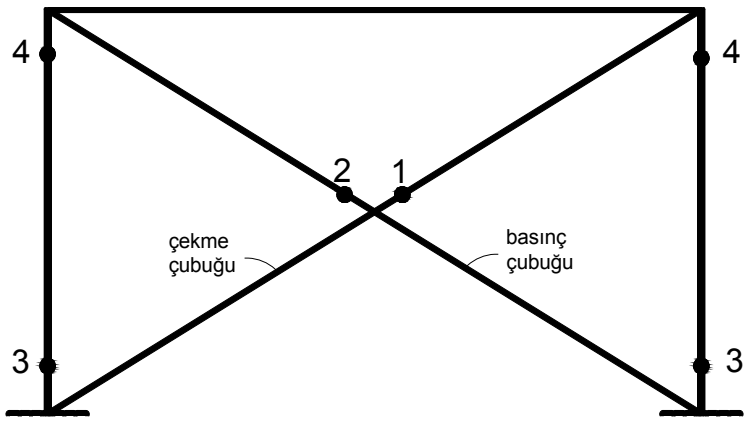
Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92
Eşdeğer çubuk (P) (Gerilme-Şekildeğiştirme)	0.0/0.0	1765.2/0.0	1618.1/0.01	147.1/0.03	147.1/0.04

5.3.5 Numune 5 – dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı / tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 5 numaralı numunenin kuramsal analizinde, artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsallar Şekil 5.25'de görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.10 ve Şekil 5.25'de gösterilmiştir.

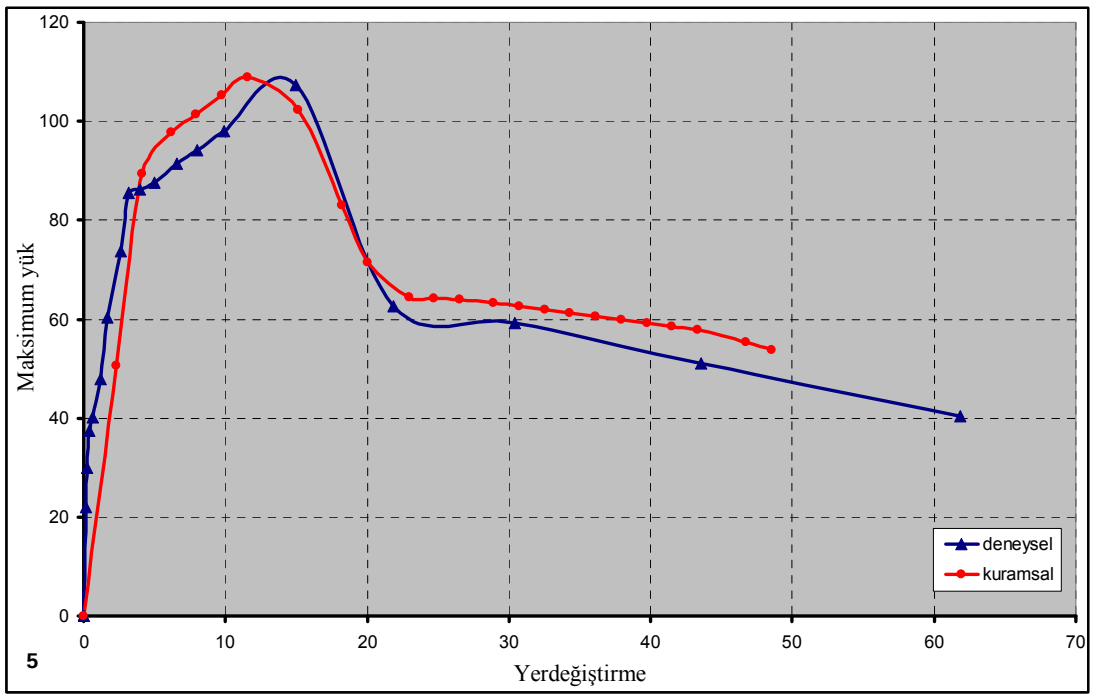
Çizelge 5.10 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	96.1	6.1
2	70.8	19.7
3	58.8	34.5
4	51.1	43.6



Şekil 5.25 : Numune 5-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.26'da gösterilmektedir.



Şekil 5.26 : Numune 5-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 106.4 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada 108.8 kN olarak hesaplanmıştır. Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 7.1 kN/mm, deneysel çalışmada da 6.7 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır.

Numune 5 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 46 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 3090.85 kNmm ve 3142.35 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı tek yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Numune 5-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

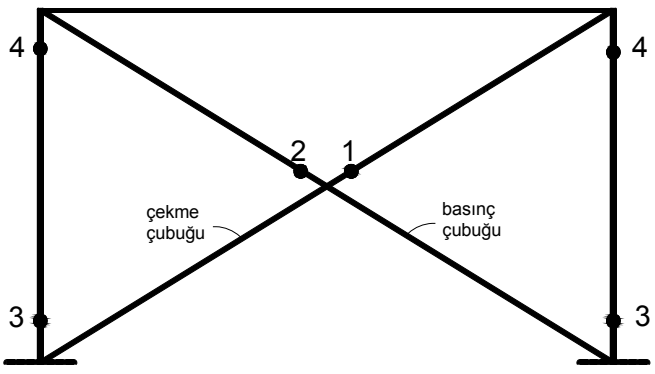
Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92
Eşdeğer çubuk (P) (Gerilme-Şekildeğiştirme)	0.0/0.0	2942.0/0.0	3236.2/0.01	1471/0.02	1029.7/0.04

5.3.6 Numune 6 – dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı / çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş 6 numaralı numunenin kuramsal analizinde, artan yatay yük parametresi altında çerçevede meydana gelebilecek plastik mafsallar Şekil 5.27'de görüldüğü gibi sisteme atanmış, çözümleme sonucunda sistemde mafsalların ortaya çıktığı bölgeler ve oluşma sıraları Çizelge 5.12 ve Şekil 5.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 : Plastik mafsalların oluştuğu yatay yük ve yerdeğiştirme değerleri.

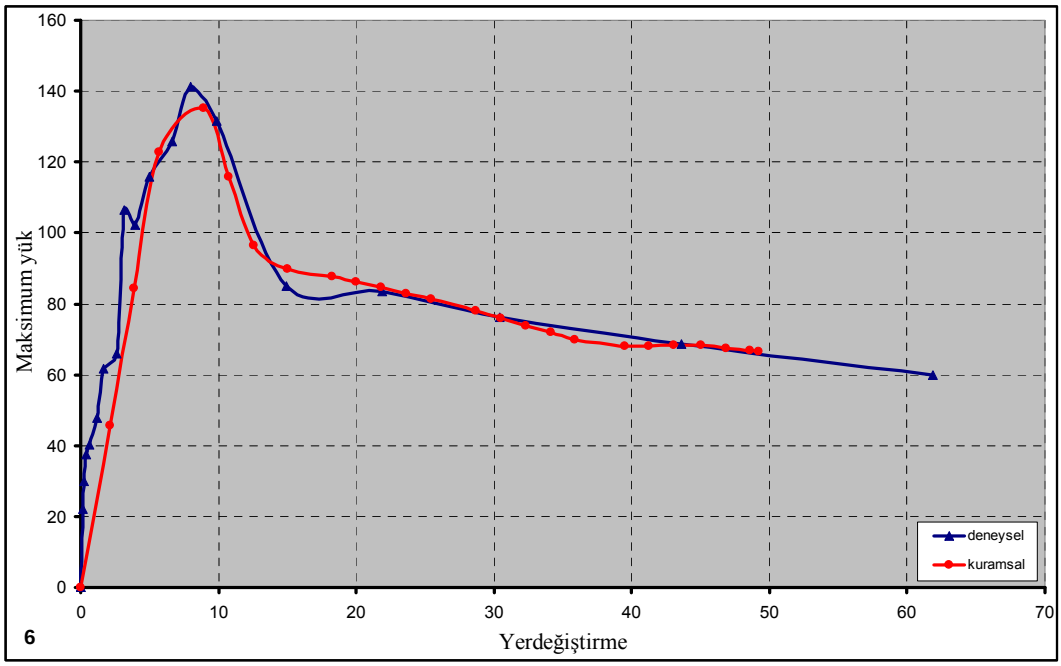
Mafsal No	Mafsalın oluştuğu yük (kN)	Tepe Yerdeğiştirme (mm)
1	133.3	8.9
2	83.9	19.7
3	69.1	34.7
4	68.6	435



Şekil 5.27 : Numune 6-Plastik mafsalların oluşma sırası ve konumları.

Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune için yapılan doğrusal olmayan elastik ötesi statik itme analizleri sonuçları ile deneysel

çalışmalardan elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.28'de gösterilmektedir.



Şekil 5.28 : Numune 6-Yatay yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Yapılan analiz sonucunda çerçevenin maksimum yük değeri 133.3 kN olarak ortaya çıkmış iken, bu değer deneysel çalışmada139.6 kN olarak hesaplanmıştır. Yatay yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri üzerinden, analitik modelin maksimum yatay yük tepe noktasında hesaplanan rijitlik değeri 16.1 kN/mm, deneysel çalışmada da 17.7 kN/mm olarak hesaplanmış, değerler birbirine yakın çıkmıştır. Numune 6 için oluşturulan analitik modelin tepe yerdeğiştirmesi 46 mm'ye ulaştığında göçtüğü kabul edilirse, bu yerdeğiştirmeye kadar hesaplanan enerji sönümleme değeri ile deneysel çalışmadan elde edilen enerji sönümleme değerleri de 3528.74 kNmm ve 3774.48 kNmm ile birbirine yakın sonuçlar ortaya koymuştur. Dolgu duvarlı çift yüzü sıvalı çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçevede oluşan plastik mafsal noktalarının özelikleri Çizelge 5.13'de verilmiştir.

Çizelge 5.13 : Numune 6-Plastik mafsal noktaları özellikleri.

Mafsal Türü	A	B	C	D	E
Kolon-Kiriş (M3) (Moment-Eğrilik)	0.0/0.0	4.9/0.0	5.88/0.48	2.94/0.48	1.47/1.92
Eşdeğer çubuk (P) (Gerilme-Şekildeğiştirme)	0.0/0.0	4854.3/0.0	2500.7/0.01	1471/0.03	1471/0.039

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Birbirine bitişik, iki cepheli bina sayısının fazla olduğunun gözlendiği ülkemizde, bitişik nizam, dolgu duvarlı çift taraflı sıva uygulamasının mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek yüz/çift yüz sıvanın etkisi ve dolgu duvarlı çerçeveye olan katkısı, çift taraflı güçlendirmenin mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek taraflı güçlendirmenin yapıda göstereceği performans araştırılmıştır. Tez kapsamında ortaya çıkan sonuç ve öneriler aşağıda sıralanmıştır;

- Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarına göre belirli işlem kriterlerine bağlı kalındığında söz konusu tek ve çift taraflı güçlendirme yönteminin her ikisinin de deney elemanlarının göçme davranışları, yatay yük taşıma gücü, enerji sönümleme miktarı ve rijitlik değerleri bakımından olumlu sonuçlar sağladığı ortaya konmuştur.

- Deneylerden elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri değerlendirildiğinde dolgu duvarlı çerçeveler ve güçlendirilen çerçevelerin yanal rijitlikleri, yatay yük taşıma kapasiteleri ve enerji sönümleme değerleri boş çerçeveye göre önemli derecede artmaktadır. CFRP malzeme ile güçlendirme sonucu deney numunelerinin davranışı geliştirilmiştir. CFRP malzemenin tabaka kalınlığı sistemin davranışını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu numunelerde çift kat CFRP malzemenin etkisi ile erken dayanım kaybı ve kopmanın önüne geçilmiştir.

- Deprem gibi iki yönlü tekrarlı yüklere maruz kalan numunelerin CFRP malzeme ile daha etkili güçlendirme yapılması için, numuneyi her iki yüzünden güçlendirerek, çift yüz ankraj uygulaması ve kolon mesnet bölgeleri ile dolgu duvarlarda uygulanan diyagonal CFRP malzemede de ankraj sayısını artırmanın oldukça etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Dolgu duvardaki karbon lif ankrajları, duvarın iki yüzündeki karbon lif örtülerini birbirine bağlayarak duvardan ayrılmalarını önlemektedir.

- Betonarme çerçevenin karbon lifler ile güçlendirilmesi sonucunda dolgu duvar köşe kırılmaları ve çapraz çatlaklar dolgu duvarın tamamına yayılmakta, belirli bölgelerde toplanma önlenmektedir. Böylece dolgu duvarın tümden göçmesi önlenmiş olmaktadır. Buna ilaveten deneylerde uygulanan CFRP elemanların itme ve çekme etkisi altında sıvanın da kabarmasıyla duvardan kabarma suretiyle ayrılıp daha sonra koptuğu görülmüştür. Duvarda çapraz olarak uygulanan CFRP elemanlar üzerindeki ankrajlar CFRP malzemenin duvar üzerinde daha fazla tutunabilmesinde çok etkili olmuşlardır.

- Bu deneyler sonucu, maliyet faktörü de dikkate alınarak CFRP malzemenin çerçevenin bir köşesinden diğerine uzanan çaprazlar olarak düzenlenmesi uygun bir güçlendirme tekniği olarak denenmiştir. Yapılan deneylerde, iyi ankraj sağlandığında, güçlendirilmiş dolgulu çerçevenin dayanımının, güçlendirilmemiş dolgu duvarlı çerçevenin yaklaşık iki katına eriştiği gözlenmiştir. Daha da önemlisi, güçlendirilmemiş dolgu duvar, tersinen tekrarlanan yükler altında dağıldıktan sonra, davranış çerçeve davranışına dönüşürken, güçlendirilmiş dolgu dağılmadığından, daha fazla enerji sönümleyebilmektedir.

- Karbon elyaf uygulaması yapılan numunelerde oluşan çatlak sayısı ve duvarda sıva, tuğla düşmeleri güçlendirme uygulanmayan çerçevelere göre çok daha azdır. Ayrıca kolon mesnet bölgeleri ve kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki bantlar o bölgelerdeki eğilme çatlağı ve kesme çatlağı sayısının azalmasında etkili olmuştur. Güçlendirilen numunelerde kolonlardaki çatlaklar, güçlendirilmeyen numunelere göre kolon alt bölgesinde orta bölgeye doğru yoğunlaşmıştır.

- Özen gösterilmesi gereken nokta dolgu duvarların doldurdukları betonarme çerçeve ile arada boşluk bırakmadan iyi bir şekilde bağlanması ve mümkün olduğunca ayrılmamasının sağlanmasıdır. Deneylerde görüldüğü üzere belirli bir çevrim ve yatay yerdeğiştirmeden sonra dolgu duvar ile çerçeveler birbirinden ayrılmaya başlamışlardır. Bu seviyeden sonra dolgu duvarın çerçeve rijitliği açısından etkisi giderek azalmıştır. Bu etkinin sağlanabilmesi

ve dolgu duvarın daha büyük yerdeğiştirmelere dayanarak daha geç göçmesi ve dağılmaması amacıyla denenmiş olan karbon lif takviyesi bu açıdan olumlu sonuçlar vermiştir. Karbon lif sayesinde çerçeve rijitliği artarak yerdeğiştirmeler azaldığı için ve ayrıca dolgu duvara bir örtü gibi sarılması açısından dolgu duvarın daha geç göçmesine ve çerçeveden geç ayrılmasına neden olmuştur.

- Güçlendirilen numunelerde doğru şekilde uygulanan CFRP diyagonal bantların en olumlu katkısı, dolgu duvarların çerçeve ile birlikte deney sonrası fazla dağılma olmadan ayakta kalabilmesini sağlaması ve bu nedenle de deney numunelerinin sünek davranış göstermesi ve göçme sonrasında da maksimum yük taşıma kapasitelerinin diğer numunelere göre daha fazla değerlerde olması şeklinde değerlendirilmiştir. Karbon lifler ile güçlendirilme sonucunda dolgu duvar köşe kırılmaları ve çatlaklar dolgu duvarın tamamına yayılarak, belirli bölgelerde toplanması önlenmiş, dolgu duvarın tümden göçmesinin önüne geçilmiştir.

- Ankrajların, köşe bölgelerdeki ek CFRP bantlar ve CFRP çapraz bantların duvara yapıştırılmasından sonra bu elemanların üzerine gelecek şekilde duvara yapıştırılması çok daha etkili olmuştur.

- Güçlendirilmemiş dolgu duvarlı tek yüzü sıvalı ve çift yüzü sıvalı deney numunelerin yatay yük taşıma kapasiteleri, boş çerçeveye göre yaklaşık ~2 kat artmış, çift yüz sıva uygulaması, tek yüzü sıva uygulaması ile karşılaştırılacak olursa, çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini 1.15, enerji sönümleme kapasitesini 1.2 ve rijitlik değerlerini 1.3 kat artırarak, çerçeveye, çok fazla olmamakla birlikte, olumlu katkı sağlamıştır.

- Karbon liflerin kopması sonucu güçlendirilen numunelerin yatay yük taşıma kapasitesinde meydana gelen sert düşüşler, karbon lifli kompozitlerin çerçeveye olan etkisini göstermektedir.

- Güçlendirilen numunelerde duvara uygulanan CFRP bantlar ankraj noktalarından kopmuşlardır. Bu davranış, o bölgedeki CFRP ankraj kesitinin azalması ve zayıf noktadan kopmuş olması şeklinde değerlendirilmiştir.

- Analitik çalışma sonucunda da dolgu duvarların yapının deprem etkisi altındaki kapasitesi, kat yatay yer değiştirmeleri, göreli kat ötelemesi değerleri, sistemde oluşan plastik kesitlerin dağılımları ve her plastik kesitin oluştuğu yük değerleri üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. Bu etkinin ihmal edilmesi analizleri gerçek dışı bırakmakta ve yapısal analizde gerçek dışı sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır.

- Deney sonuçlarından görüldüğü üzere boş çerçevede, deprem yükünün daha az değerinde plastik mafsallar meydana gelmekte ve ilk plastik kesitler kolonlarda oluşmaktadır. Dolgu duvarlı çerçevelerde ise ilk plastik kesitin oluştuğu andaki taban kesme kuvveti artmakla birlikte ilk plastik kesitler dolgu duvarlarda meydana geldikten sonra kolonlarda görülmektedir. Bununla birlikte de dolgu duvarlı çerçevelerde ilk plastik kesitler beklenildiği gibi yatay tepe yer değiştirmelerinin daha büyük değerlerinde meydana gelmektedir. Bu sonuçlara göre dolgu duvarların analiz sonuçlarını önemli oranda değiştirdiği görülmektedir.

- Numunelerin modellemedeki davranışları deney sonuçlarına yakın tepkiler vermiştir. Modelleme aşamasında malzeme özelliklerini tanımlamak oldukça önemlidir. Modelleme çevrimsel tepkime dahil edilerek daha da iyileştirilebilir çünkü bu şekilde çerçeve duvar etkileşimi, mafsal davranışı da modelle birleştirilebilir.

- Etkili basınç çubuğu genişliği rijitlik değerinde oldukça etkilidir. Bununla birlikte genişlik değerinin değişmesi kapasite değerini değiştirmemiştir. Eşdeğer çubuk genişliğini hesaplamada DBYBHY 2007'deki bağıntılar kullanıldığında başlangıç rijitliği değerleri ve tepe yüke gelen rijitlik değerlerinde sonuçlar deney verilerine yakın çıkmaktadır.

- Deneyler sırasında dolgu duvarlı çerçevelerde bazı çevrimlerde gözlenen aynı hedef tepe yerdeğiştirmelere gidilirken itme ve çekmeler sırasında hesaplanan maksimum yatay yüklerdeki farklı değerlerin, dolgu duvarlı çerçevede tuğla ile betonarme çerçeve arasındaki ayrışmalardan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

- Karbon elyaf malzeme ile yapılan güçlendirme yönteminin daha etkili olması için kolon-kiriş birleşim ve kolon alt bölgelerdeki ek CFRP bantların lif yönlerinin çerçeve ile 45° açı yapacak ve birbirleriyle dik olacak şekilde epoksi ile yapıştırılması uygun olmaktadır.

- Karbon lif ile güçlendirme, uygulamanın kolaylığı ve yapı kullanım alanının olumsuz etkilenmemesinden dolayı büyük avantaja sahiptir. Bu sayede yapılar boşaltılmadan depreme karşı güçlendirilmesi sağlanabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Özgen, K.,** 2001. *Betonarme sistemlerde iyileştirme ve güçlendirme esasları*, Yapı Malzemesi ve Deprem Semineri, İTÜ, İstanbul, 14-16 Mart, s.102-111.

[2] **Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, M.** 2003. Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer Malzemeler Kullanılarak Onarım ve Güçlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli.

[3] **Ersoy, U.,** 2007. Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi Uygulama ve Araştırmalar. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul.

[4] **Özgen, K.,** 1990. Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Sistem Hasarları, Onarım ve Güçlendirme. *Yapı Dergisi*, İstanbul, 116, 50-54.

[5] **Köse, M., Özgen, K.,** 2003. Betonarme Elemanların Çelik Lamalarla Güçlendirilmesi. *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mayıs 2003.

[6] **Malekkianie, B.,** 2006. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerde Karbon Lifler Kullanılarak Güçlendirme. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Tezcan, A.,** 2003. Kolon Sarilma Bölgelerinin CFRP ile Güçlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] **Ersoy, U., Özcebe, G., Tankut, T., Akyüz, U., Erduran, E. and Erdem, I.,** 2003. Strengthening of infilled walls wih CFRP sheets, Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings. Nato SfP:977231, International Advanced Research Workshop, Izmir, Turkey.

[9] **Benjamin, J.R., Williams, H.A.,** The behaviour of One-Story Brick Shear Walls. *Journal of Structural Division*, A.S.C.E., Vol.**84**, No.ST4, Paper No:1723, 1957.

[10] **Smith, B.S.,** 1962. Lateral Stiffness of Infilled Frames. *Journal of Structural Division*, A.S.C.E., Vol.**88**, pp.183-199.

[11] **Fukuyama, K., Higashibata, Y. ve Miyauchi, Y.,** 2000. Studies on Repair and Strengthening Methods of Damaged Reinforced Concrete Columns, *Cement & Concrete Composites*, 81-88.

[12] **Peker, Ö.,** 2005. Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların CFRP ile Güçlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul**.**

[13] **Özgen, K., Mutlu, Ü.,** 2005. Karbon Elyaf Üretimi ve Özellikleri. *Yapı Dergisi*, Nisan, sf. 92-95.

[14] **Ersoy, U and S. Uzsoy,** 1971**.** The Behavior and Strength of Infilled Frames, Report No. MAG 205 TÜBİTAK, Ankara, Turkey.

[15] **Liauw, T.C. and S.W. Lee,** 1977. On the Behavior and the Analysis of Multi-Storey Infilled Frames Subjected to Lateral Loading. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Vol. **63**, Part 2, pp. 641-656, September.

[16] **Altın, S.,** 1990. Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Reinforced Concrete Infills, *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, February.

[17] **Altın, S., U. Ersoy and T. Tankut,** 1992. Hysteretic Response of Reinforced Concrete Infilled Frames. ASCE *Journal of Structural Engineering*, Vol. **118**, No. 8, pp. 2133-2150.

[18] **Schwegler, G.,** 1994. *Repair and Upgrading Techniques of Unreinforced Masonry Structures Utilized after Friuli and Campania/Basilicata Earthquakes*. Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 10, pp. 171-185.

[19] **M. Reinhorn, A. Madan.,** 1995. Evaluation Of Fiber Wrap System For In Plane Strengthening Of Masonry Walls. *Test Report*, Report No. **AMR 95-0002**, State University of New York at Buffalo.

[20] **Nanni, A., Norris, M.S.,** 1995. FRP Jacketed Under Flexure and Combined Flexure-Compression, *Construction and Building Materials*. **9**, 273-281.

[21] **M.Haroun, E.H.Ghoneam, A.E.Salama**, 1996. Seismic Strengthening Of Masonry Infilled Frames By Fiber Composite. Report prepared for Hexcel-Fyfe Co.

[22] **Negro, P., Verzeletti, G.,** 1996. Effect of Infills on the Global Behaviour of R/C Frames: Energy Considerations from Pseudo-synamic Tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. **25**, No. 7, pp. 753-773.

[23] **Fancher, N.,** 1997. External Strengthening with FRP Composites, *Concrete Repair Bulletin*, 16-21.

[24] **Mirmiran, A. and Shahawy, M.,** 1997. Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, ASCE *Journal of Structural Engineering*, 123, No:5, 583-590.

[25] **Seible, F., Priesley, J.H., Hegemier, G.A., and Innamoroto, D.,** 1997. Seismic Retrofit of RC Columns with Continious Carbon Fiber Jackets. *Journal of Composites for Construction*. 1, 52-62.

[26] **Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Jin, L.,** 1997. Repair of Earthquake Damaged Reinforced Concrete Columns with FRP .Wraps. *Struct., J., ACI*, 94, No:2, 206-215.

[27] **Xiao, Y. and Ma, R.,** 1997. Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing. *Journal of Structural Engineering,* **123**, 1357-1364.

[28] **Marjani,** 1997. F**.,** Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading. *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, September.

[29] **Ehsani, M.R., H. Saadatmanesh and A. Al-Saidy,** 1997. Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlays. ASCE *Journal of Composites for Construction*, Vol. **1**, No. 1, pp. 17-25, February.

[30] **Triantafillou, T.C.,** 1998. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. *Journal of Composites for Construction, ASCE,* , pp.98-104.

[31] **Demers, M. and Neale, K.W.,** 1999. Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre-reinforced Composite Sheets. *Can.J.Civ.Eng*. **26**, No:2, 226-241.

[32] **Toutanji, H.A.,** 1999. Stress Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets, *ACI Materials Journal*, 96, No:3, 397-403.

[33] **Unjoh, S., Tereyama, T., Adachi, Y., and Hoshikuma, J.,** 2000. Seismic Retrofit of Existing Highway Bridge Columns in Japan. *Cement and Concrete Composites*, 1,52-62.

[34] **Xiao, Y. and Wu, H.,** 2000. Compressive Behaviour of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, *Journal of Materials in Civil Engineering* **12**.No:2, 139-146.

[35] **Fukuyama, H., Sugano, S.,** 2000**.** Japanese Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings After The Hyokogen-Nanbu Earthquake, *Cement and Concrete Composites*, No:22, 59-79.

[36] **Wang, Y.C. and Restrepo, J.,** 2001. Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined wih Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets, *ACI Structural Journal*, **98** No:3, 337-385.

[37] **Saatcioglu, M., and Elnabelsy, G.,** 2001. Seismic Retrofit Of Bridge Columns with CFRP Jackets. *Composites in Civil Engineering*, **1**, 833-838.

[38] **Haroun, M.A., Mosallam, A.S., Feng, M.Q. and Elsanadedy, H.M.,** 2001. Experimantel Investigation of Seismic Repair and Retrofit of Bridge Columns by Composites Jackets. FRP *Composites in Civil Engineering*, **1**, 838-857.

[39] **Albert, M. L., A. E .Elwi and R. J. J. Cheng,** 2001. Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using FRPs. ASCE *Journal of Composites for Construction,* Vol. **5**, No. 2, pp. 76-84, May.

[40] **Li, T., P. F. Silva, A. Belarbi, A. Nanni and J. J. Myers.,** 2001. Retrofit of Unreinforced Infill Masonry Walls with FRP. *Proceedings of the First International Conference Composites in Construction*, Porto, Portugal, October.

[41] **Mertol, H. C.,** 2002. Carbon Fiber Reinforced Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame Behaviour. *M.S. Thesis*, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, July.

[42] **Erduran, E.,** 2002. Behaviour of Brick-Infilled Reinforced Concrete Frames Strengthened by FRP Reinforcement. Phase II, *M.S. Thesis*, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, July.

[43] **İlki, A., Kumbasar, N.,** 2002. Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzeme ile Hasarlı Betonarme Elemanların Onarım ve Güçlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 2597-2616, Yazı 175, İstanbul.

[44] **Tan, K.H.,** 2002. Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer. *ASCE Journal of Composites for Construction,* **6**, No:3, 175-183.

[45] **Hanoğlu, K. B.,** 2002. Fiber Reinforced Plastic Overlay Retrofit of Hollow Clay Tile Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames, *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Boğaziçi University, Istanbul.

[46] **Bousias, S., Triantafillou, T., Fardis, M., Spathis, L., and Oregan, B.,** 2002. Experimental Behaviour of Deficient Rectangular Columns with Externally FRP. *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*, UK. September 9-13.

[47] **Bousias, S., Spathis, L., Triantafillou, T., and Fardis, M.,** 2002. Seismic Retrofit of Corrosion-Damaged Rc Columns. 12th *European Conference on Earthquake Engineerin*g, London. September 9-13.

[48] **Sheikh, S.A. and Yau, G.,** 2002. Seismic Behaviour of Concrete Columns Confined with Fiber-Retrofit Polimers. *ACI Structural Journal*. *99*, 72-80.

[49] **Gençoğlu, M., Eren, İ., Atınç, T.,** 2003. Hasarlı Betonarme Kenar Kiriş-Kolon Birleşimleri İçin Farklı Güçlendirme Yöntemlerinin İncelenmesi. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 26-30 Mayıs, İstanbul.

[50] **Lacobucci, R.D., Sheikh, S.A. and Bayrak, O.,** 2003. Retrofit of Square Concrete Columns Confined With Fiber-Reinforced Polimer for Seismic Resistance. *ACI Structural Journal*, **100**, 785-794.

[51] **Lee, H., Kage, T., Noguchi, T. and Tomosawa, F.,** 2003. An experimantel study on the Retrofing effects of Reinforced Concrete Columns Damaged by Rebar Corrosion Strengthened with CFRP sheets. *Cement and Concrete Research,* **33**, 563-570.

[52] **Kaltakçı, Y., Köken, A.,** 2003**.** Dolgu Duvarlı Çelik Çerçevelerin Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Davranışı Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 26-30 Mayıs, İstanbul.

[53] **Akgüzel, U.,** 2003. Seismic Retrofit of Brick Infilled RC Frames with Lap Splice Problem In Columns. *M.S. Thesis*, Department of Civil Engineering, Bogazici University, İstanbul.

[54] **Özcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Erduran, E., Keskin, Mertol H.,** 2003. Strengthening of brick infilled RC frames with CFRP. Structural Engineering Research Unit, Rep. No. 2003/1, TÜBİTAK, Ankara.

[55] **Ye, L.P., Zhang, K., S.H. and Feng, P.,** 2003. Experimental Study on Seismic Strengthening of RC Columns with Wrapped CFRP Sheets. *Construction and Building Materials*, **17**, 499-506.

[56] **İlki, A., and Kumbasar, N.,** 2003, Compressive Behaviour of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-circular Cross Sections. *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, No:3, 381-406.

[57] **İlki, A., and Kumbasar, N. and Koc, V.,** 2003. Low and Medium Strength Concrete Members Confined by Fiber Reinforced Polymer Jackets, *ARI*, The Bulletin of the Istanbul Technical University, 53, No:1, 118-123.

[58] **İlki, A., Tezcan, A., Koc., V. and Kumbasar, N.,** 2004. Seismic Retrofit of Non-ductile Rectangular Reinforced Concrete Columns by CFRP Jacketing. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C. Canada, August 1-6.

[59] **Yüksel, E., İlki, A., Erol, G., Demir, C., and Karadoğan, H.F.,** 2006. Seismic retrofit of infilled reinforced concrete frames with CFRP composites. Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, Nato SfP:977231, International Advanced Research Workshop, Istanbul, Turkey.

[60] **Hashemi, A., Mosalam, M.,** 2006. Shake-Table Experiment On Reinforced Concrete Structure Containing Masonry İfill Wall. Earthquake Engineering and Structural Dyamics.

[61] **Elgawady, M.A., P. Lestuzzi and M. Badoux,** 2007. Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymers. ASCE *Journal of Composites for Construction*, Vol. **11**, No. 1, pp. 50-61.

[62] **Atmaca, S.,** 2008. Strengthenıng of Brick Infilled Rc Frames Wıth Dıfferent Aspect Ratıos By Means Of Cfrp Overlays. *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Boğaziçi University, Istanbul.

[63] **Sayın, B., Kaplan, S.A.,** 2005. *Deprem Etkisi Altındaki Betonarme Yapılarda Dolgu Duvarların Modellenme Teknikleri*. İÜ İnşaat Fakültesi.

[64] **FEMA 356**. 2000. Pre-standard And Commentary For The Seismic Rehabilitation of Buildings, American Society Of Civil Engineers, Reston.

[65] **Korkmaz, A., Uçar, T.,** 2006. Yumuşak Kat Düzensizliğinin Betonarme Binaların Deprem Davranışında Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt **11**, Sayı 2.

[66] **Korkmaz, A., Uçar, T.,** 2006. *Betonarme Binaların Deprem Davranışında Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

[67] **Uygun, G., Celep, Z.,** 2007. Betonarme Bir Binanın Deprem Güvenliğinin Deprem Yönetmeliği'ndeki (2007) Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerle Karşılaştırmalı İncelenmesi. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.

[68] **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik,** 2007. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

[69] **SAP 2000,** Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California. State University of New York at Buffalo. Target Acceleration Spectra Compatible Time Histories Program V.1. Engineering Seismology Laboratory, New York.

[70] **Peker, K., Kolgu, S.,** 2003. Betonarme Kesit Davranışında Eksenel Yük, Malzeme Modeli Sargı Donatısı Oranının Etkisi. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.

[71] **XTRACT 2001**, *Cross Sectional Analysis of Components*, Imbsen Software System, Sacramento.

[72] **Yüksel, E., Sürmeli, M., Yüce, S.Z., Karadoğan H.F.,** 2006. *Prefabrik Kolonların Tersinir Yükler Etkisindeki Davranışının Modellenmesi*. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı.

[73] **Polyakov, S.V.,** 1960. *On the Interaction Between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in Plane of the Wall*. Translation in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, San Francisco, CA, pp. 36-42.

[74] **Holmes, M.,** 1961. Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Vol. **19**, August 1961, pp. 473-478.

[75] **Smith, B.S., Carter, C.,** 1969. A Method of Analysis for Infilled Frames. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Vol. **44**, Part 2, pp. 31-48.

[76] **ACI 530-95.,** 1999. Building *Code Requirements for Masonry Structures*, American Concrete Institute, Washington.

[77] **Mainstone, R.J.,** 1971. On the Stiffness and Strength of Infilled Frames. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Vol. 49, Supplementary Paper 7360S, pp. 57-90.

[78] **Paulay, T., Priestley, N.,** 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*s. John Wiley&Sons Inc.

[79] **Klingner, R.E., Bertero V.V.,** 1978. Earthquake resistance of Infilled Frames. *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. **104**, No. ST6, pp. 973-989, June.

[80] **Al-Chaar, G.K., G.E. Lamb,** 2002. Design of Fiber Reinforced Polymer Materials for Seismic Rehabilitation of Infilled Concrete Structures, Technical Report, US Army Corps of Engineers, *Technical Report*, **ERDC/CERL TR-02-33**, December.

[81] **Drysdale, R. G., A.A.,** 1999. *Masonry Structures: Behavior and Design, The Masonry Society*, Colorado.

[82] **Dawe, J.L., C.K. Seah.,** 1989. Behavior of Masonry Infilled Steel Frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. **16**.

[83] **Durrani, A.J., Y.H. Luo**., 1994. Seismic Retrofit of Flat-Slab Buildings With Masonry Infills, NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Walls, *Technical Report*, **NCEER-94-0004**, San Francisco.

[84] **Flanagan, R.D., Bennett**, **R.N.,** 1999. In-Plane Behavior of Structural Clay Tile Infilled Frames. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **125**, No. 6, pp. 590-599.

[85] **Saneinejad, A., B. Hobbs.,** 1995. Inelastic Design of Infilled Frames", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **121**, No. 4, pp. 634-650.

[86] **El-Dakhakhni, W.W.,** 2003. Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **129**, No. 2, pp. 177-185.

[87] **El-Dakhakhni, W.W.,** 2002. Experimental and Analytical Seismic Evaluation of Concrete Masonry-Infilled Steel Frames Retrofitted Using GFRP Laminates. *Ph.D. Dissertation*, Drexel University.

[88] **Buonopane, S.G, R.N.White.,** 1999. Pseudodynamic Testing of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame. *ASCE Journal of Structural Engineering,* Vol**. 125**, No. 6, pp. 578-589.

[89] **Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R**. 1988. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Division* (ASCE), **114**(8), 1804-1826.

[90] **ATC-40,** 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California.

[91] **ACI 318,** 1999. Building Code Requirements for Reinforced concrete and Commentary. American Concrete Institute, Detroit, Mich.

[92] **Erdem, I., U.Akyüz, U. Ersoy and G. Özcebe.,** 2006. An Experimental Study on Two Different Strengthening Techniques for RC Frames", *Engineering Structures*, Vol**. 28**, pp. 1843-1851.

[93] **Celep, Z., Gençoğlu, M.,** 2003. Deprem Etkisindeki Betonarme Çerçeve Taşıyıcılı Sistem Davranışına Bölme Duvarların Etkisi. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı* İstanbul.26-30 Mayıs.

[94] **Altın, S., Anıl, Ö., Kara, E., Kaya, M.,** 2007. An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips". Civil Engineering Department, Gazi University, Turkey.

[96] **Canbay E, Ersoy U, Özcebe, G.,** 2003. Contribution of RC Infills to the Seismic Behavior of Structural Systems. *ACI Structural Journal*, V.**100**, No:5.

[97] **Yalçın, C., Kaya, O., Sinangil, M.,** 2006. Seismic Retrofitting of R/C Columns Having Plain Rebars Using CFRP Sheets for improved Strength And Ductility. Department of Civil Engineering, Bogazici University, 34342 Bebek, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Halit Coza

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir-23.02.1978

Adres: Çaybaşı Mah. No:51 Denizli

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü / 2000

Yüksek Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü / 2003

Yayın Listesi:

- Özgen, K., **Coza, H.,** 2005. Binalarda Deprem Hasarları ve Nedenleri, *Yapı Dergisi*, Aralık, No.289, s; 86-94.İstanbul.