T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BETONARME BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU DUVARLARIN ETKİSİ

Cemil ÖZKAN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Barış SAYIN

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa GENÇOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Haziran, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Cemil ÖZKAN tarafından, **Prof. Dr. Barış SAYIN** danışmanlığında hazırlanan **"BETONARME BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU DUVARLARIN ETKİSİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **27/06/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Barış SAYIN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Turgay ÇOŞGUN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Fuat DEMİR Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Mehmet Selim ÖKTEN Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Ziya MÜDERRİSOĞLU Beykent Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Anneannem Emine Karakaya’ya ve Büyük Halam Elmas Kılıç'a ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

BETONARME BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU DUVARLARIN ETKİSİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sürecinde tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen ve bana yol gösteren danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Barış SAYIN'a ve Sayın Prof. Dr. Mustafa GENÇOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ve Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada yardımlarını esirgemeyen tüm laboratuvar personeline; Öğr. Gör. Hakan SARUHAN'a, İnş. Yük. Müh. Fatih ŞAHİN'e, Tekniker Mahmut ŞAMLI'ya, Teknisyen Turgay ÖZGÜNAY'a ve tez çalışmasının her aşamasında büyük yardımları olan Teknisyen Hamdi ATEŞ'e özellikle teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda deneysel çalışma için bana laboratuvar imkanlarını sunan Laboratuvar Sorumlusu Sayın Prof. Dr. Ercan YÜKSEL'e teşekkür ederim. Deneysel çalışma sürecinde işinden izin alarak deneylerimde bana yardım eden değerli meslektaşım Sayın İnşaat Yüksek Mühendisi Burçin KOÇAK'a, ders aşamasında ve tez çalışmalarımda büyük destek ve yardımları olan değerli arkadaşım İnşaat Mühendisi Bekir İZMİRLİ'ye, tez yazımı sürecinde ara ara fikirlerine danıştığım değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Selim ÖKTEN'e çok teşekkür ederim.

Doktora eğitimim sürecinde her türlü destek ve motivasyon sağlayan, olumlu/olumsuz tüm durumlara hoşgörü ile yaklaşan tez izleme komitesindeki değerli hocalarım başta Sayın Dr. Öğrt. Üyesi Ziya MÜDERRİSOĞLU'na ve Sayın Prof. Dr. Turgay ÇOŞGUN'a şükranlarımı sunarım.

Ayrıca analitik çalışmalarımda bana her türlü desteği sağlayan değerli meslektaşım Sayın İnşaat Mühendisi Çağrı ÖZSUCU'ya özellikle teşekkür etmek isterim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli eşime, anneme ve ailemin tüm bireylerine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ve Can'a… En büyük teşekkür onun. 4 yaşına girecek olan oğlum Can'ın oyun tekliflerini bu süreçte geri çevirdiğim ve oyun zamanlarında yeterince yanında olamadığım için öncelikle ondan özür diliyor, gösterdiği sabır ve olgunluk için en büyük teşekkürü ona ediyorum.

Haziran 2025 **Cemil ÖZKAN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
ABSTRACT ..... **xxii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI 2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. TEKSTİL TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER 6
2.1.1. Yeni Nesil Kompozitlerin Gerekliliği 6
2.1.2. PPR Yönteminin Kavramsal Altyapısı 7
2.1.3. TRCC Plakaların Üretim Süreci 8
2.1.4. Üretilen Numunelerin Fiziksel Özellikleri 12
2.1.5. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 12
2.1.6. Üretim Sürecinde Karşılaşılan Teknik Zorluklar ve Çözüm Yolları 14
2.1.7. PPR Yönteminin Literatürdeki Yeri ve Yenilikçi Yönleri 15
2.1.8. Sonuçlar ve Değerlendirme 16
2.2. BETONARME ÇERÇEVELERİN ÜRETİMİ 16
2.2.1. Betonarme Çerçevelerin Özellikleri 16
2.2.2. Betonarme Çerçevelerin Üretimi 19
2.2.3. Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi 23
2.2.4. Numunelerin Genel Özellikleri 26
2.3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ 32

2.3.1. Duvar Harcı Deneyleri 33
2.3.2. Tuğla Deneyleri 34
2.3.3. TRCC Harcı Deneyleri 35
2.3.4. Donatı Çekme Deneyi 36
2.3.5. Beton Dayanımı ve Elastisite Modülü 37
3. YÖNTEM 40
3.1. BETONARME ÇERÇEVELERİN DENEY DÜZENEĞİ 40
3.1.1. Ölçüm Düzeneği 41
3.1.2. Yükleme düzeneği 45
3.1.3. Yükleme protokolü 47
3.1.4. Deneysel Hasar ve Olay Takibi 48
4. BULGULAR 50
4.1. BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ 50
4.1.1. Çıplak/Yalın Çerçeve Deneyi 50
4.1.2. Dolgu Duvarlı Çerçeve Deneyi 57
4.1.3. AR-2-2-A Kodlu Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi 63
4.1.4. AR-2-4-A Kodlu Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi 68
5. TARTIŞMA 75
5.1. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 75
5.1.1. Çıplak Betonarme Çerçeve 75
5.1.2. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve 79
5.1.3. AR-2-2-A Kodlu Betonarme Çerçeve 83
5.1.4. AR-2-4-A Kodlu Betonarme Çerçeve 87
5.2. ANALİTİK ÇALIŞMA 91
5.2.1. Analitik Yaklaşım 91
5.2.2. Analitik Model 108
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 116
6.1. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 116
6.2. ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI 120
6.2.1. Analitik Yaklaşım Sonuçları 120
6.2.2. Analitik Model Sonuçları 121
6.3. ÖNERİLER 125
KAYNAKLAR 127
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 130

ETİK KURUL İZİN YAZISI 131
KURUM İZNİ YAZILARI 132
ÖZGEÇMİŞ 133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitler (TRCC).....6

Şekil 2.2: PPR üretim tekniği için geliştirilen üretim bandı.....7

Şekil 2.3: Matris harcı için kullanılan mikser.....8

Şekil 2.4: Tekstil malzemesinin üretim bandına yerleştirilmesi (Balcı, 2023). 9

Şekil 2.5: Çimento esaslı harcın ve tekstil malzemesinin birleşmesi. 9

Şekil 2.6: Çimento esaslı harç ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin iç kalıba sarım yöntemiyle kalıplanması (Gür,2017). 10

Şekil 2.7: Çimento esaslı harç ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin dış kalıba alınması ve hidrostatik basınca hazır hale getirilmesi (Balcı, 2023). 10

Şekil 2.8: Çimento harcı ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin levha haline getirilmesi a) Plaka kesim ölçüleri, b) Kesilmiş plakalar, c) 2 katmanlı plaka, d) 4 katmanlı plaka (Gür, 2017, Daşkıran, 2018 ve Balcı, 2023). 12

Şekil 2.9: Ar-Glass tekstil malzemesi.....14

Şekil 2.10: 1/3 Ölçekli betonarme çerçeve numunesinin boyutları ve donatı detayı. 17

Şekil 2.11: Üretilen betonarme çerçeve numuneleri. 18

Şekil 2.12: BA çerçevelere ilave edilen dolgu duvarlarda kullanılan tuğla numunesi.....19

Şekil 2.13: BA çerçeveler a) kolon-kiriş donatıları, b) strain-gauge detayı ve c) çerçeve kalıpları, d) betonu dökülmüş çerçeve numuneleri. 20

Şekil 2.14: Çerçeve donatılarına strain gauge yapıştırılması a) donatıların zımpara ile temizlenmesi, b) donatıda temiz yüzey, c) strain gauge yapıştırılmış kolon donatıları ve d) strain gauge detayı. 21

Şekil 2.15: Çerçevede bırakılan çelik çubuklar. 22

Şekil 2.16: Betonarme çerçeve numunelere dolgu duvar örülmesi. 22

Şekil 2.17: TBDY'ye göre uygulanmış AR-Glass ankrajlar. 23

Şekil 2.18: Ankrajlı olarak güçlendirilen çerçevelerde ankraj detayları 24

Şekil 2.19: Dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin TRCC ile ankrajlı olarak güçlendirilmesi. 25

Şekil 2.20: Dolgu duvarlı çerçevelerin güçlendirme tabakaları. 25

Şekil 2.21: Güçlendirilen BA çerçeve numunelerin kod açılımı. 26

Şekil 2.22: Çıplak/Yalın olarak bırakılmış referans (şahit) numunesi. 28

Şekil 2.23: Dolgu duvarlı referans (şahit) numunesi. 29

Şekil 2.24: İki taraftan 2 katmanlı TRCC plakalar ile ankrajlı olarak güçlendirilmiş AR-2-2-A kodlu BA çerçeve. 30

Şekil 2.25: İki taraftan 4 katmanlı TRCC plakalar ile ankrajlı olarak güçlendirilmiş AR-2-4-A kodlu BA çerçeve. 31

Şekil 2.26: Standart basınç deneylerinde kullanılan press makinesi. 32

Şekil 2.27: Standart donatı çekme deneylerinde kullanılan düzenek. 32

Şekil 2.28: Beton gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için kullanılan düzenek. 33

Şekil 2.29: Dolgu duvarların üretiminde kullanılan çimento harcının standart basınç deneyleri. 33

Şekil 2.30: Dolgu duvarların üretiminde kullanılan tuğlaların standart basınç deneyleri. 35

Şekil 2.31: Harç numunelerinde basınç deneyi. 35

Şekil 2.32: Üç noktalı eğilme deneyi (Gür, 2017). 36

Şekil 2.33: Betonarme çerçevelerin üretiminde kullanılan donatıların çekme deneyleri a) mekanik çekme aleti, b) donatı akma durumu. 36

Şekil 2.34: Betonarme çerçevelerin üretiminde kullanılan donatıların ortalama gerilme – şekil değiştirme eğrisi. 37

Şekil 2.35: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun basınç deneyleri. 38

Şekil 2.36: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi. 38

Şekil 2.37: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için kullanılan düzenek. 39

Şekil 3.1: Deney numunesinin her iki yüzüne ve temele yerleştirilmiş yerdeğiştirme ölçerlerin (LVDT) yerleri ve kanal numaraları 41

Şekil 3.2: Donatılara yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerin (strain gauge) yerleri ve kanal numaraları. 44

Şekil 3.3: Çerçeve numunelerine eksenel ve yatay yüklemenin yapıldığı düzeneğin şematik çizimi. 45

Şekil 3.4: Deney düzeneği. 46

Şekil 3.5: Deneylerde uygulanan yer değiştirme protokolü. 47

Şekil 3.6: Deneylerde uygulanan itme-çekme yönleri ve kalem renkleri. 48

Şekil 4.1: Çıplak çerçeve numunesi deney düzeneği 51

Şekil 4.2: Çıplak çerçeve numunesinde 7. ve 8. çevrimlerde oluşan ilk çatlaklar. 52

Şekil 4.3: Çıplak çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu. 54

Şekil 4.4: Çıplak çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi. 55

Şekil 4.5: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deney düzeneği 57

Şekil 4.6: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinde ilk çevrimlerde oluşan çatlaklar. 58

Şekil 4.7: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinin ilerleyen çevrimlerdeki hasar durumu. 59

Şekil 4.8: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu. 60

Şekil 4.9: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi. 61

Şekil 4.10: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi deney düzeneği. 63

Şekil 4.11: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesinde oluşan çatlaklar. 64

Şekil 4.12: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu. 65

Şekil 4.13: AR-2-2-A çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi. 66

Şekil 4.14: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi deney düzeneği 68

Şekil 4.15: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesinde 5. ve 6. çevrimlerde oluşan ilk çatlaklar. 70

Şekil 4.16: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu. 71

Şekil 4.17: AR-2-4-A çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi. 72

Şekil 5.1: Çıplak çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi. 76

Şekil 5.2: Çıplak çerçeve numunesi zarf eğrisi. 76
Şekil 5.3: Çıplak çerçeve numunesi enerji grafiği. 77
Şekil 5.4: Çıplak çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi. 79
Şekil 5.5: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi. 79
Şekil 5.6: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi zarf eğrisi. 80
Şekil 5.7: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi. 81
Şekil 5.8: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi enerji grafiği. 82
Şekil 5.9: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatya yük-yer değiştirme ilişkisi. 83
Şekil 5.10: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi. 85
Şekil 5.11: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi. 85
Şekil 5.12: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi enerji grafiği. 86
Şekil 5.13: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi yük-yer değiştirme ilişkisi. 87
Şekil 5.14: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi zarf eğrisi. 88
Şekil 5.15: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi enerji grafiği. 89
Şekil 5.16: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi. 89
Şekil 5.17: Çalışmada kullanılan dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli. 92
Şekil 5.18: Çalışma kapsamında verilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli. 93
Şekil 5.19: Çalışmada geliştirilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli. 93
Şekil 5.20: Çalışmada dikkate alınan dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli. 94
Şekil 5.21: Çerçevelerin göçme mekanizması. 95
Şekil 5.22: Eşdeğer basınç çubuğu modeli. 95
Şekil 5.23: Sonlu elemanlar modeli. 96
Şekil 5.24: Dolgu Duvarların Hasır Çelik Donatılı Özel Sıva ile Güçlendirilmesi 97
Şekil 5.25: Dolgu Duvarların Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesi 98
Şekil 5.26: Dolgu Duvarların analitik parametreleri. 100
Şekil 5.27: Eşdeğer basınç çubuğu rijitlik değerlerinin karşılaştırılması. 102
Şekil 5.28: Çıplak çerçevenin göçme mekanizması. 103

Şekil 5.29: Dolgu Duvarlı çerçevenin a) Deney sonu hasar durumu, b) Göçme mekanizması, c) Benzeşik durum. 104

Şekil 5.30: Güçlendirilmiş çerçevelerin göçme mekanizması. b) AR-2-2-A çerçevesi deney sonu hasar durumu, c) AR-2-4-A çerçevesi deney sonu hasar durumu. 105

Şekil 5.31: Sap 2000 ile hesaplanan M_p değeri. 106

Şekil 5.32: Mevcut yapının kalıp planı ve Etabs ile modellenmiş 3D görüntüsü. 111

Şekil 5.33: Mevcut yapı için dikkate alınacak duvar yerleri ve Etabs ile modellenmiş 3D görüntüsü. 112

Şekil 5.34: Dolgu duvarlar için kullanılan eşdeğer basınç çubuğu modeli. 113

Şekil 5.35: Etabs programında dolgu duvarlar için kullanılan eşdeğer basınç çubuğu modeli. 114

Şekil 6.1: Tüm BA çerçeve numunelerinin yatay yük-yer değiştirme ilişkileri. 116

Şekil 6.2: BA çerçeve numunelerinde ulaşılan maksimum yük. 117

Şekil 6.3: Çerçeve numunelerinin 14. Çevrimleri sonunda sönümledikleri toplam enerji. 118

Şekil 6.4: Çerçeve numunelerinin yatay rijitlik değişimleri. 120

Şekil 6.5: Deneysel ve analitik yaklaşım sonuçlarının karşılaştırılması. 121

Şekil 6.6: Etabs modellerinin mod şekilleri ve ilk üç hâkim periyot değerleri. 122

Şekil 6.7: Etabs modellerinin x yönü kapasite eğrilerinin kıyaslanması. 123

Şekil 6.8: Etabs modellerinin y yönü kapasite eğrilerinin kıyaslanması. 123

Şekil 6.9: Etabs modellerinin x ve y yönü ötelenme oranlarının kıyaslanması. 124

Şekil 6.10: Etabs modellerinin x ve y yönünde yaptığı max. deplasman oranlarının kıyaslanması. 125

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Üretilen TRCC kompozit ürünlerinin genel özellikleri. 12

Tablo 2.2: TRCC Kompozitleri oluşturan matris harcı karışım oranları (Daşkıran, 2018)..... 13

Tablo 2.3: AR Glass tekstil malzemesinin teknik özellikleri. 14

Tablo 2.4: Üretilen BA çerçeve numuneleri ve özellikleri. 27

Tablo 2.5: Dolgu duvar harcının basınç dayanımı sonuçları. 34

Tablo 2.6: Tuğla numunelerinin basınç deney sonuçları. 34

Tablo 2.7: TRCC harcının mekanik dayanım sonuçları (Daşkıran, 2018). 36

Tablo 2.8: Karot örneklerinin basınç dayanımı sonuçları. 37

Tablo 3.1: Çerçeve numunelerinde kullanılan yerdeğiştirme ölçer listesi. 43

Tablo 4.1: Çıplak çerçeve numunesi deneyinde meydana gelen önemli olaylar. 56

Tablo 4.2: Dolgu duvarlı BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar. 62

Tablo 4.3: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar. 67

Tablo 4.4: AR-2-4-A kodlu BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar. 73

Tablo 5.1: Çıplak BA çerçeve numunesi yükleme protokolü. 76

Tablo 5.2: Çıplak BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi 78

Tablo 5.3: Dolgu duvarlı BA çerçeve numunesi yükleme protokolü. 81

Tablo 5.4: Dolgu duvarlı BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi 82

Tablo 5.5: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yükleme protokolü 84

Tablo 5.6: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi. 86

Tablo 5.7: AR-2-4-A kodlu BA çerçeve numunesi yükleme protokolü.....88

Tablo 5.8: AR-4-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi.....90

Tablo 5.9: Güçlendirilmemiş dolgu duvarın analitik parametreleri. 100

Tablo 5.10: Güçlendirilmemiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri. 101

Tablo 5.11: Güçlendirilmiş dolgu duvarın analitik parametreleri. 101

Tablo 5.12: 2 katmanlı kompozit ile güçlendirilmiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri. 102

Tablo 5.13: 4 katmanlı kompozit ile güçlendirilmiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri. 102

Tablo 5.14: Deney çerçevelerinin analitik tahmin dayanım tablosu (D. Kakaletsis 2012). ...107

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

a_d : Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği (mm)

h_k : Kolon boyu (mm)

t_d : Dolgu duvarın köşegen uzunluğu (mm)

r_d : Orantı sabiti / rijitlikle ilişkili parametre

λ_d : Boy/en oranı ile rijitlik katsayısı

E_d : Dolgu duvar malzemesinin elastisite modülü (MPa)

θ : Eğim açısı (dolgu duvarın eğimi)

E_c : Betonun elastisite modülü (MPa)

I_k : Kolonun atalet momenti

h_d : Dolgu duvar yüksekliği (mm)

V_d : Dolgu duvarın kesme kuvveti dayanımı (kN)

A_d : Eşdeğer çubuğun kesit alanı (mm^2)

τ_d : Dolgu malzemesinin kesme dayanımı (MPa)

f_{yd} : Hasır donatının tasarım akma dayanımı (MPa)

ρ_{sh} : Yatay yöndeki hasır donatı oranı (donatı alanı / brüt alan)

f_d : Dolgu duvar basınç dayanımı (MPa)

T_f : Çekme çubuğunun çekme dayanımı (kN)

E_f : Lifli polimer şeritin elastisite modülü (MPa)

w_f : Lifli polimer şeritin genişliği (mm)

t_f : Lifli polimer şeritin kalınlığı (mm)

k_t : Çekme çubuğunun eksenel rijitliği (kN/mm)

Kısaltmalar	Açıklama
Ar-Glass	**:** Alkaliye Dayanıklı Cam
AR	**:** Alkaliye Dayanıklı
BA	**:** Betonarme
CFRP	**:** Karbon Lif Takviyeli Polimer
FEA	**:** Sonlu Eleman Yöntemi
FEMA	**:** Federal Emergency Management Agency
İTÜ	**:** İstanbul Teknik Üniversitesi
LP	**:** Lifli Polimer
LVDT	**:** Linear Vertical Displacement Transducer
PPR	**:** Pull Pour Roll
TBDY	**:** Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TRC	**:** Tekstil Takviyeli Beton
TRCC	**:** Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit
TRM	**:** Tekstil Takviyeli Mortar
TS	**:** Türk Standardı
TSE	**:** Türk Standartları Enstitüsü

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BETONARME BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE GÜÇLENDİRİLEN DOLGU DUVARLARIN ETKİSİ

Cemil ÖZKAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman: Prof. Dr. Barış SAYIN

II. Danışman: Prof. Dr. Mustafa GENÇOĞLU

Önemli ve hareketli bir deprem bölgesi olan bir coğrafyada yaşadığımız gerçeğini her gün meydana gelen irili ufaklı depremler bize hatırlatmaktadır. Tarihsel olarak bakıldığında büyük ve yıkıcı depremlerin oldukça sık meydana geldiği ve büyük can ve mal kaybına sebebiyet verdiği açıkça görülebilir. Hatta bazı orta ölçekli depremlerin bile ülkemizde yıkıcı etki gösterdiği olmuştur. Bunun en büyük sebebi oldukça yaşlı ve mühendislik hizmeti görmeyen bir yapı stokumuzun olduğudur. Bunun yanında, mevcut yapılardan alınan verilere bakıldığında görülen kalitesiz malzeme kullanımı da orta ölçekli depremlerde bile yıkıcı etkiyi iyice arttırmaktadır. Bu durumun bilincinde olmak ve bu [yıkıcı deprem-mevcut yapı] ilişkisine bir çözüm üretmek bu konularda çalışan araştırmacılar için önemli bir çalışma alanı olmuştur.

Bu konular göz önünde bulundurularak bu doktora tezi çalışmasında da mevcut yapıların iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için yeni ve pratik bir güçlendirme yöntemi araştırılmıştır. Bu kapsamda Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (TRCC) ile dolgu duvarlı yapıların güçlendirilmesinin amaç – sonuç ilişkisini ortaya koymak amacıyla hem deneysel hem de analitik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanılan Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (TRCC), çimento bazlı ince taneli bir matris içerisinde, yüksek dayanımlı sürekli, çift yönlü ve örgülü tekstil ağının yerleştirilmesiyle elde edilen gelişmiş kompozit malzemelerdir. Bu sistemler, geleneksel betonarme yapılarda karşılaşılan korozyon, yüksek ağırlık ve düşük şekil değiştirme kapasitesi gibi sınırlamaları aşmak üzere geliştirilmiştir. TRCC sistemlerinde kullanılan tekstil malzemesi (örneğin AR-Glass, Karbon Elyaf, Pva veya Bazalt Lifleri), iki boyutlu veya üç boyutlu örgülü yapılar halinde matrise yerleştirilebildiği ve bir uyum içinde birleşebildiği için yüksek aderans oluştururlar. Bu durum matrisle tekstil ağının tek bir malzeme gibi çalışmasını sağlamış olur. Örneğin bu doktora tezi kapsamında da kullanılan çok katmanlı tekstil yerleşimi, TRCC sistemlerine üstün çekme ve eğilme performansı kazandırır. Bu kazanım, TRCC sistemlerin güçlendirme elemanı olarak kullanıldığında önemli sonuçlar alınmasına vesile olmaktadır.

Bu doktora tezi, TRCC gibi kompozitlerin, duvarlı betonarme yapıların bölme duvarlarının güçlendirilmesinde kullanılarak bölme duvarların da mimari amaçlarının dışında yapıların deprem gibi dinamik yükler karşısındaki direncine katkı sağlayan elemanlar haline getirmeyi amaçlar. Yani bölme veya dolgu duvarlar, ikincil yapı elemanları yerine taşıyıcı elemanlar durumuna getirilerek yük aktarımına katkı sağlayacaktır. Bu amaçla, bu çalışma için 1/3 ölçekli 4 adet tek katlı, tek açıklıklı betonarme çerçeve üretilmiş ve deneysel çalışma programı çerçevesinde denenmiştir. Bu çerçevelerden birisi duvarsız, birisi sadece dolgu duvarlı, diğer ikisi de farklı özellikleri olan TRCC kompozitlerle güçlendirilerek deney çalışmaları için hazır hale getirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca betonarme çerçeve numunelerinin deneysel sonuçları TBDY-2018 ve FEMA-306 yönetmelikleri kapsamında analitik olarak da incelenmiş ve analitik sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama durumuna bakıldığında deneysel sonuçlar ile analitik sonuçların oldukça yakınsak değerler verdiği görülmüştür.

Son olarak, deneysel çalışmadaki güçlendirme yöntemleri kullanılarak 14 katlı mevcut bir betonarme bina, TRCC kompozitler ile güçlendirilmiş ve bu güçlendirme yönteminin yapının performans düzeyine etkisi incelenmiştir. Mevcut yapı, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarda itme analizi (Pushover) yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve alınan sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada, yeni bir güçlendirme malzemesi ve yöntemi geliştirilerek sismik aktivitesi oldukça yüksek olan ülkemizde depremlerde göçme riski taşıyan pek çok betonarme binanın

mevcut kullanım durumları ve amaçları değiştirilmeden daha hızlı, pratik ve ekonomik bir şekilde güçlendirilmesi amaçlanmıştır.

Betonarme çerçeveler içerisindeki dolgu duvarlar üzerine kolaylıkla uygulanabilen bu güçlendirme tekniği ile betonarme binaların mevcut kullanım alanları ve mimarisi değiştirilmeden güçlendirme uygulaması yapılabilecektir. Aynı zamanda bu teknikle yapılacak güçlendirme işlemi sürecinde mevcut yapıların tahliyesine, boşaltılmasına veya yapının içerisinde tahribatlı çalışmalara gerek kalmamaktadır.

Haziran 2025 , CLVII. sayfa.

Anahtar kelimeler: TRCC, Çimento Esaslı Kompozitler, Güçlendirme, Dolgu Duvar, AR-Glass

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EFFECT OF INFILL WALLS REINFORCED WITH CEMENT-BASED COMPOSITE PLATES ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

Cemil ÖZKAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Barış SAYIN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Mustafa GENÇOĞLU

Living in a region that is both seismically active and highly vulnerable to earthquakes is a reality constantly reminded by the frequent occurrence of small and moderate seismic events. A historical overview reveals that large and destructive earthquakes have occurred frequently in this region, causing significant loss of life and property. In fact, even moderate earthquakes have sometimes resulted in severe damage within our country. The primary reason for this is the existence of an aging and largely unengineered building stock. Furthermore, data obtained from existing buildings shows that the use of poor-quality materials further exacerbates the destructive effects of even moderate seismic events. Being aware of this situation and seeking solutions to the [destructive earthquake–existing building] relationship has become a critical area of research for many structural engineers and academics.

In light of these issues, this doctoral study investigates a new and practical strengthening method aimed at improving the performance of existing buildings. In this context, both

experimental and analytical studies were conducted to assess the cause–effect relationship of strengthening infilled walls using Textile Reinforced Cementitious Composites (TRCC).

TRCCs used for strengthening infill walls in this study are advanced composite materials produced by embedding high-strength, bidirectional, and woven textile meshes into a fine-grained cement-based matrix. These systems have been developed to overcome limitations commonly encountered in traditional reinforced concrete structures, such as corrosion, high weight, and limited deformation capacity. The textile reinforcement used in TRCC systems (e.g., AR-Glass, carbon fiber, PVA, or basalt fibers) can be integrated into the matrix as 2D or 3D woven fabrics, achieving high bonding and compatibility with the matrix. This allows the textile and the cementitious matrix to act together as a unified material. In this doctoral study, multilayer textile placement was used, which significantly improves the tensile and flexural performance of TRCC systems. This performance advantage leads to promising results when TRCCs are used as strengthening elements.

The main objective of this study is to utilize TRCCs to strengthen infill walls in reinforced concrete buildings, transforming these walls from non-structural architectural elements into components that contribute to the structural performance under dynamic loads such as earthquakes. In other words, infill or partition walls, typically considered secondary elements, are turned into load-resisting components that enhance the lateral load-bearing capacity of buildings.

To achieve this, four 1:3 scale single-story, single-bay reinforced concrete frame specimens were produced and tested as part of the experimental program. Among them, one was a bare frame without infill, one included only an unreinforced masonry infill, and the remaining two were strengthened using TRCC systems with different properties. The results obtained from these tests were compared to evaluate the effectiveness of TRCC-based strengthening.

In addition, the experimental results of the reinforced concrete frame specimens were analytically examined within the scope of the TBDY-2018 and FEMA-306 codes, and the analytical results were compared with the experimental ones. It was observed that the experimental and analytical results yielded highly convergent values.

Finally, using the strengthening techniques validated in the experimental study, a 14-story existing reinforced concrete building was retrofitted with TRCC composites. The effect of this strengthening approach on the building's seismic performance was evaluated. Pushover

analyses were performed for both the retrofitted and unretrofitted conditions, and the results were compared to assess the improvement in structural behavior.

This study proposes a novel strengthening material and method aimed at providing a faster, more practical, and cost-effective retrofit solution for many existing reinforced concrete buildings that are at risk of collapse in a highly seismically active country. The proposed strengthening technique, which can be easily applied to infill walls within reinforced concrete frames, allows for retrofitting without altering the building's existing architectural features or usage. Moreover, it eliminates the need for evacuation, demolition, or destructive interventions within the existing structure during the strengthening process.

June 2025, CLVII. pages.

Keywords: TRCC, Retrofitting, Cement-based composites, Infill wall, AR-Glass

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar, modern inşaat mühendisliğinin en yaygın kullanılan yapı sistemlerinden biridir. Ülkemiz gibi deprem bölgelerinde yer alan coğrafyalarda, bu yapıların dinamik yükler altında güvenilir bir performans sergilemesi, can ve mal güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bilindiği gibi depremler, yapılar üzerinde hem statik hem de dinamik etkiler oluşturan ve yapısal hasara neden olabilen doğal afetlerdir. Yük altında, betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarında meydana gelen çatlaklar, deformasyonlar veya kırılmalar, yapının genel davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, dinamik veya statik yükler altında yapıların dayanıklılığını ve sünekliğini artırmak, inşaat mühendisliği alanında sürekli geliştirilen ve geliştirilme ihtiyacı olan bir araştırma konusudur. Özellikle ülkemizdeki mevcut bina stokunun önemli bir kısmı, eski tasarım standartlarına ve yönetmeliklere göre inşa edilmiştir. Bu yapılar, güncel deprem yönetmeliklerinin gerektirdiği dayanım, süneklik ve enerji sönümleme kriterlerini karşılamaktan uzaktır. Bu tür eski yapıların yenilenmesi için büyük bir bütçeye ve zamana ihtiyaç duyulduğundan başka alternatif çözümler bulmaya çalışılmaktadır. Bu çözümler; en iyi ihtimalle mevcut yapıların güçlendirilmesi veya iyileştirilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Tabii ki her yapının ve her statik sistemin kendine özgü güçlendirme durumları olacaktır. Ancak, konut tipi betonarme yapılarda birincil taşıyıcı elamanların yanında duvarlar gibi taşıyıcı olmayan elemanların güçlendirilmesiyle de yapıların taşıma kapasitesinde önemli bir artışa gidildiği artık bilinmektedir.

Mimari amaçlı bölme duvarlar, betonarme yapıların taşıyıcı sistemlerinde önemli bir rol oynar. Bölme duvarlar, yapının yatay ve düşey yükler karşısında rijitliğini artırarak, genel yapı performansını etkiler. Ancak, geleneksel bölme duvarlar, deprem gibi tekrarlı yükler altında yetersiz kalabilmekte ve yapısal hasara neden olabilmektedir. Bu durum, yapıların güçlendirilmesini zorunlu kılmakta ve bu alanda yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Son yıllarda, yapısal güçlendirme uygulamalarında çimento esaslı kompozit malzemeler çok seyrek olsa da kullanılmaya çalışılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, dayanıklılık, yangın direnci, ekonomiklik ve uygulama kolaylığı gibi avantajları nedeniyle, özellikle deprem bölgelerinde tercih edilebilen bir güçlendirme yöntemi haline gelecektir.

Çimento esaslı kompozitler, betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarının dayanımını, yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırarak, deprem gibi dinamik yükler altında daha iyi bir performans sergilemelerini sağlar. Ancak, bu malzemelerin bölme duvarlar üzerine uygulanmasıyla yaratacak etkiyi ve tekrarlı yükler altındaki davranışları henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bu durum, literatürde ve uygulama alanlarında önemli bir boşluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışma, çimento esaslı kompozit malzemelerle güçlendirilen bölme duvarların, tekrarlı yükler altındaki davranışını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Deprem gibi dinamik yüklerin etkisi altında, güçlendirilmiş bölme duvarların gösterdiği performans hem deneysel hem de analitik yöntemlerle kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı malzeme kombinasyonları denenmiş ve yapılan güçlendirme teknikleri test edilerek, bu tekniklerin yapısal performansa olan etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş duvarların enerji yutma kapasitesi, süneklik davranışı, çatlak oluşumu ve hasar mekanizmaları gibi parametreler incelenerek, yatay yük taşıma güvenliği açısından optimize edilmiş çözümler önerilmiştir.

Bu çalışmanın özgün katkısı, çimento esaslı kompozit malzemelerle güçlendirilen bölme duvarların, tekrarlı yükler altındaki davranışını detaylı bir şekilde inceleyerek, bu malzemelerin yapısal performans üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Elde edilen bulgular, betonarme yapıların güçlendirilmesine yönelik yenilikçi yaklaşımlar sunacak ve mevcut yapı stokunun deprem performansını artırmaya yönelik pratik çözümler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Deneysel ve analitik olarak kurgulanan bu tezde, ülkemizdeki mevcut betonarme yapı stokunun taşıyıcı olmayan bölme duvarlarının güçlendirilmesi ile depreme dayanıklı yapılar haline getirilebilmesi konusu araştırılmıştır. Mimari amaçlarla imal edilmiş ve kolon – kiriş çerçevesi içerisinde kalan bölme duvarların çimento hamuru ve alkali dayanımlı cam tekstilden (AR-Glass) oluşan Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (TRCC) ile güçlendirilmesi ve bu güçlendirme yönteminin alternatif olarak yaygın bir şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca bu alternatif güçlendirme yönteminin uygulanılacağı binaların deprem yükleri altındaki performansının oldukça artacağı düşünülmektedir. Bu çalışma ile mevcut bir yapının ekonomik ve pratik bir şekilde çok fazla zaman kaybedilmeden iyileştirilmesi ve güncel yönetmeliklerde belirtilen performans düzeyine getirilmesi mümkün olacağı düşünülmektedir. Bu güçlendirme

yöntemiyle de mimari amaçlarla imal edilen ve duvarlarla sınırlandırılan bağımsız bölümlerin kullanım işlevlerini olabildiğince etkilemeden yapıların dayanıklılığının arttırılabileceği görülmüştür. Bir diğer önemli nokta ise mevcut bir yapıya bu güçlendirme tekniği uygulandığında yapının tahliye edilmeden ve tahribatlı çalışmalara gerek duyulmadan güçlendirilebilmesidir. Araştırmanın başlıca hedefleri olarak TRCC ile güçlendirilen yapıların; yatay ve düşey yük taşıma kapasitelerinin artırılması, yatay yer değiştirme potansiyelinin önemli ölçüde azaltılması ve enerji yutma kapasitelerinin büyütülmesidir.

Bu amaçla, bu çalışma için 1/3 ölçekli tek katlı-tek açıklıklı 4 adet betonarme çerçeve üretilmiş ve deneysel çalışma programı çerçevesinde İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında denenmiştir. Bu çerçevelerden birisi duvarsız, birisi sadece dolgu duvarlı, diğer ikisi de farklı özellikleri olan TRCC kompozitlerle güçlendirilerek deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler birbiriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada betonarme çerçeve numunelerinin deneysel sonuçları TBDY-2018 ve FEMA-306 yönetmelikleri kapsamında analitik bir yaklaşımla incelenmiş ve analitik sonuçlarla deneysel sonuçlar Taban Kesme Kuvveti üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama durumuna bakıldığında deneysel sonuçlar ile analitik sonuçların oldukça yakınsak değerler verdiği görülmüştür.

Son olarak, deneysel çalışmadaki güçlendirme yöntemleri kullanılarak 14 katlı mevcut bir betonarme bina, TRCC kompozitler ile güçlendirilmiş ve bu güçlendirme yönteminin yapının performans düzeyine etkisi incelenmiştir. Mevcut yapı, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarda itme analizi (Pushover) yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve alınan sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda güçlendirme yönteminin yapının performans düzeyini arttırdığı ve yer değiştirmeleri oldukça düşürdüğü görülmüştür.

Bu çalışmada, yeni bir güçlendirme malzemesi ve yöntemi geliştirilerek sismik aktivitesi oldukça yüksek olan ülkemizde depremlerde göçme riski taşıyan pek çok betonarme binanın mevcut kullanım durumları ve amaçları değiştirilmeden daha hızlı, pratik ve ekonomik bir şekilde güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Dahası, bu yöntemle yapılacak güçlendirme işlemi sürecinde mevcut yapıların tahliyesine, boşaltılmasına veya yapının içerisinde tahribatlı çalışmalara gerek kalmamaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Betonarme çerçeve sistemler, mevcut yapı stokunun büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Mevcut yapılar, özellikle de 2000 yılı öncesi yönetmeliklerle inşa edilenler, güncel deprem yönetmeliklerinin öngördüğü dayanım düzeylerini karşılayamamakta ve bu nedenle, yapıların deprem etkileri altındaki güvenliğini artırmak amacıyla çeşitli güçlendirme ve iyileştirme teknikleri geliştirilmektedir.

Bu bağlamda, Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (TRCC), geleneksel güçlendirme (kolon mantolama, perde ekleme vb.) sistemlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır (Soranakom ve Mobasher, 2009). TRCC sistemleri, özellikle dolgu duvarların ve çerçeve elemanlarının rijitliğini ve enerji sönümleme kapasitesini artırmak ve yapıların dinamik yükler altında yer değiştirme oranlarını azaltmak amacıyla kullanılır. Bu tür güçlendirme yöntemleri araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu konuda önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda yayınlanmış literatüre bakıldığında dolgu duvarlar hakkında yapılmış ilk çalışmalar neredeyse 1950'li yıllara kadar uzanmaktadır (Benjamin ve William, 1957). Ayrıca, 1990'lı ve 2000'li yıllarda oldukça yoğun çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar daha çok yığma duvar ve yığma tuğla üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle son 20 yılda dolgu duvarlarda farklı malzemelerin kullanılması ve bu dolgu duvarların farklı şekillerde güçlendirilmesi konusu çalışılmış ve önemli bir çalışma alanı olmuştur. 1990'lı yıllara bakıldığında Ehsani ve diğ. (1997) yaptıkları çalışmada, Tuğla kâgirin kesme mukavemetine dış yüzeylere epoksi yapıştırıcı ile bağlanan FRP'nin etkisini araştırmıştır. Numunelerin mukavemetlerinin ve sünekliklerinin bu teknikle gözle görülür bir şekilde arttığı deney sonuçlarından görülmektedir. Yine aynı şekilde Kolsch (1998) yaptığı çalışmada yapı malzemelerinin yüzeyine dıştan uygulanabilen bir güçlendirme tekniği olan karbon elyaf ve çimento esaslı bir matris kullanmıştır. Çimento esaslı matrisin içine gömülmüş kompozit katmanların etkinliği incelemiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında güçlendirilmiş betonarme kirişlere ve kâgir duvarlara eğilme yükleri uygulanmış ve bu yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin önemli derecede arttığı gösterilmiştir. Bir güçlendirme sistemi olarak karbon fiber takviyeli çimento matrisi (CFCM) uygulaması, bir dinamik yükleme sırasında duvarların düzlem dışı hareketini kısmi ya da tamamıyla önlediği görülmüştür. Devam eden yıllarda Prota

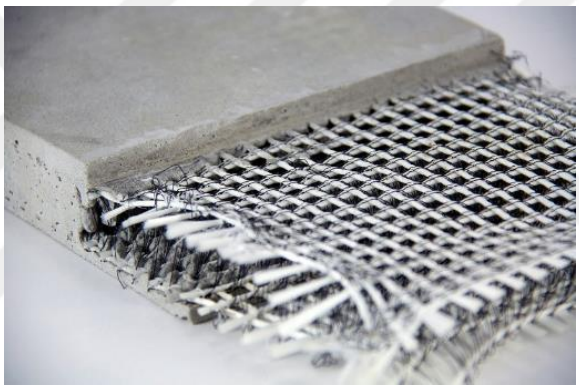
ve diğ. (2006) çimento esaslı kompozitler ile (CMG) çeşitli formlarda güçlendirilmiş tüf tuğlalı yığma duvarlar denemiştir. Çalışmalarında takviye elemanı olarak alkali dayanımlı cam tekstil malzemesi (SRG45) kullanmış ve elde edilen verileri birbiriyle karşılaştırmışlardır. Deneylerinde, 1.03m × 1.03m × 250mm ebatlarında tüf tuğladan yapılmış yığma duvar numuneleri denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin dayanım ve sünekliklerinde artış elde ettikleri görülmüştür. Pujol ve diğ. (2010) 1/1 ölçekli dolgu duvarlı 3 katlı 3 boyutlu bir yapıyı statik yükler etkisinde denemiş ve sonuçları duvarsız betonarme çerçeveli sistem sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Dolgu duvarların, duvarsız betonarme çerçeve yapısının dayanımını %100, başlangıç rijitliğini %500 oranında artırdığı gösterilmiştir. Deneysel olarak incelenen çerçeve sistemler analitik olarak da incelenmiş olup deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Lignola ve diğ. (2009) tüf malzemeden oluşan yığma duvarları CFRC sistemi ile güçlendirmiş ve denemiştir. Üretilen duvar numunelerinin boyutları 25cmx103cmx103cm'dir. Eksenel yükleme yapılarak denenen numunelerde CFRC ile güçlendirilenlerde güçlendirilmemiş numunelere göre %90 oranında göçme yükü artışı sağlanmıştır. Yüksel ve diğ. (2009) karbon lifli polimerler (CFRP) ile çeşitli şekillerde güçlendirilmiş betonarme çerçeve numuneleriyle deneysel olarak çalışmıştır. Toplam 6 adet tek katlı-tek açıklıklı ve 1/3 ölçekli betonarme çerçeveyi yarı statik olarak tekrarlı yükler altında denemişlerdir. Deney sonucunda, CFRP ile güçlendirilen numunelerin dayanım, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesinde güçlendirilmemiş numunelere oranla önemli artışlar elde edilmiştir. Erol (2010), tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri üretmiş ve bu çerçeveleri tersinir tekrarlı yatay yükler etkisinde denemiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara bakılarak yatay yük taşıma kapasitesi, yatay rijitlik ve göçme şekilleri yönünden referans numunelerle karşılaştırılarak değerlendirmiştir. Özkaynak (2010) dolgu duvarları lifli polimerler ile güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin deprem yüklerine benzer yatay yükler etkisindeki davranışı deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Bu amaçla, ülkemizdeki betonarme yapı özelliklerini yansıtacak şekilde ürettiği 1/3 ölçekli tek katlı ve tek açıklıklı duvarsız, dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri statik ve benzeşik dinamik deney teknikleri kullanılarak denemiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerde yaygın olarak kullanılan boşluklu tuğla ile örülmüş dolgu duvarlar karbon lifli polimerler (CFRP) ile uygun biçimde güçlendirildiklerinde; dayanım, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesindeki artışla yapısal elemanlara dönüşebildiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında üretilen betonarme çerçeveler de literatürde sıkça başvurulan bir güçlendirme yöntemi olan dolgu duvar güçlendirmesi konusunda alternatif bir örnek olacağı

düşünülmektedir. Üretilen çerçevelerin dolgu duvarları, tekstil malzemesi cam elyaf (AR-Glass) olan TRCC kompozitlerle güçlendirilmiştir. TRCC kompozitler ve betonarme çerçevelerin üretim aşamaları ayrıntılı bir şekilde detaylandırılmıştır.

2.1. TEKSTİL TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

TRCC (Textile Reinforced Cementitious Composite); ince taneli, yüksek dayanımlı bir çimento esaslı matris içinde yerleştirilen tek veya çok katmanlı, iki boyutlu veya üç boyutlu ve iki yönlü örgülü tekstil ağlarından oluşan bir kompozit malzemedir. Bu tekstiller, cam, karbon, PVA veya bazalt gibi liflerden oluşan ağlardır (Şekil 2.1). Sistem, korozyona dayanıklı yapısı, düşük özgül ağırlığı ve özellikle yüksek şekil değiştirme kapasitesi ile kullanıma uygun bir malzeme olarak öne çıkar.



Şekil 2.1: Tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitler (TRCC).

2.1.1. Yeni Nesil Kompozitlerin Gerekliliği

Yapı sektöründeki ilerlemeler, özellikle betonarme sistemlerin performansının artırılması adına alternatif malzeme ve uygulama arayışlarını beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (TRCC), çimento harcı içine yerleştirilmiş ve yoğun bir şekilde işlenmiş çift yönlü tekstil örgüleri sayesinde hem çekme hem de eğilme dayanımı bakımından çok daha avantajlı mekanik özellikler sunmaktadır. TRCC sistemlerin sunduğu bu potansiyel, özellikle hafiflik, geometrik esneklik ve kolay uygulanabilen ince kesitli plaka türü eleman üretimi gibi modern mimari ve mühendislik taleplerini karşılamak açısından son derece önemlidir.

Ancak günümüzdeki geleneksel üretim teknikleri, çok katmanlı, yüksek tekstil hacmine sahip ve ince kesitli levha şeklinde taşıyıcı ya da yarı-taşıyıcı TRCC elemanların seri üretimine olanak tanıyacak seviyeye ulaşamamıştır. Halihazırda kullanılan yöntemler ya sınırlı geometrik esneklik sunmakta ya da üretim hız ve ekonomisinde ciddi sorunlar bulunmaktadır.

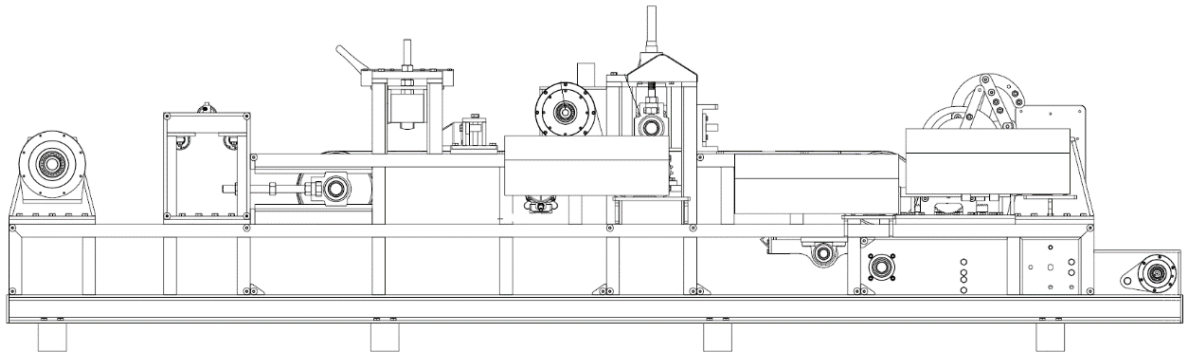
Bu kapsamda, bu çalışmada önerilen Pull-Pour-Roll (PPR) yöntemi; TRCC eleman üretiminde yüksek verim, üretim hızı, şekilsel çeşitlilik (hem katman hem de geometrik bakımdan) ve malzeme optimizasyonunu aynı anda sağlayabilen yeni bir üretim tekniği olarak geliştirilmiştir. Bu bölümde, PPR yöntemiyle elde edilen dikdörtgen kesitli ve ince cidarlı (plaka) TRCC numunelerinin üretim süreci, üretimde kullanılan malzemeler, üretim parametreleri, üretim süreci ve kürleme koşulları açıklanmıştır.

2.1.2. PPR Yönteminin Kavramsal Altyapısı

Mevcut üretim teknikleri — özellikle kalıplama (casting), lamine etme (laminating), pultruzyon (pultrusion), lif Sarımı (filament winding) gibi prosesler — TRCC'lerin iki boyutlu levha ya da basit geometrilere sahip yapı elemanları olarak üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu üretim yöntemlerinden, kompozit malzemenin tekstil ile matris arasındaki aderansının her noktada optimize edilmesi, üretim kalınlığının standartlaştırılması ve sistemin seri üretime uygun hale getirilmesi gibi hedeflerde yeterli verim alınamamaktadır.

Bu gereklilikler doğrultusunda geliştirilen PPR yöntemi;

- **"Pull" (çekme):** tekstil malzemesinin üretim bandında kontrollü ve gerdirilerek ilerletilmesini,
- **"Pour" (dökme):** bağlayıcı çimento esaslı matrisin tekstil üzerine istenen dozajda ve eşit dağılımlı biçimde dökülmesini,
- **"Roll" (sarma ve sıkıştırma):** elde edilen tekstil-harç karışımının kalıplar üzerine çok katmanlı olarak sarılmasını ve ardından sıkıştırılarak nihai forma kavuşturulmasını kapsamaktadır.



Şekil 2.2: PPR üretim tekniği için geliştirilen üretim bandı.

Bu yöntem hem çok katmanlı üretim mantığını hem de farklı geometrik formları barındırmakta olup, kalıplar yardımıyla istenilen şekil ve ölçüde TRCC elemanların elde edilmesine olanak tanımaktadır.

2.1.3. TRCC Plakaların Üretim Süreci

Kompozit plakaların üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kompozit Yapı Elemanları Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda bulunan ve Pull-Pour-Roll (PPR) yöntemi ile kompozit üretimi yapılabilen üretim bandı kullanılmıştır. Ayrıca kompozit üretim sürecinde, laboratuvar ortamında mevcut olan harç karıştırma mikseri, kalıplama ekipmanları, hassas ölçüm terazileri, harç döküm sistemleri ve diğer yardımcı laboratuvar donanımları kullanılmıştır.

2.1.3.1. Matris Harcı Hazırlığı

TRCC plakların üretimi için ilk adımında, kompoziti oluşturan matris bileşimi formüle edilmiştir. Kullanılan çimento esaslı bağlayıcı, yüksek aderans sağlayan ve liflerin çevresine eşit biçimde yayılabilen bir kıvamda hazırlanmıştır. Kuru bileşenler (çimento, silis dumanı, silis kumu vs.) hassas terazilerle tartılmış, homojen bir kuru karışım sağlanana dek düşük devirli karıştırıcıda birkaç dakika karıştırılmıştır. Ardından karışıma, su/bağlayıcı(çimento) oranı 0.35 olacak şekilde içme suyu eklenmiş ve karışım işlemine devam edilmiştir. İstenen kıvama gelen nihai matris harcı, PPR hattının üretim bandındaki malzeme haznesine aktarılmıştır.



Şekil 2.3: Matris harcı için kullanılan mikser.

Üretim bandının çalışma prensibine göre harç ve tekstil malzemesinin birleşmesi için kullanılan düzenek değişiklik gösterebilmektedir. Mevcut üretim bandı için calaskar ile çalışan bir hazne yardımıyla harç dökümü yapılabilmektedir.

2.1.3.2. Tekstil Takviyesinin Yerleşimi

PPR düzeneğinin üretim bandında, alkaliye dayanıklı (AR) cam elyaf tekstil ruloları, ilk sıyırıcı, sıkıştırma merdanesi ve ikinci sıyırıcı olmak üzere üç temel ara ekipmandan geçirilerek taşıyıcı banda düzgün biçimde serilmiştir.

Tekstilin daha rahat konumlanması için tekstil malzemesi bir miktar gerilmiş ve tekstil gerginliği, sistemdeki ayarlanabilir makaralar yardımıyla kontrol edilmiş ve her bir tekstil katmanının sistem boyunca hizalı kalması ve bant üzerinde harç ile örtüşmesi sağlanmıştır (Balcı, 2023).



Şekil 2.4: Tekstil malzemesinin üretim bandına yerleştirilmesi (Balcı, 2023).

2.1.3.3. Matrisin Uygulanma Süreci

Malzeme haznesine alınan plastik kıvamlı matris harcı, üretim bandı üzerindeki tekstilin üzerine boşaltılarak serbest akışla yayılmıştır.



Şekil 2.5: Çimento esaslı harcın ve tekstil malzemesinin birleşmesi.

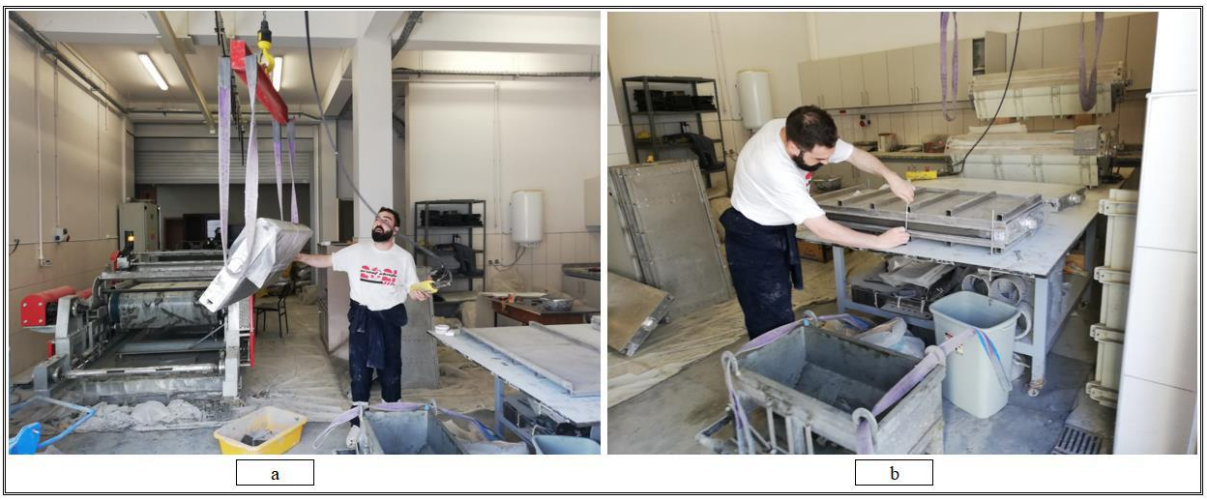
Ardından malzeme sıkıştırma merdanesinden geçirilerek matris iyice sıkıştırılmış ve tekstil ile bağlayıcının daha yoğun bir temas yüzeyi oluşturması sağlanmıştır. İkinci sıyırıcı, sistemden çıkan kompozit şeridin son kalınlık ayarını yaparak üretimi kalıp ünitesine yönlendirmiştir.

2.1.3.4. Sarım ve Kalıplama İşlemi



Şekil 2.6: Çimento esaslı harç ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin iç kalıba sarım yöntemiyle kalıplanması (Gür,2017).

Hazır hale gelen kompozit şerit, önceden hazırlanmış dikdörtgen kesitli kalıplar üzerine kontrollü biçimde sarılmıştır. Sarım işlemi boyunca her katman arası kalınlık farkını minimize edecek şekilde dengeleme işlemi uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında katman sayısı 2 ve 4 olacak biçimde belirlenmiştir (Balcı, 2023).

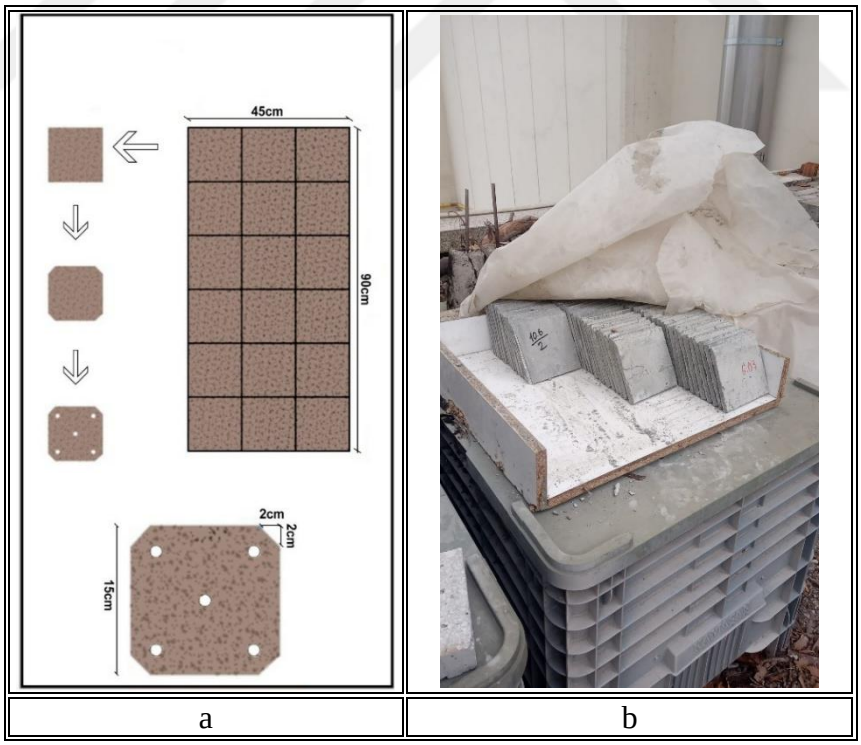


Şekil 2.7: Çimento esaslı harç ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin dış kalıba alınması ve hidrostatik basınca hazır hale getirilmesi (Balcı, 2023).

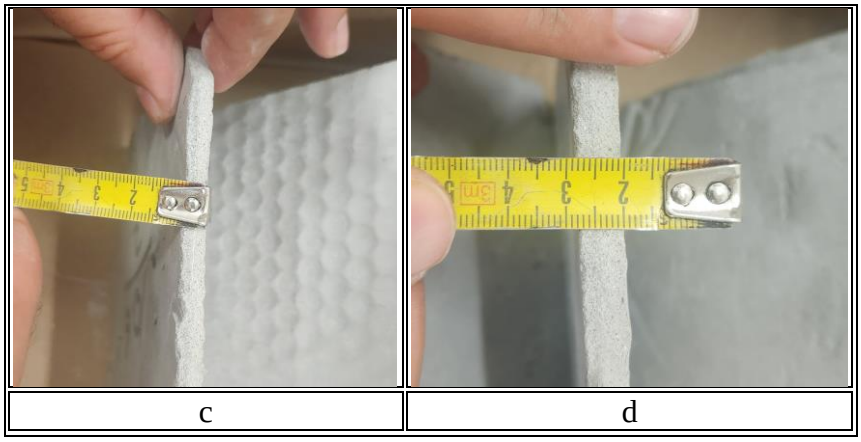
Sarım sonrasında numuneler, 24 saat boyunca üstüne sarıldığı iç kalıplar ve kompozitin üzerini kapatan dış kalıplarla birlikte 7.5 kPa büyüklüğünde bir hidrostatik basınca maruz bırakılmıştır (Gür, 2017 ve Daşkıran, 2018). Bu işlem, hem tekstil-matris ara yüzey aderansını artırmış hem de ince cidarlı elemanlarda dayanım ve deformasyon kapasitesini iyileştirmiştir. Süre sonunda dış kalıplar sökülmüş ardından iç kalıplardan çıkarılan kompozit numuneler hazır hale getirilmiştir.

2.1.3.5. Kürleme ve Son İşlemler

Elde edilen kompozit plaka numuneleri, mekanik özelliklerini kazanmaları amacıyla kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler, 20 °C sıcaklıktaki kirece doygun su içerisinde 72 saat, ardından da üretim yapılan laboratuvarda standart bekleme süresi olan 28 güne kadar bekletilmiştir. Akabinde, numunelerin katman kalınlıkları ölçülerek kayıt edilmiştir. Üretilen kompozitlerin üretiminin tekrarlı üretime uygun olduğu yapılan ölçümler sonucunda anlaşılmıştır. Numunelerin üretim aşamaları aynı olacak şekilde 2 ve 4 katmanlı numunelerin, (bu deneysel çalışma kapsamında kullanılacak sayıda) üretilmesine devam edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Gür, 2017, Daşkıran, 2018 ve Balcı, 2023).



a b



c d

Şekil 2.8: Çimento harcı ve tekstil malzemesinden oluşan kompozitin levha haline getirilmesi a) Plaka kesim ölçüleri, b) Kesilmiş plakalar, c) 2 katmanlı plaka, d) 4 katmanlı plaka (Gür, 2017, Daşkıran, 2018 ve Balcı, 2023).

2.1.4. Üretilen Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Bu çalışma kapsamında 3 adet 2 katmanlı ve 3 adet de 4 katmanlı olmak üzere toplam 6 adet dikdörtgen kesitli kompozit numune üretilmiştir. Kompozit numune boyutları, iç kalıp geometrisine bağlı olup genişliği 100 cm olarak belirlenmiş, kompozitler üretilip prizini aldıktan sonra kalıbın her iki baş kısımlarından alınan 5'er cm'lik parçalar kesilerek net ölçü 90 cm'ye indirgenmiştir. İç kalıp köşeleri, sarım sırasında yığılmaları veya seyrelmeleri önlemek ve sargı etkisini bozmamak amacıyla 3 cm yarıçaplı yuvarlatmalarla tasarlanmıştır (Balcı, 2023). Numunelerden alınan fiziksel ve aletsel ölçümler sonucunda elde edilen ortalama veriler Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Alınan ölçümlerden bu deney kapsamında kullanılan 'PPR' yönteminin numunelerin tekrarlanan manuel üretimlere göre önemli oranda optimum kalınlıklarını sağlayabildiği görülmüştür.

Tablo 2.1: Üretilen TRCC kompozit ürünlerinin genel özellikleri.

Numune	Kesit	Numune Boyutu(mm)	Tabaka	Ort. Plaka Kalınlığı(mm)	Tekstil türü
ARG-4L	Dikdörtgen	450x900	4	8.06	AR-Glass
ARG-2L	Dikdörtgen	450x900	2	3.94	AR-Glass

2.1.5. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

TRCC kompozitlerini oluşturan çimento esaslı matris ile çift yönlü, seyrek gözenekli ve örgülü tekstil ağının (AR-Glass, Şekil 2.9) genel ve teknik özellikleri aşağıda verilmektedir. Çimento esaslı matriste, bağlayıcı olarak çimento ve kumun yanında çeşitli özellikte katkı maddeleri de kullanılmıştır.

2.1.5.1. Çimento Esaslı Matris

Üretimde kullanılan bağlayıcı sistem, portland çimentosu esaslı olup, içerisine katkı olarak mikrosilika (silis dumanı) katılmıştır. Bu kombinasyon, matrisin plastik kıvamını iyileştirerek liflerin çevresine daha iyi dağılmasını ve düşük su/bağlayıcı oranlarında bile yüksek işlenebilirlik sağlanmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca çimento esaslı matrisin yüksek mukavemetli bir harç olması sağlanmıştır.

Tablo 2.2: TRCC Kompozitleri oluşturan matris harcı karışım oranları (Daşkıran, 2018).

Malzeme	**Ağırlıkça Yüzde Birleşim (%)**
Çimento (Bağlayıcı)	38
Silis Dumanı	4
Toplam Bağlayıcı	42
Silis Kumu (Agrega I)	56.8
Akışkanlaştırıcı	0.8
Köpük Kesici Katkı	0.4
TOPLAM	100
Bağlayıcı/Agrega Oranı	1:1.35
Su/Bağlayıcı (Çimento) Oranı	0.35

Matrisin su/bağlayıcı oranı 0.35 olarak sabit tutulmuş, bu oran sayesinde hem yüksek erken dayanım hem de çatlak oluşumunu sınırlayan bir mikro yapı elde edilmiştir. Çekme dayanımı açısından matris harcının zayıf halka olduğu düşünülse de, PPR yöntemiyle yapılan üretimde tekstil liflerinin her yönden homojen olarak sarmalanması bu zayıflığı önemli ölçüde bertaraf etmiştir.

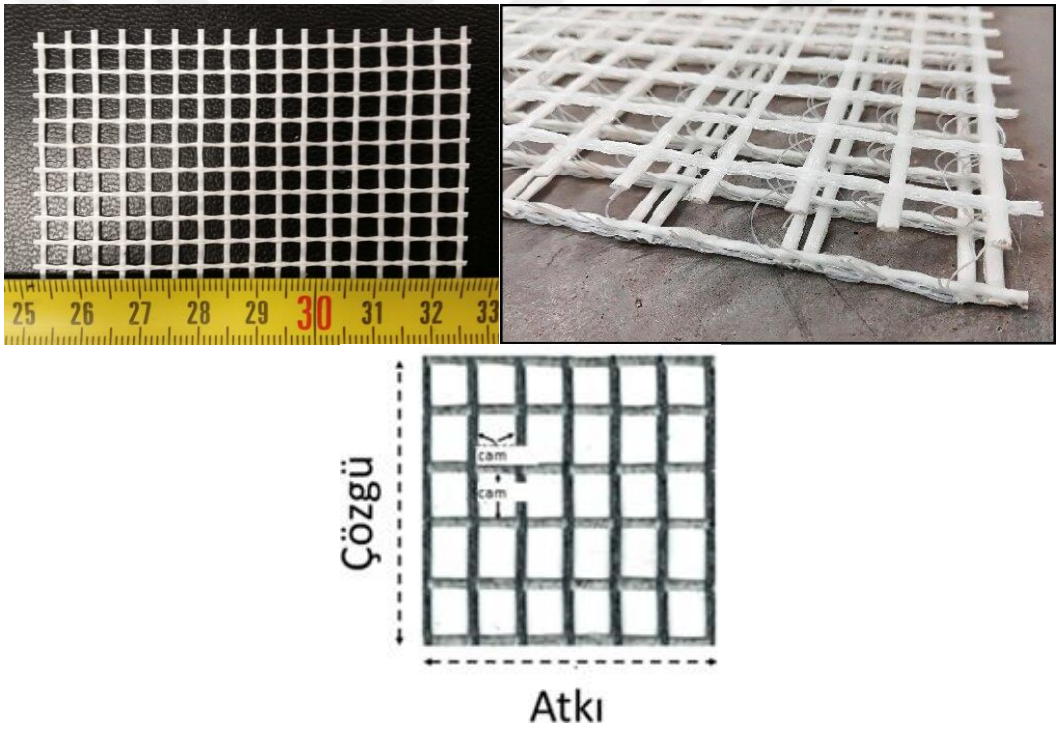
2.1.5.2. Ar-Glass (Alkali Resistant Glass) Tekstil

Takviye edici tekstil malzeme olarak, alkali ortamda çözünmeyen, yüksek çekme mukavemetine sahip Ar-Glass örgü tekstil kullanılmıştır. Tekstil, 163 gr/m² yoğunluğa sahip olup, 5 mm x 5 mm örgü açıklığı ile matrisin yeterli biçimde içine sızmasına olanak sağlamıştır. Liflerin doğrusal yönlenmiş olması, PPR yönteminde sıkıştırma aşaması sonrası her bir lifin matris ile temas alanını maksimum düzeye çıkarmıştır.

Kullanılan tekstil ağı, RILEM TC-232-TDT referans normuna uygun olarak kompozit içinde farklı katmanlarda (2 veya 4 kat) yerleştirilmiştir. Daha sonra bu kompozitler içerisindeki tekstil katmanına göre sınıflandırılmış ve plakalar halinde üretilmiştir. Böylece tekstil takviye oranının üretim parametrelerine ve akabinde sistem performansı üzerindeki etkisi de sistematik olarak izlenebilmiştir.

Tablo 2.3: AR Glass tekstil malzemesinin teknik özellikleri.

Özellik	Çözgü (Warp)	Atkı (Weft)	Genel Değer
Başlangıç Çekme-Kopma Mukavemeti (N/5 cm)	1310	1280	-
Genişlik (mm)	-	-	1000
Kalınlık (mm)	-	-	0,25
Ağırlık (g/m²)	-	-	163
Yoğunluk (g/cm^3)	-	-	≈ 2.60
ZrO_2 içeriği (%)	-	-	14,80
ZrO_2 + TiO_2 içeriği (%)	-	-	19,30
Kopma Uzaması (%)	-	-	2,70
Tekstildeki ağ boyutu (mm)	5	5	-
Elastisite Modülü (MPa) (Daşkıran, 2018)	-	-	58760
Ortalama Çekme Dayanımı (MPa) (Daşkıran, 2018)			1303,1
Dokuma Türü	-	-	Leno



Şekil 2.9: Ar-Glass tekstil malzemesi

2.1.6. Üretim Sürecinde Karşılaşılan Teknik Zorluklar ve Çözüm Yolları

PPR sisteminin geliştirilmesi sürecinde, aşağıdaki teknik sorunlarla karşılaşılmış ve özgün çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan üretim bandına bağlı olarak da karşılaşılan sorunlar aşağıda verilmiştir.

- **Tekstil gerginliğinin sürekliliği:** Üretim boyunca tekstil malzemenin gevşemesi durumunda, liflerin matrisin içerisinde homojen olarak bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Bu problem manuel olarak çözülmüş olup daha spesifik bir üretim bandında çözümü kolaylıkla bulunabilir.

- **Katmanlar arasında boşluk oluşması:** Çok katmanlı sarımlarda kompozit harcının kalıp üzerindeki bazı bölgelerinde mikro boşluklar oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, iç kalıplara sarım sırasında vibrasyon verilerek ve matrisin viskozitesi optimize edilerek giderilebilir.
- **İç kalıp ile temas yüzeyinde aderans eksikliği:** Kompozitin iç yüzeyinde istenilen pürüzsüzlük sağlanamayınca, iç kalıpların yüzeyine suya dayanıklı bir ayırıcı, kalıp yağı veya naylon türü bir yapışmaz ürün kullanılabilir.

PPR sisteminin geliştirilmesi ve seri üretim yapılabilecek duruma getirilmesi için daha ileri teknolojik sistemler kullanılabilir. İstanbul Teknik Üniversitesi Kompozit Yapı Elemanları Laboratuvarında bulunan üretim bandının kullanılmasıyla üretimi yapılan kompozitler seri üretime oldukça uygun ve sürdürülebilir bir sistem kullanılarak daha da geliştirilmeye açık olduğu görülmüştür. Yukarıdaki teknik aksaklıklar, kompozit üretimi için kullanılan makinada (üretim bandı) yapılacak veya ilave edilecek teknik veya fiziksel iyileştirmeler, sistemin üretim kalitesini, tekrarlanabilirliğini, sürdürülebilirliğini, üretim hızını ve numunenin aynı kalınlıkta üretebilme istikrarını önemli oranda artıracaktır.

2.1.7. PPR Yönteminin Literatürdeki Yeri ve Yenilikçi Yönleri

PPR yöntemi (Gençoğlu ve diğ., 2022), mevcut literatürde tek bir işlem hattında; tekstilin yerleşimi, matris ile buluşması, iki malzemenin aderansının arttırılması için sıkıştırılması ve şekil verebilme imkanını bir araya getiren bir sistemdir. Literatürde yer alan tekniklerle karşılaştırıldığında:

- Casting ve laminating (Kornmann ve diğ., 2005, Davidovits, 2008, Sreekumar ve diğ., 2007) gibi yöntemler genellikle manuel ve düşük verimlidir; PPR ise daha komplike bir üretim hattıyla tam mekanize çalışabilir.
- Pultrusion (Sapanci ve diğ., 2017) yönteminde yalnızca tek tür profiller üretilebilirken, PPR ile üç boyutlu formasyonlar mümkündür.
- Filament winding (Kuanjin ve diğ., 2018) gibi ileri üretim teknikleri, çok pahalı ekipman ve sınırlı tekstil türü kullanımı gerektirirken, PPR basit donanım yapısıyla düşük maliyetli ve esnek üretim olanağı sunar.

Bu bağlamda PPR, çok katmanlı, form adaptasyonlu ve otomatik üretim yapılabilen ilk TRCC üretim yöntemi olarak literatüre katkı sağlamaktadır.

2.1.8. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada geliştirilen PPR yöntemi ile, farklı tekstil katmanlar denenerek ince cidarlı ve üç boyutlu TRCC kompozit kalıplar başarıyla üretilmiştir (Gür, 2017, Daşkıran, 2018 ve Balcı, 2023). Üretim süreci boyunca elde edilen teknik bulgular şunları göstermiştir:

- PPR sistemi, tekrarlanabilir ve endüstriyel ölçekte üretime uygun bir süreçtir.
- Üretilen TRCC elemanların homojenliği ve geometrik çeşitliliği yüksektir.
- Sistem, klasik yöntemlere göre daha az iş gücü, daha kısa üretim süresi ve düşük maliyetle sonuç vermektedir.
- Tekstil-matris bütünlüğü ve aderansı, uygulanan hidrostatik basınç ve vibrasyon sayesinde oldukça yüksektir.

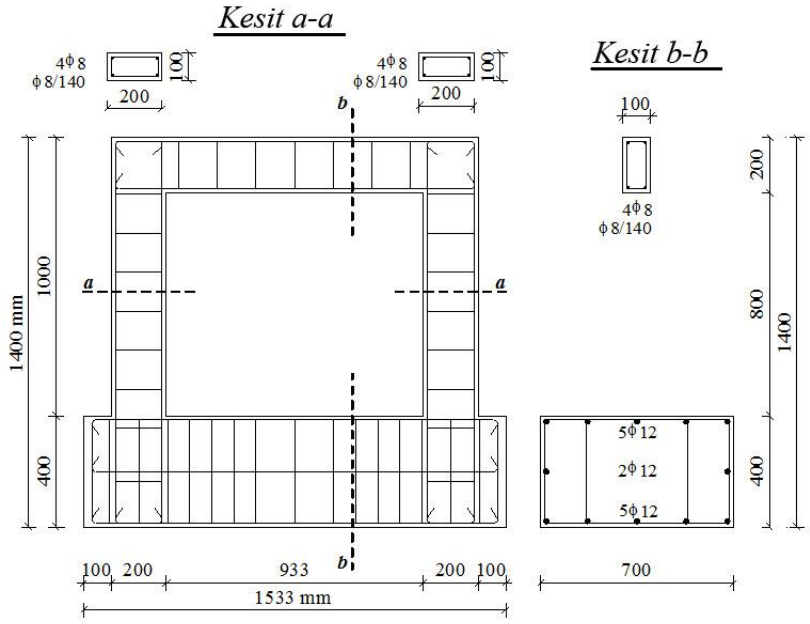
Bu yönleriyle, PPR yöntemi özellikle portatif kalıp elemanları, yük taşıyan ince cidarlı kabuklar, prefabrik modüler yapı bileşenleri gibi alanlarda kullanılmak üzere yeni nesil TRCC elemanların üretiminde devrim yaratabilecek potansiyele sahiptir.

2.2. BETONARME ÇERÇEVELERİN ÜRETİMİ

Bu çalışma kapsamında, 4 adet 1/3 oranında küçültülmüş ve idealize edilmiş, tek katlı ve tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi üretilmiştir (Özkan, 2012). Numuneler, özel bir konut şantiyesinde üretilerek deneyin yapılacağı alana nakledilmiştir.

2.2.1. Betonarme Çerçevelerin Özellikleri

Tüm numunelere ait geometrik özellikler, donatı detayları ve boyutlar Şekil 2.10'da sunulmaktadır. Deney çerçeveleri, yüksekliği 1000 mm ve açıklığı 933 mm olan betonarme çerçeveden ve bu çerçeveyi taşıyan, yüksekliği 400 mm, genişliği 700 mm ve uzunluğu 1533 mm olan rijit temelden oluşmaktadır (Özkaynak, 2010).



Şekil 2.10: 1/3 Ölçekli betonarme çerçeve numunesinin boyutları ve donatı detayı.

Taşıyıcı sistem bileşenlerinin kesit boyutları şu şekildedir:

- **Kolon kesiti:** 100 × 200 mm
- **Kiriş kesiti:** 100 × 200 mm
- **Temel kesiti:** 400 × 700 mm

Boyuna donatı detayları:

- **Kolon ve kirişlerde:** 4 adet Ø8
- **Temelde:** 12 adet Ø12

Enine donatı detayları:

- **Kolon ve kirişlerde:** Ø8 / 140 mm
- **Temelde:** Ø10/200 mm

Tüm taşıyıcı elemanlarda 15 mm'lik pas payı bırakılmıştır. Betonarme çerçeveler, gerçek bir şantiye ortamında ve şantiye koşulları kullanılarak hazırlanmıştır. Aynı şantiye ortamında betonu dökülmüş ve beton kürünü tamamladıktan sonra laboratuvar (İTÜ) ortamına taşınarak deneylere hazır hâle getirilmiştir.

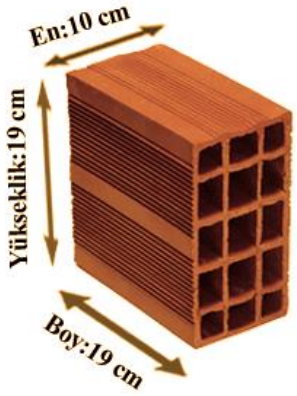


Şekil 2.11: Üretilen betonarme çerçeve numuneleri.

1/3 ölçekli modelleme, özellikle tekrarlı yükler altında yapı elemanlarının davranışını gözlemlemek için tercih edilen yaygın bir fiziksel modelleme yöntemidir. Bu çalışmada da gerçek boyutlu sistem davranışına ışık tutacak şekilde, benzer rijitlik, çerçeve davranışı ve kesitlerdeki donatı oranlarının korunmasına gibi özelliklere dikkat edilmiştir. Piyasada yaygın olarak dikkat edilen ve güncel yönetmelik ve şartnamelerde belirtilen kesitlerdeki minimum %1'lik donatı oranları bu betonarme numunelerde de dikkate alınmıştır. Donatının ve yerleştirme düzeninin ölçekli ve kurallarına uygun şekilde imal edilmesi sayesinde, deneysel veriler gerçek bir yapının yapısal performansının yorumlanması noktasında gerçeğe yakın sonuçlar verecektir. Numunelerin şantiye ortamında üretilmiş olması, gerçek üretim koşullarının deney örneklerine yansıtılmasına olanak sağlamıştır.

Bu çalışmada kullanılan çerçeve numuneleri, ülkemizdeki mevcut yapı stokunda yaygın olarak karşılaşılan standart beton dayanımına ve güçlü kiriş-zayıf kolon davranışına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm çerçeveler, üretimlerinin ardından Şekil 2.11'de görüldüğü üzere çıplak durumda bulunmaktadır. Bu numunelerden biri, çıplak/duvarsız olarak bırakılmış; diğer 3 çerçeveye ise ilave olarak dolgu duvar yerleştirilmiştir.

Yalın halde bulunan çerçevelerin içine ilave edilen dolgu duvarların yapımında, Şekil 2.12'de görülen özel fabrika tuğlaları ve ülkemizde sıkça duvar yapımında kullanılan standart çimento harcı kullanılmıştır



Şekil 2.12: BA çerçevelere ilave edilen dolgu duvarlarda kullanılan tuğla numunesi.

Dolgu duvar ilave edilen numunelerden biri, yalnızca dolgu duvarlı ve sıvalı olarak bırakılmış, herhangi bir güçlendirme uygulanmamıştır. Diğer 2 numune ise farklı yöntemlerle TRCC (Çimento Esaslı Tekstil Takviyeli Kompozitler) güçlendirme sistemi kullanılarak güçlendirilmiştir. Çıplak çerçeve ve sadece dolgu duvarlı bırakılan çerçeve, TRCC ile güçlendirilmiş numunelerin performanslarının karşılaştırılabilmesi amacıyla referans (şahit) numuneler olarak değerlendirilmiştir. Çerçevelerde yer alan dolgu duvarlar, standart delikli tuğla kullanılarak örülmüş ve her iki yüzeylerine 10 mm kalınlığında çimento esaslı sıva uygulanmıştır.

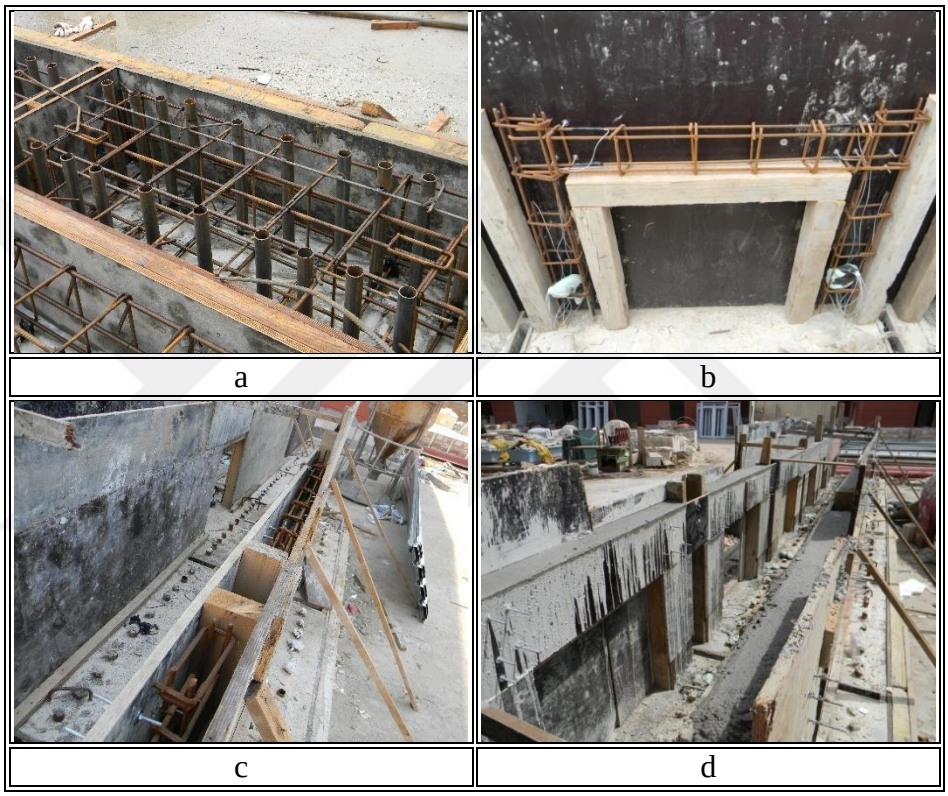
2.2.2. Betonarme Çerçevelerin Üretimi

Çerçeve numuneleri için deneysel çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir ancak numuneler laboratuvar dışında üretilmiş ve üretim işlemlerinin tamamlanmasının ardından laboratuvar ortamına nakledilmiştir. Numuneler, ülkemizdeki mevcut yapı stokunun betonarme özellikleri dikkate alınarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretim sürecinde, gerçek şantiye koşullarında kullanılan inşaat malzemeleri ve işçilik tercih edilmiştir. Tüm numuneler, Şekil 2.10'da sunulan betonarme detayına uyularak imal edilmiştir. Numune üretimi süreci aşağıda özetlenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında temel kalıbı hazırlanmış ve betonun zeminle doğrudan temasını engellemek amacıyla kalıp altına polietilen örtü (naylon) serilmiştir. Donatıların beton örtüsü içerisinde doğru konumlanmasını sağlamak üzere kalıp içerisine 15 mm kalınlığında pas payı elemanları yerleştirilmiştir. Temel donatı kafesi, Ø12 mm çapında boyuna ve Ø10 mm

çapında enine donatılardan oluşturulmuş ve bu donatılar pas payı koşullarına uygun şekilde kalıp içerisine konumlandırılmıştır.

Numune temellerinin her birinde, deney düzeneği ile rijit bir bağlantı sağlanabilmesi amacıyla 20 mm çapında bulonlar için delikler bırakılmıştır. Ayrıca, kolon uygulamalarına olanak tanımak üzere temel donatısına Ø8 mm çapında kolon filizleri bırakılmıştır. Yüksek rijitlikte ve dayanıklı bir temel elde edilebilmesi için, yüksek basınç dayanımına sahip beton tercih edilerek döküm işlemi tamamlanmıştır.

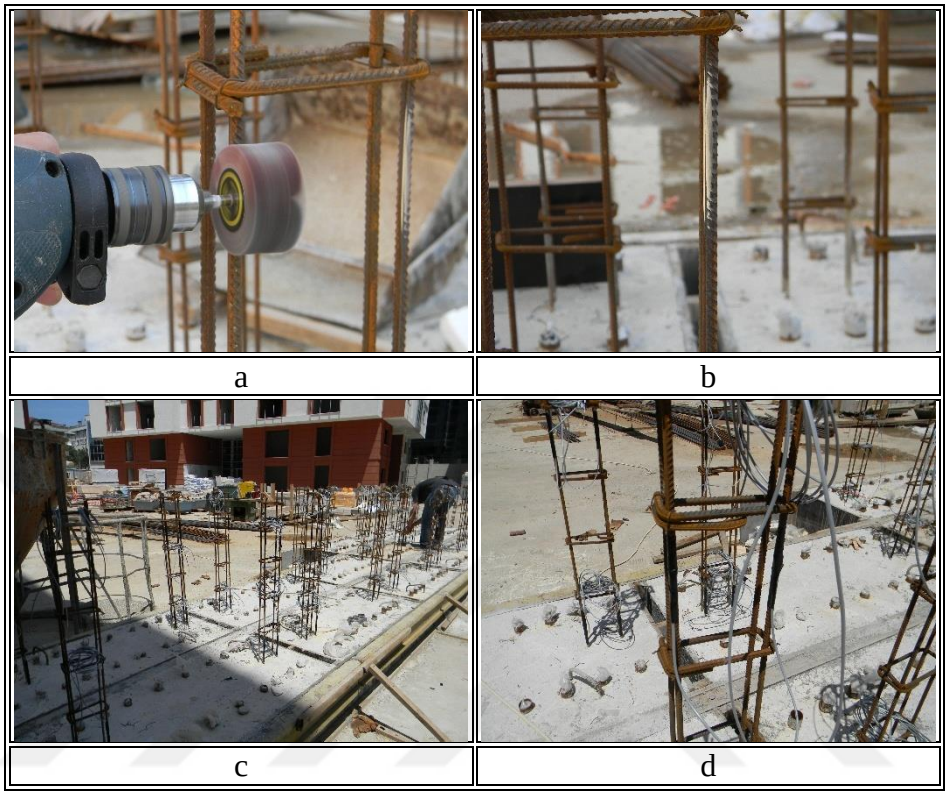


Şekil 2.13: BA çerçeveler a) kolon-kiriş donatıları, b) strain-gauge detayı ve c) çerçeve kalıpları, d) betonu dökülmüş çerçeve numuneleri.

Temel üzerindeki kolon filizlerine, kolon boyuna donatıları yerleştirilmiş ve bu donatılar, Ø8 mm çapında etriyelerle çevrelenerek kolon donatı kafesi oluşturulmuştur. Kolon donatısının tamamlanmasının ardından, kiriş elemanına ait boyuna ve enine donatılar ayrı olarak hazırlanmış ve bu donatılar, mevcut kolon donatısına uygun şekilde bağlanarak yapısal sistemin donatı bütünlüğü sağlanmıştır.

Deney sırasında donatıların şekil değiştirmelerini izleyebilmek amacıyla, numunelerin ön yüzeyindeki kolon ve kiriş boyuna donatılarına şekildeğiştirme ölçerler (strain gauge) yapıştırılmıştır (Şekil 2.14). Bu işlem öncesinde, strain gauge'lerin doğru şekilde yapışabilmesi için donatılar zımpara ile temizlenmiş, ardından özel yapıştırıcı ile strain gauge'ler sabitlenmiş

ve su geçirmez özel bant ile izolasyon sağlanmıştır. Uygulanan strain gauge'lerin 2 tanesi kirişin sol mesnet bölgesine, 2 tanesi sağ mesnet bölgesine, kalan 8 adet strain gauge ise kolonların alt ve üst uçlarındaki boyuna donatılara yerleştirilmiştir.

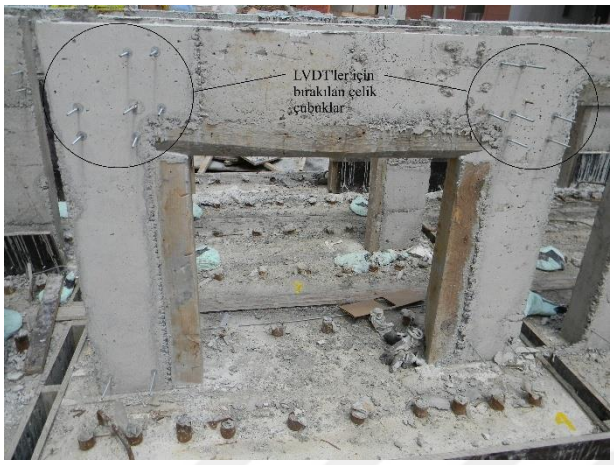


Şekil 2.14: Çerçeve donatılarına strain gauge yapıştırılması a) donatıların zımpara ile temizlenmesi, b) donatıda temiz yüzey, c) strain gauge yapıştırılmış kolon donatıları ve d) strain gauge detayı.

Strain gauge'lerin yapıştırılmasının ardından kolon ve kiriş kalıpları oluşturulmuştur. Deney sırasında numunelerin davranışlarını daha ayrıntılı izlemek amacıyla, yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) de kullanılmıştır. Bu cihazların yerleştirilmesi için numunenin dış yüzeyine özel mesnet sistemleri hazırlanmıştır. Kalıp içerisine, ileride LVDT cihazlarının sabitlenmesini sağlamak amacıyla, deney esnasında strain gauge'lerin konumlarına karşılık gelecek şekilde, beton içerisinde kısmen gömülü olacak biçimde ince dişli çubuklar yerleştirilmiştir (Şekil 2.15). Bu çubuklar, LVDT'lerin deney boyunca çerçeve üzerindeki yer değiştirme ve dönmeleri doğru biçimde ölçmesini sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır.

Tüm numunelere ait kolon ve kiriş kalıpları ile birlikte, deney esnasında veri alınmasını sağlayacak mekanizmalar (Şekildeğiştirme/Straingauge ve Yerdeğiştirme/LVDT ölçüm sistemleri) hazırlandıktan sonra beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan beton, özel bir firmadan temin edilmiş hazır beton olup, malzeme değerleri "Malzeme Özellikleri ve

Malzeme Deneyleri" bölümünde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Numunelerin üretim aşamaları Şekil 2.12'te gösterilmektedir.



Şekil 2.15: Çerçevede bırakılan çelik çubuklar.

Beton dökümünün ardından, numuneler yaklaşık 28 gün kür işlemine tabi tutulmuş ve bu sürenin sonunda vinç ve kamyon yardımıyla üretildikleri şantiye ortamından İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'na taşınmıştır.



Şekil 2.16: Betonarme çerçeve numunelere dolgu duvar örülmesi.

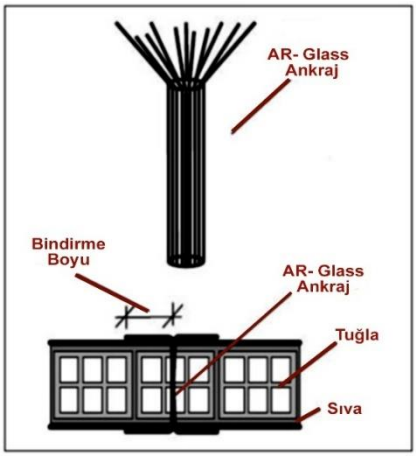
Laboratuvar ortamında, üretilen dört numuneden üçüne dolgu duvar uygulaması yapılmıştır. Duvar örme işleminde dikkat edilen başlıca hususlar şunlardır: Öncelikle, kullanılacak tuğlalar yeterli aderans sağlanması amacıyla suya batırılarak nemlendirilmiştir.

Duvarlar, tuğla delikleri yatay konumda olacak şekilde örülmüş ve üst katlarda yatay derzler şaşırtmalı düzende yerleştirilmiştir (Şekil 2.16). Hem yatay hem de düşey derzlerde 10 mm kalınlığında çimento esaslı harç kullanılmıştır. Duvar örme işlemi tamamlandıktan sonra, dolgu duvarlı bir numuneye her iki yüzeyine aynı harç malzemesi ile 10 mm kalınlığında sıva uygulanmıştır (Şekil 2.16d), dolgu duvarlı diğer iki numune ise güçlendirme işlemleri için tuğla duvarlı olarak bırakılmıştır (Şekil 2.16c).

2.2.3. Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi

Hazır durumda bulunan dört adet betonarme çerçeve numunesinden, dolgu duvarları örülmüş hâlde (Şekil 2.16c) olan 2 numune, TRCC (Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit) sistemi ile güçlendirilmiştir. Bu iki numuneye, farklı katmanlarda tekstil içeren kompozit plakalar ile ankrajlı olarak güçlendirme uygulanmıştır. Ankraj uygulamasının amacı, deney süresince TRCC plakaların yüzeyden ayrılmasını önleyerek sistemin bütünlüğünü korumaktır. Güçlendirme işlemlerinin tüm aşamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Güçlendirme işlemine başlamadan önce, ankrajlı olarak TRCC ile güçlendirilecek her iki numunede de duvar yüzeyine uygulanacak tüm kompozit plakaların aralarına denk gelecek şekilde ankraj noktası belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalardan, delici matkap yardımıyla her biri 20 mm çapında olmak üzere ankraj delikleri açılmıştır.

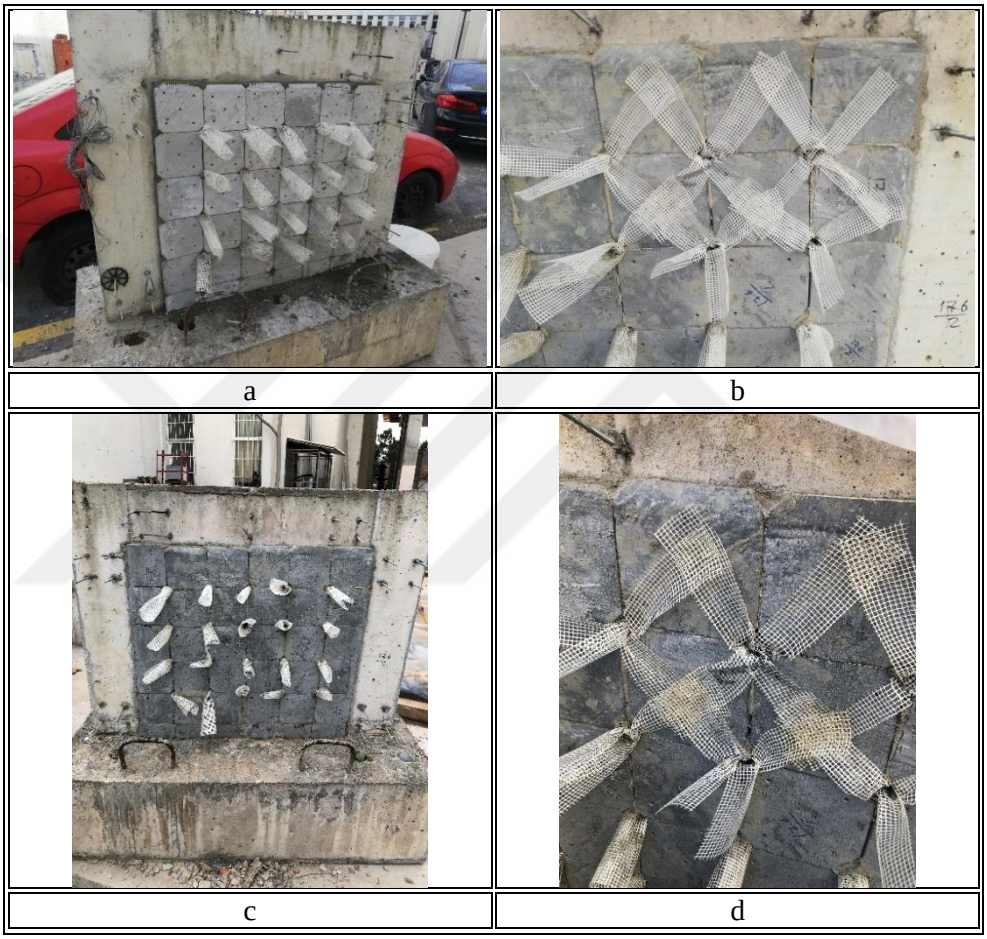


Şekil 2.17: TBDY'ye göre uygulanmış AR-Glass ankrajlar.

Ankraj delikleri hazırlanmış olan numunelerde, güçlendirme işleminde kullanılacak alkali dayanımlı cam elyaf takviyeli tekstil (AR-Glass) malzemesinden, her biri 40×20 mm boyutlarında olacak şekilde parçalar kesilerek ankraj elemanları oluşturulmuştur. Hazırlanan bu tekstil parçaları, güçlendirme işleminde kullanılan çimento esaslı hamur ile doyurulmuş ve

ardından ankraj deliklerine yerleştirilmiştir (Şekil 2.17). Ankraj uygulamaları, 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2019) esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.18).

Ankraj elemanlarının dışarıda kalan uçları, kompozit plakaların üzerine "papatya" şeklinde (Şekil 2.17d) açılarak yayılmış ve böylece sistemin deney sırasında hem duvarla bir bütün olarak hem de betonarme elemanla birlikte çalışması amaçlanmıştır.



Şekil 2.18: Ankrajlı olarak güçlendirilen çerçevelerde ankraj detayları

Ankraj deliklerinde kalan boşluklar, kompozit plakaların duvara etkin şekilde yapışmasını sağlayacak yüksek dayanımlı özel çimento esaslı harçla doldurulmuştur. Ankraj uygulamasının akabinde duvar yüzeyine kompozit plakların yapıştırılması işlemine geçilmiştir. Uygulama öncesinde, aderansın artırılması amacıyla duvar yüzeyi ıslatılmış ve ardından yaklaşık 5 mm kalınlığında bu özel harç ile sıvanmıştır. Son aşamada, hazırlanan TRCC kompozit plakalar yüzeye dikkatli biçimde yerleştirilerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Ankraj uygulaması ve çimento harcı sıvası tamamlanan çerçeve numunelerinin yüzeyleri, TRCC plakaların yüzeye daha iyi yapışmasını sağlamak amacıyla tekrar

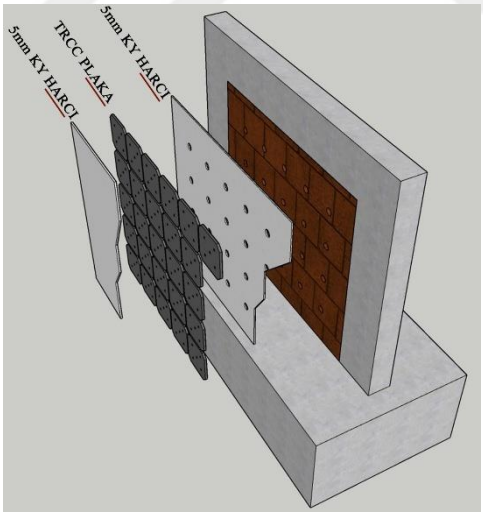
nemlendirilmiştir. Güçlendirme işleminde kullanılacak kompozit plakalar, her iki numunenin ön ve arka yüzüne yüksek dayanımlı harçla iyice kenetlenmesi için bastırılarak yapıştırılmış, alttaki harcın kompozitlerin derz aralıklarından akması ve kompozite yapışması sağlanmıştır.



a b

Şekil 2.19: Dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin TRCC ile ankrajlı olarak güçlendirilmesi.

Belli bir süre kompozitin harca yapışması için beklenmiş ve akabinde plakaların üzerine ankraj için hazırlanan tekstil malzemesi açılarak üst sıvaya hazır hale getirilmiştir.

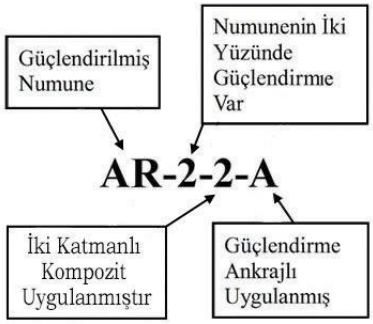


Şekil 2.20: Dolgu duvarlı çerçevelerin güçlendirme tabakaları.

Bu uygulamaları takiben, kompozit plakaların ve plakaların üzerine açılan ankrajların üzeri aynı çimento harcı kullanılarak ikinci bir ince tabaka (5 mm) ile kaplanmıştır. Her iki yüzeyi güçlendirilen numunelerde bu işlemler, numunenin diğer yüzeyi için de aynı şekilde tekrarlanmıştır. Numuneler, deneysel çalışma sırasında meydana gelen çatlakların daha net bir şekilde tanımlanması için beyaz bir boya ile boyanarak deneylere hazır hale getirilmiştir.

2.2.4. Numunelerin Genel Özellikleri

Betonarme çerçeveler, tersinir tekrarlı yatay yükler ve sabit eksenel yükler altında üç farklı kategoride test edilmiştir. Birinci kategoride, çerçeve açıklığında dolgu duvar bulunmayan ve statik çözümlemelere benzer şekilde tasarlanan çıplak (yalın) çerçeve numunesi yer almaktadır. İkinci kategoride ise çerçeve açıklığında her iki yüzü sıvalı dolgu duvar bulunan numune bulunmaktadır. Bu iki numune, deneysel çalışmalarda referans (şahit) numuneleri olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.21: Güçlendirilen BA çerçeve numunelerin kod açılımı.

Üçüncü kategori ise, çerçeve açıklığında yer alan dolgu duvarların, tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit (TRCC) sistemi ile iki farklı yöntemle güçlendirildiği numuneleri kapsamaktadır. Güçlendirilmiş numunelere uygulanan farklı TRCC sistemleri ve detayları, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Deneysel çalışmada kullanılan dört adet betonarme çerçeve numunesi, sahip oldukları yapısal özelliklere göre sınıflandırılmış ve deney sürecinde veri takibi ile karşılaştırmalı değerlendirmelerin sağlıklı yürütülebilmesi amacıyla özgün kodlarla tanımlanmıştır. Bu kapsamda, yalnızca taşıyıcı sistem elemanlarından oluşan, dolgu duvar içermeyen referans numune "Çıplak Çerçeve" olarak adlandırılmıştır. Buna karşılık, yalnızca dolgu duvar içeren ve herhangi bir güçlendirme yöntemi uygulanmamış olan numune ise "Dolgu Duvarlı Çerçeve" olarak tanımlanmıştır.

Güçlendirilmiş numuneler "AR" kodu ile gösterilmektedir. AR kodundaki ilk rakam, duvarın bir veya iki yüzünün güçlendirildiğini; ikinci rakam, tekstilin kompozit içindeki katman sayısının iki veya dört olduğunu; 'A' harfi ise numunenin ankrajlı olduğunu belirtmektedir. Toplamda 2 adet güçlendirilmiş betonarme çerçeve numunesi, ankrajlı şekilde TRCC plakalar ile güçlendirilmiştir (Şekil 2.21).

Tablo 2.4: Üretilen BA çerçeve numuneleri ve özellikleri.

Betonarme Çerçeve Numuneleri				
Numune Adı	**Numune Tipi**	**TRCC Uygulama Şekli**	**TRCC Tekstil Malzemesi**	**Güçlendirme Harcı**
Çıplak Çerçeve	İçi Boş (Duvarsız) Betonarme Çerçeve	–	–	–
Dolgu Duvarlı Çerçeve	Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve	–	–	Sıva Harcı
AR-2-2-A	Güçlendirilmiş Betonarme Çerçeve	2 Taraftan 2 Katlı Ankrajlı	AR-Glass	Çimento Hamuru
AR-2-4-A	Güçlendirilmiş Betonarme Çerçeve	2 Taraftan 4 Katlı Ankrajlı	AR-Glass	Çimento Hamuru

Yukarıda açıklanan bilgilere dayanarak, numune özellikleri, adları, TRCC ile güçlendirme yöntemleri ile sıva ve güçlendirme harcı içerikleri Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

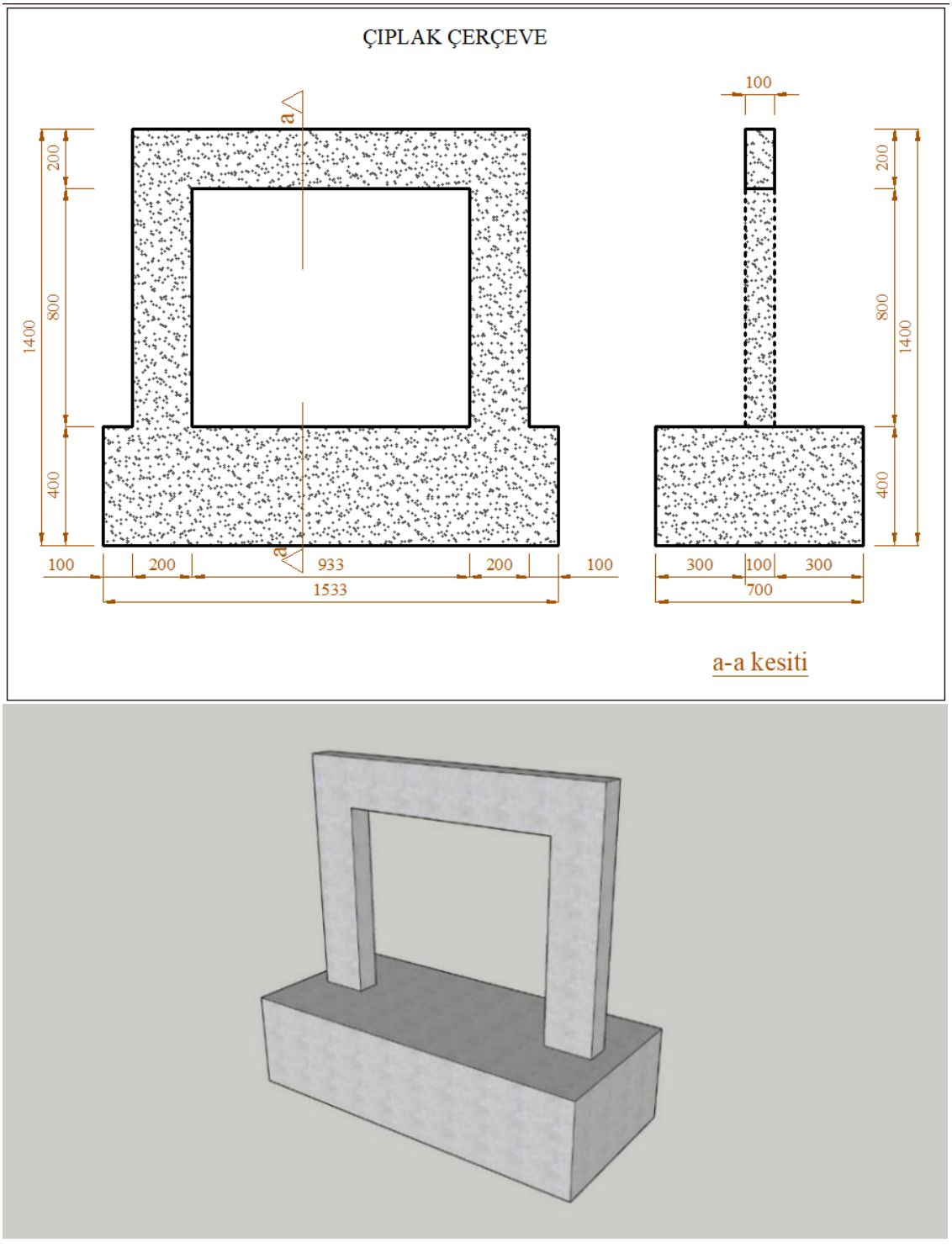
2.2.4.1. Güçlendirilmemiş Numuneler

Bu grupta iki adet numune yer almaktadır: İlki, Şekil 2.22'de gösterilen, çıplak olarak bırakılmış betonarme çerçevedir. İkincisi ise, Şekil 2.23'te görülen, içerisine duvar örülmüş ve 10 mm kalınlığında çimento harcıyla sıvanmış halde bırakılmış betonarme çerçevedir. Bu numuneler, güçlendirme uygulanmamış halleriyle, deneysel çalışmada referans olarak kullanılmış; güçlendirilmiş numunelerin performanslarının değerlendirilmesinde karşılaştırma temeli oluşturmuşlardır. Referans değerlendirmeleri; ulaşılan maksimum yatay yük, tüketilen enerji gibi parametreler üzerinden yapılmıştır.

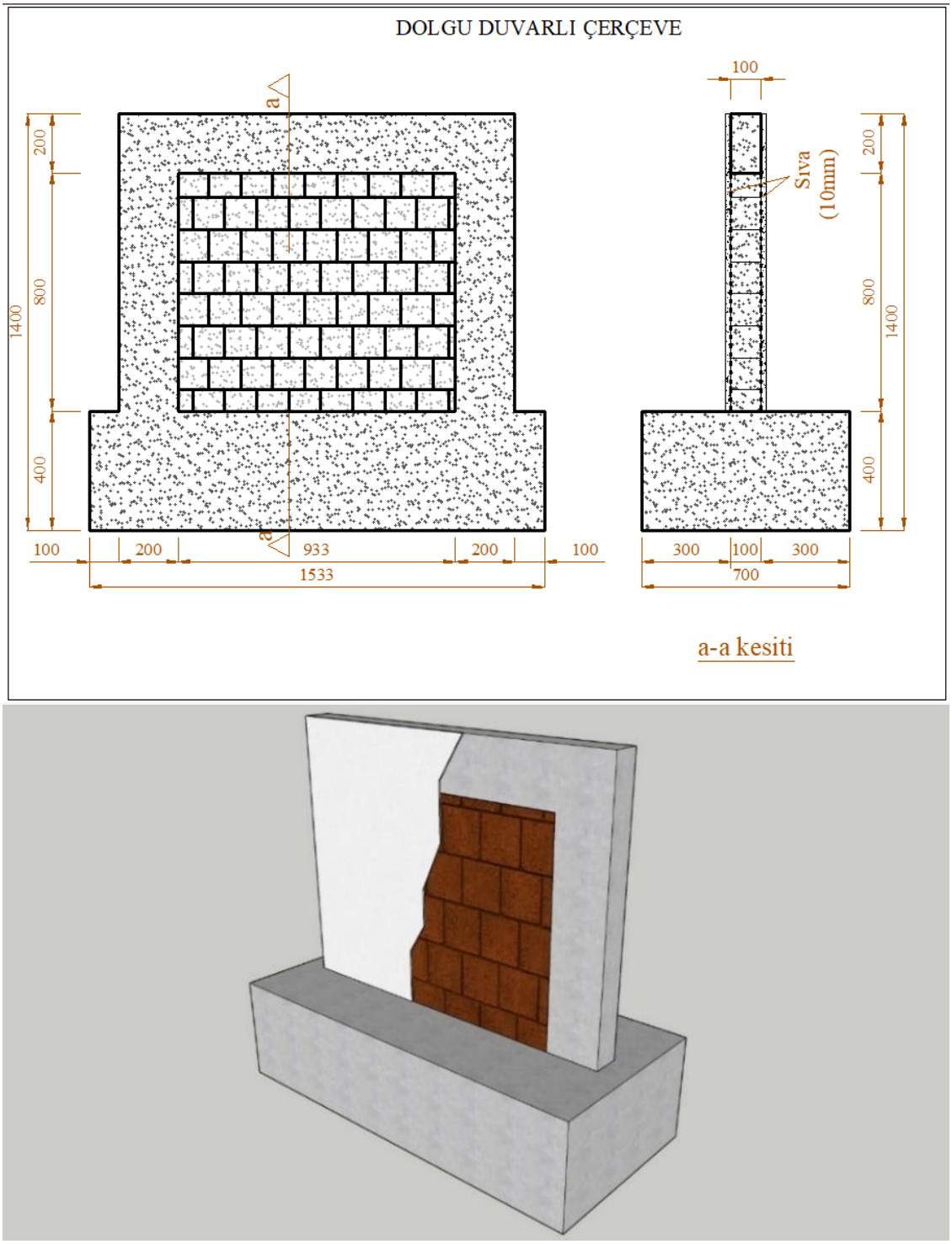
2.2.4.2. Güçlendirilmiş Numuneler

Bu çalışma kapsamında üretilen dört adet tek katlı ve tek açıklıklı betonarme çerçevenin ikisi, çeşitli yöntemlerle TRCC kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş numuneler, uygulanan güçlendirme detaylarına göre kodlanmıştır. Kod sisteminin açıklaması Şekil 2.21'de verilmekte olup, tüm numunelere ilişkin özellikler Tablo 2.4'te sunulmaktadır. Buna göre, Tablo 2.4'te yer alan güçlendirilmiş betonarme çerçeve numunelerinin adlandırılması ve TRCC ile yapılan güçlendirme uygulamaları dikkate alınarak yapılan numune kodlaması şu şekilde özetlenebilir:

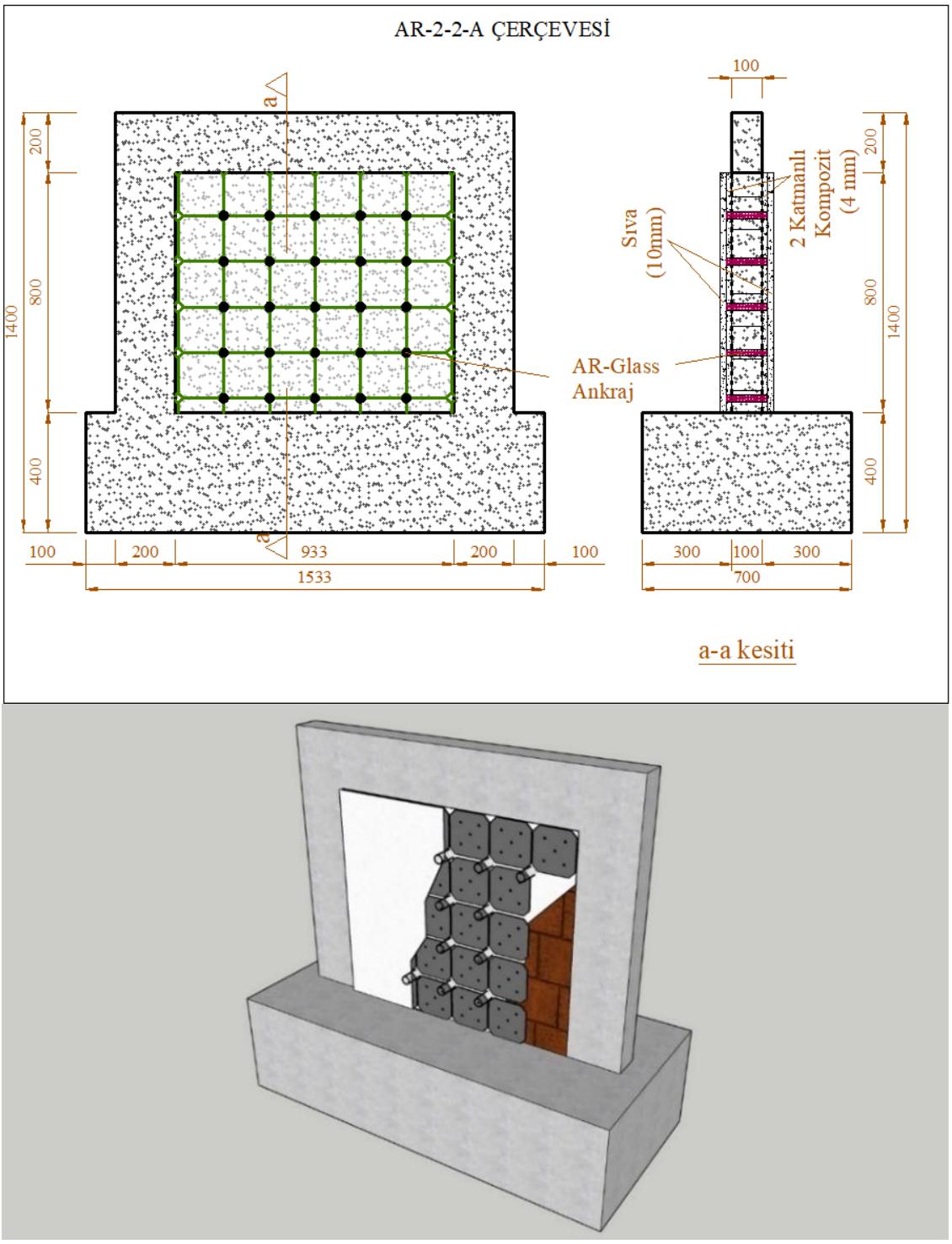
- AR-2-2-A: Numunenin her iki yüzü bir kat TRCC ile güçlendirilmiş ve güçlendirme ankrajlı olarak yapılmıştır (Şekil 2.23).
- AR-2-4-A: Numunenin her iki yüzü iki kat TRCC ile güçlendirilmiş ve güçlendirme ankrajlı olarak yapılmıştır (Şekil 2.24).



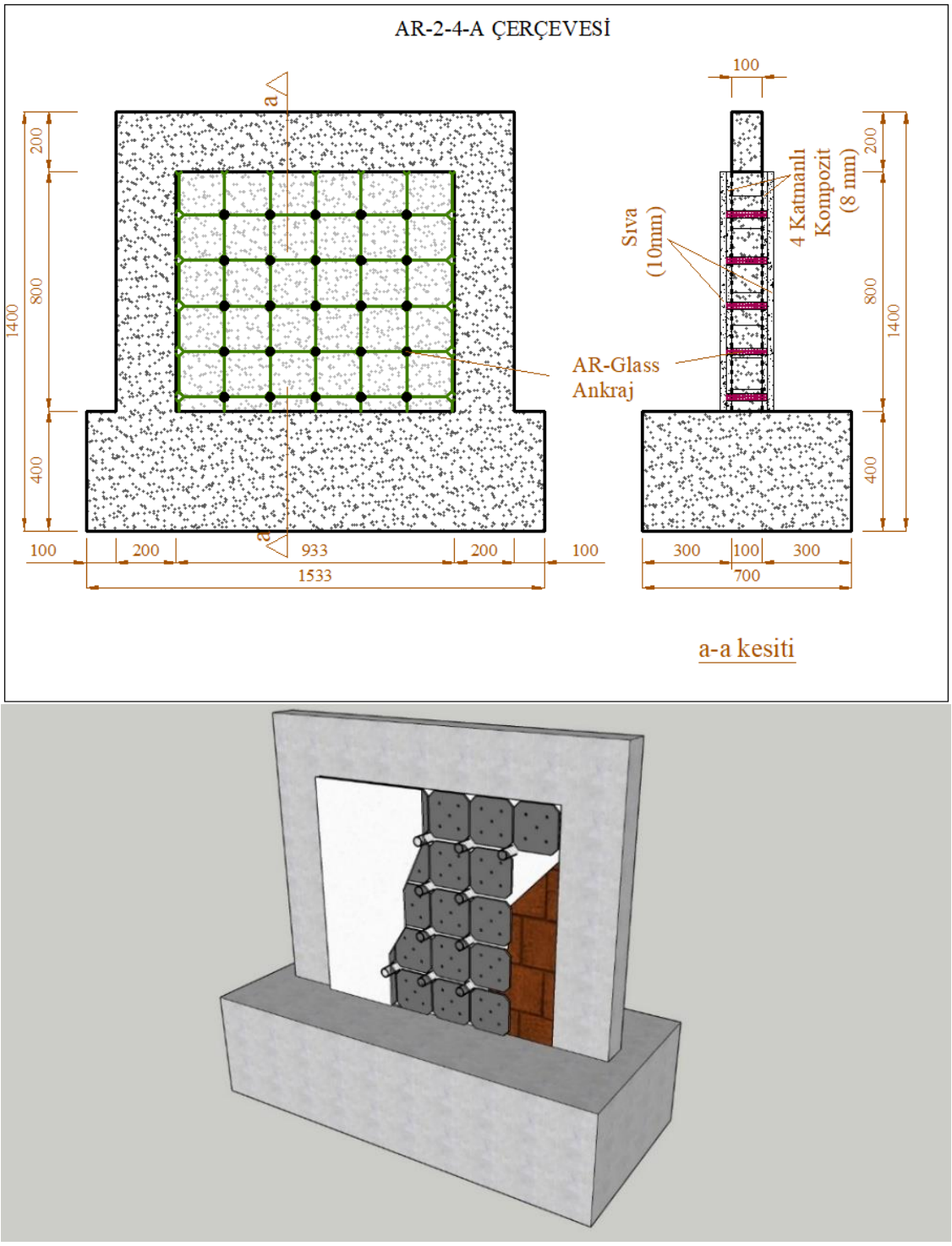
Şekil 2.22: Çıplak/Yalın olarak bırakılmış referans (şahit) numunesi.



Şekil 2.23: Dolgu duvarlı referans (şahit) numunesi.



Şekil 2.24: İki taraftan 2 katmanlı TRCC plakalar ile ankrajlı olarak güçlendirilmiş AR-2-2-A kodlu BA çerçeve.



Şekil 2.25: İki taraftan 4 katmanlı TRCC plakalar ile ankrajlı olarak güçlendirilmiş AR-2-4-A kodlu BA çerçeve.

2.3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ

Bu çalışmada, mevcut yapıların güçlendirilmesine yönelik alternatif bir yöntem olarak önerilen ve özellikle bölme duvarlara uygulanabilirliği incelenen tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit (TRCC) sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Bu bağlamda, deneysel çalışmalarda kullanılan tüm yapı bileşenlerinin mekanik özellikleri belirlenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.26: Standart basınç deneylerinde kullanılan press makinesi.



Şekil 2.27: Standart donatı çekme deneylerinde kullanılan düzenek.

Yapılan deneysel çalışmalar, çerçeve sistemde yer alan beton ve donatı malzemelerinin yanı sıra dolgu duvarları oluşturan çimento esaslı harçlar ve tuğlalar ile güçlendirme elemanı

olarak kullanılan TRCC harçlarının karakteristik davranışlarını ortaya koymak üzere planlanmıştır. Bu kapsamda, farklı deney türleri ile elde edilen veriler hem karşılaştırmalı analizlere olanak sağlamış hem de modelleme ve yorumlama süreçlerinde temel veri seti oluşturmuştur. Özellikle TRCC plakalarını oluşturan malzeme değerleri aynı konuyu çalışmış ve aynı laboratuvar ortamını kullanmış önceki çalışmalardan (Gür, 2017, Daşkıran, 2018 ve Balcı, 2023) alınmıştır.



Şekil 2.28: Beton gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için kullanılan düzenek.

2.3.1. Duvar Harcı Deneyleri

Betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvarlarla donatılması aşamasında, yerli uygulamalarda sıklıkla tercih edilen geleneksel çimento esaslı harç kullanılmıştır. Bu harç; çimento, su ve elenmiş ince agrega (kum) karışımından oluşmakta olup, işlenebilirliği ve uygulama kolaylığı ile bilinen standart bir malzemedir.



Şekil 2.29: Dolgu duvarların üretiminde kullanılan çimento harcının standart basınç deneyleri.

Harcın mekanik dayanımını belirlemek amacıyla, üretim esnasında çok sayıda standart silindir numune hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde 28 günlük kür süresinin ardından basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Deneyler TS EN 196-1 standardına uygun şekilde, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, kullanılan deney düzeneği Şekil 2.26, Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, sıva harcının ortalama basınç dayanımı 6.54 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 2.5). Bu değer, yerinde uygulamalarda kullanılan tipik duvar harçları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 2.5: Dolgu duvar harcının basınç dayanımı sonuçları.

DUVAR VE SIVA HARCI				
NUMUNE	H Yükseklik (mm)	D Çap (mm)	Pmax (kN)	σmax (MPa)
1	300	150	115.20	6.52
2			113.90	6.45
3			117.65	6.66
		Ortalama σ (MPa)		**6.54**

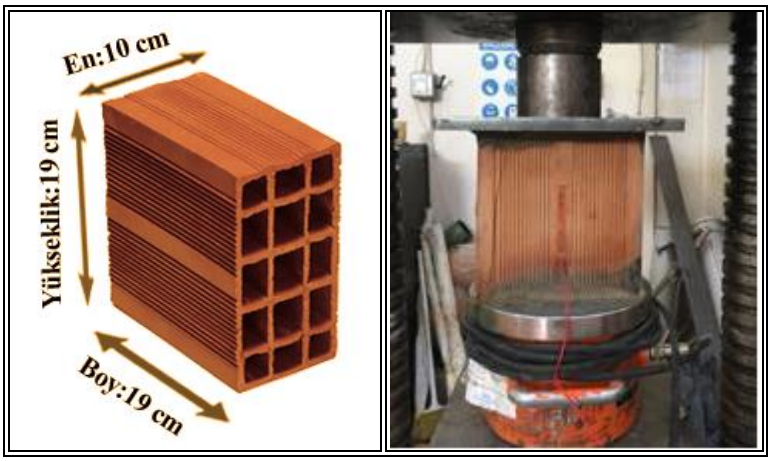
2.3.2. Tuğla Deneyleri

Dolgu duvarlarda kullanılan pişmiş kil esaslı tuğlaların dayanım özellikleri, duvar sisteminin genel davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, yapı sisteminde kullanılan tuğlalardan üç örnek alınarak basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.

Tablo 2.6: Tuğla numunelerinin basınç deney sonuçları.

Mekanik Özellik	**Ortalama Değer (MPa)**
Basınç Dayanımı (deliklere paralel)	6.60
Elastisite Modülü (deliklere paralel)	4480
Basınç Dayanımı (deliklere dik)	1.79

Tuğlalar, basınç testi öncesinde düzgün yüzey elde edilebilmesi amacıyla alçı ile tesviye edilmiş, ardından basınç uygulamaları pres makinesi ile tuğlanın delik doğrultusunda yapılmıştır (Şekil 2.30). Deney sonuçları Tablo 2.6'da sunulmuş olup, elde edilen ortalama basınç dayanımı 6.60 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.30: Dolgu duvarların üretiminde kullanılan tuğlaların standart basınç deneyleri.

2.3.3. TRCC Harcı Deneyleri

TRCC sisteminde matris olarak kullanılan çimento esaslı harç, güçlendirme performansı açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla hazırlanan harç numuneleri üzerinde basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Silindirik (150x300 mm) numuneler 28 günlük kür sonrasında Amsler marka 5000 kN kapasiteli test cihazında, TS EN 12390-3 standardına uygun şekilde test edilmiştir. Ayrıca, 40x40x160 mm prizma şeklindeki numunelerle üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır (Gür, 2017).



Şekil 2.31: Harç numunelerinde basınç deneyi.

Basınç testlerinde TML marka CM-15 ölçüm çerçevesi ve TDS-530 veri toplama sistemi kullanılarak, gerilme-şekil değiştirme ilişkileri detaylı şekilde kaydedilmiştir. Elde edilen ortalama basınç dayanımı 50.70 MPa, eğilme dayanımı ise 13.8 MPa olarak ölçülmüştür (Tablo 2.7).

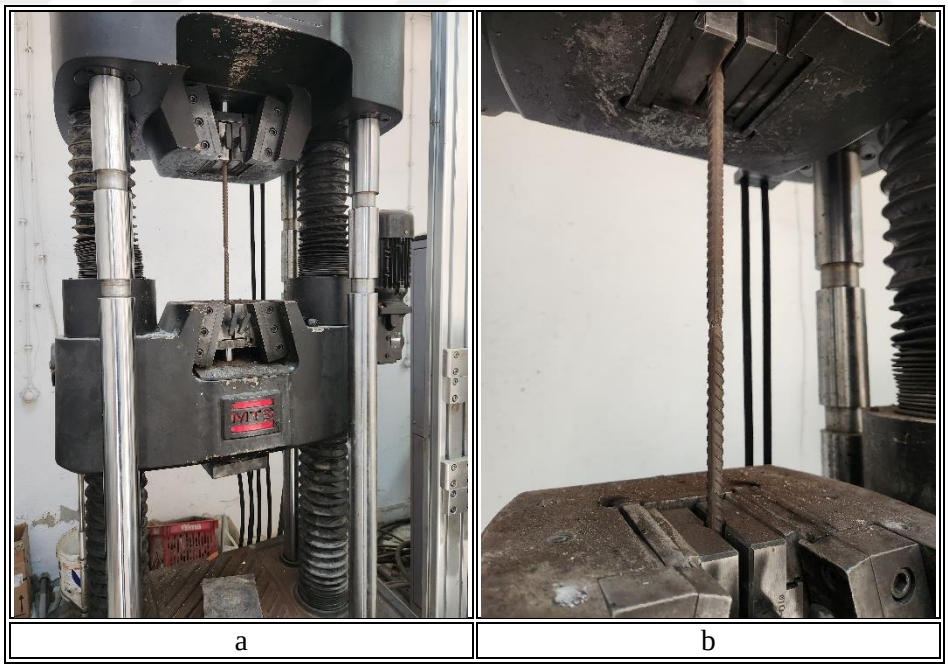
Tablo 2.7: TRCC harcının mekanik dayanım sonuçları (Daşkıran, 2018).

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Ort. Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Ort. Elastisite Modülü (MPa)
1	53.3		22309	
2	48.8		24346	
3	50.1		23240	
		50.7		**23298**



Şekil 2.32: Üç noktalı eğilme deneyi (Gür, 2017).

2.3.4. Donatı Çekme Deneyi

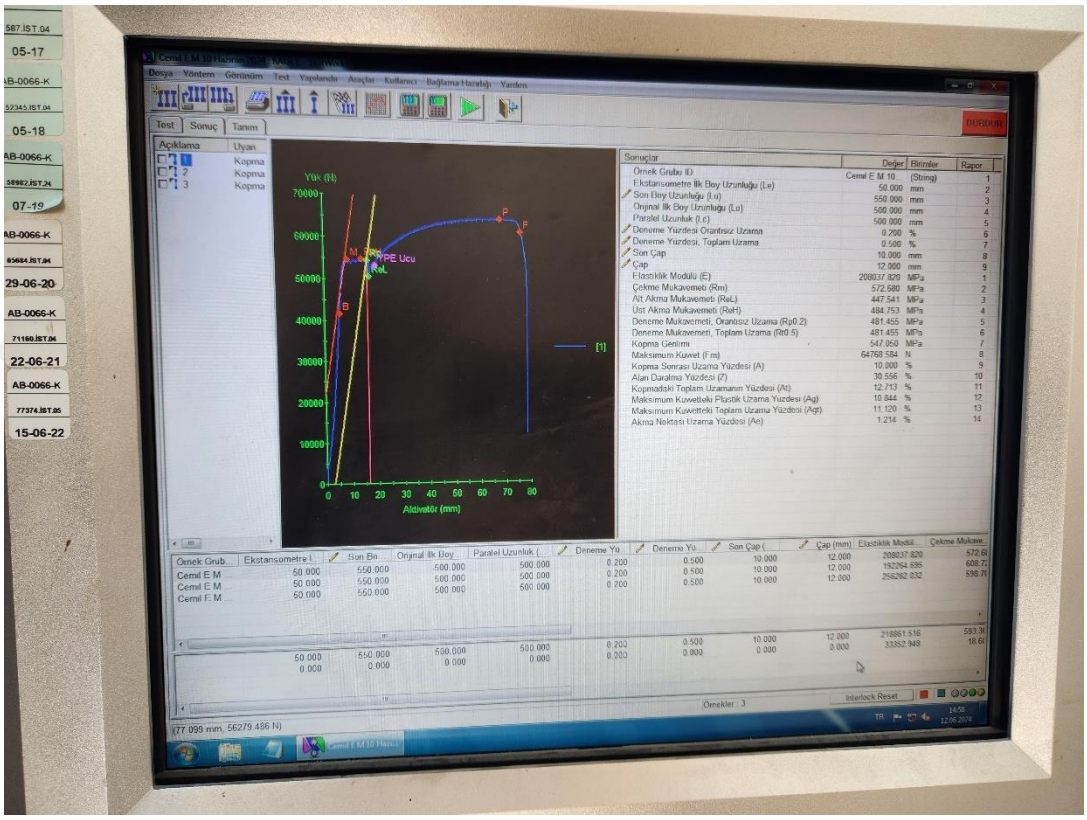


a b

Şekil 2.33: Betonarme çerçevelerin üretiminde kullanılan donatıların çekme deneyleri a) mekanik çekme aleti, b) donatı akma durumu.

Çerçeve sistemde kullanılan Ø8 çapındaki nervürlü donatılar, sistemin rijitliğini sağlayan önemli bileşenlerdendir. Bu çubuklardan alınan numunelere TS 708 standardına uygun olarak

çekme testi uygulanmıştır. Deneyden önce, kullanılan donatılardan parçalar koparılıp hazırlanarak ölçüm cihazlarına titizlikle yerleştirilmiş ve bu sayede deneysel doğruluk artırılmaya çalışılmıştır (Şekil 2.33). Deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, donatının elastisite modülünü ve akma dayanımını belirlemede kullanılmıştır.



Şekil 2.34: Betonarme çerçevelerin üretiminde kullanılan donatıların ortalama gerilme – şekil değiştirme eğrisi.

2.3.5. Beton Dayanımı ve Elastisite Modülü

Tablo 2.8: Karot örneklerinin basınç dayanımı sonuçları.

Mekanik Özellik	**Ortalama Değer (MPa)**
Ortalama Basınç Dayanımı	27.10
Ortalama Elastisite Modülü	30600
Çekme Dayanımı [$f_{ctk} = 0.35 \sqrt{f_{ck}}$]	1.82

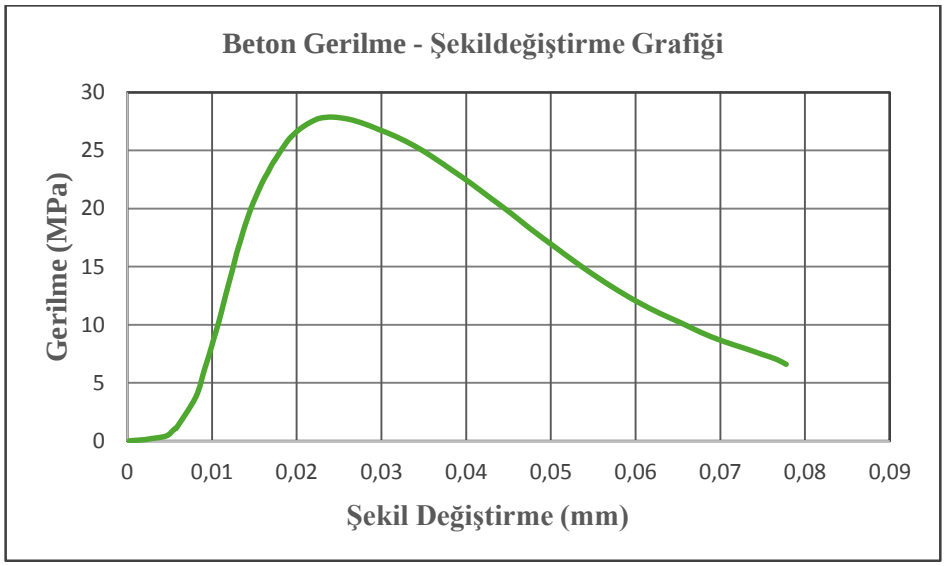
Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun davranış özelliklerini belirlemek üzere, statik testlerin ardından çerçevelerden alınan karot örnekleri üzerinde basınç ve gerilme-şekil değiştirme deneyleri yapılmıştır. Mevcut çerçevelerden alınan 93.5 mm çapında ve yaklaşık 90 mm yüksekliğindeki karotlara (yaklaşık 1/1) öncelikle başlık uygulaması yapılmış, başlık harcının kurumasının ardından farklı düzeneklerle hem basınç dayanımı hem de elastisite modülü ölçülmüştür. Çerçevelerde kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımının tespiti

için karotlardan alınan sonuçlar standart silindir basınç dayanımına dönüştürülmüş ve kullanılan betonun basınç dayanımı bulunmuştur.



Şekil 2.35: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun basınç deneyleri.

Çıkan sonuçlara göre basınç dayanımı 27.1 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda çizilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinden de betonun elastisite modülünün 30600 MPa olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.36: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

Basınç değerine bakıldığında çerçevelerde kullanılan beton, ülkemizde hala yaygın olarak kullanılan ve aynı zamanda da mevcut yapı stokunun ortalama beton dayanımına yakın bir değer olarak düşünülebilir.



Şekil 2.37: Betonarme çerçevelerde kullanılan betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için kullanılan düzenek.

3. YÖNTEM

Çerçeve türü yapıların idealize edilerek üretilen ve deneylerde kullanılan prototip örnekler, özellikle betonarme yapıların deprem gibi yatay yükler altındaki davranışlarının ortaya çıkarılmasında oldukça kullanışlıdırlar. Tekrarlı yükler altında manuel olarak denenebilmesi veya deprem etkilerinin simüle edilip etkitilmesi ile otomatik olarak hareket ettirilmesi sonucu denenmeleri bu tür çerçeve türü yapıların prototiplerinin kullanılmasının deneysel yöntemler arasında en temel ve güvenilir yaklaşımlardan bir olmuştur. Bu yöntemle yapılan çalışmalar, taşıyıcı sistem elemanlarının (kolon, kiriş ve varsa dolgu duvarlar veya güçlendirilmiş dolgu duvarların) birlikte nasıl davrandığını, yapıdaki hasar gelişimini, malzemelerdeki kırılma veya deformasyonların ilerleyişini, plastik mafsal oluşumlarını, enerji yutma kapasitesini, şekil değiştirme sınırlarını ve göçme mekanizmalarını doğrudan gözlemleme imkânı sunar. Deney sırasında manuel olarak uygulanabilen tekrarlı yükler sayesinde bu tür çerçevelerin hem elastik hem de plastik davranış aralıkları detaylı olarak incelenebilir. Böylece bu numuneler üzerinden, yapı sistemlerinin süneklik düzeyi, rijitlik değişimi ve hasar oluşumu gibi kritik parametreler deneysel olarak belirlenerek hem mevcut yönetmeliklerin değerlendirilmesi hem de yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında üretilen çerçeveler de yine aynı mantık ve düşünceyle üretilmiş olup tekrarlı yükler altında denenerek yapılarla alakalı kritik konularda teknik bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır. Bir önceki bölümde üretim aşamaları anlatılan çerçeve tipi 1/3 ölçekli numuneler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda tersinir tekrarlı yükleme yapabilen deney düzeneğinde manuel olarak test edilmiş ve çıkan sonuçlar birbiriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

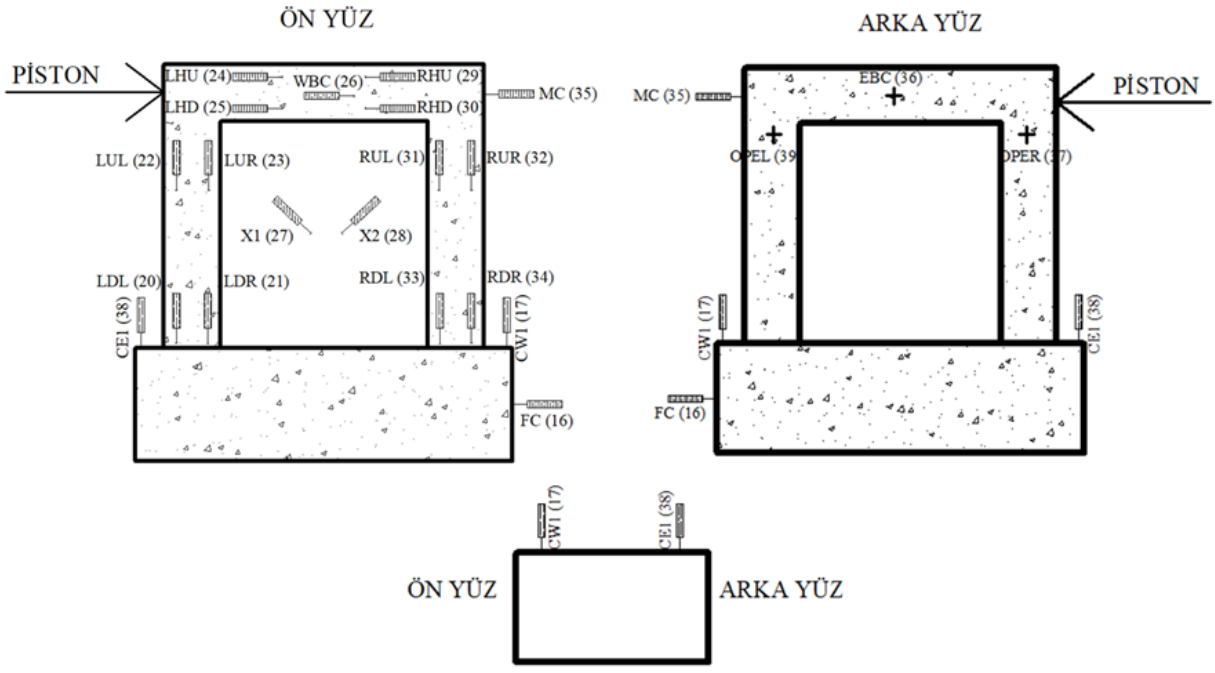
3.1. BETONARME ÇERÇEVELERİN DENEY DÜZENEĞİ

Deneyler yer değiştirme kontrollü yöntemle yürütülmüş olup, her bir yükleme çevrimi için hedeflenen yer değiştirme değerine denk gelen yatay yük belirlenmiştir. Bu yükleme ve boşaltma durumlarında deney numunelerinden veri elde etmek amacıyla numunelerin çeşitli yerlerine yer değiştirme ve şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Uygulanan tersinir yüklerin, deney düzeneğinin, veri toplama mekanizmasının ve yükleme prosedürlerinin detayları adım adım ileriki bölümlerde anlatılmıştır. Bu sayede hem uygulanan yüklerin hem

numunenin yaptığı deplasman hareketinin hem de numunenin davranışının gerçek zamanlı olarak izlenmesi sağlanmıştır.

3.1.1. Ölçüm Düzeneği

Betonarme çerçeve numunelerinde, deney süreci boyunca oluşan yer değiştirmelerin farklı bölgelerde hassas bir şekilde ölçülmesi amacıyla, TML marka CDP-5, CDP-10, CDP-25 ve SDP-100 tipi yer değiştirme ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bu sensörler sırasıyla ±5 mm, ±10 mm, ±25 mm ve ±100 mm aralıklarında yüksek doğrulukla ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptir. Sensör seçiminde, ölçüm noktalarında beklenen yer değiştirme büyüklükleri dikkate alınarak uygun ölçüm aralığı belirlenmiştir. LVDT cihazları, numune üzerindeki kritik noktalar- örneğin, kolon-kiriş birleşimleri, orta açıklık noktaları ve yatay yer değiştirmelerin maksimum olmasının beklendiği bölgeler- göz önünde bulundurularak yerleştirilmiştir. Yerleştirme esnasında, sensörlerin doğrusal hareket yönüne paralel olacak şekilde hizalanmalarına ve rijit bağlantılarla monte edilmelerine özen gösterilmiştir. Sensör uçları, deney numunesiyle doğrudan temasta olacak şekilde, kayma veya dönme etkilerini minimize edecek biçimde sabitlenmiştir. Tüm LVDT'ler, bilgisayara bağlı bir elektronik veri toplama ünitesi (Data Logger) ile entegre şekilde çalışacak biçimde sisteme dâhil edilmiştir. Veri toplama sistemi, sensörlerden gelen analog sinyalleri sayısallaştırarak her yükleme adımında eş zamanlı olarak ölçüm verilerini kaydetmiştir.



Şekil 3.1: Deney numunesinin her iki yüzüne ve temele yerleştirilmiş yerdeğiştirme ölçerlerin (LVDT) yerleri ve kanal numaraları

Bu veriler, bilgisayar ortamına otomatik olarak aktarılmış ve deney süresince sürekli izleme ile yapısal tepkilerin detaylı olarak değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Elde edilen bu ölçümler hem yatay ötelenmelerin hem de dönel yer değiştirmelerin belirlenmesinde temel veri kaynağını oluşturmuştur.

Yer değiştirme ölçerler, numune yüzeyine hem itme hem de çekme yönündeki hareketleri doğru şekilde algılayacak biçimde yerleştirilmiştir. Ölçüm düzeneği ve her bir ölçerin bağlı olduğu kanal numaraları Şekil 3.1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

Deney numunelerinin farklı bölgelerinde meydana gelen yer değiştirmelerin izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi amacıyla toplam 22 adet LVDT numune üzerine yerleştirilmiştir. Bu düzenek sayesinde; temel bölgesindeki kalkma hareketleri, gövdedeki toptan kayma davranışı ve numunenin düzlem dışı yer değiştirmeleri hassas şekilde ölçülmüştür.

Ayrıca, kolon ve kiriş uç bölgelerinde oluşan şekil değiştirme, dönme ve eğrilik gibi parametrelerin belirlenebilmesi için CDP-5 tipi LVDT'ler tercih edilmiştir. Bu sensörler, numune imalatı sırasında yerleştirilen dişli çubuklara, her iki tarafından somunlarla sabitlenerek, dönmeye karşı emniyetli bir şekilde monte edilmiştir. Böylece, ölçerlerin doğrusal hareketleri doğru şekilde kayıt altına alınmıştır.

Toplam 12 adet yerdeğiştirme ölçer, kolon ve kiriş uç bölgelerine Şekil 3.1'de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Numunenin tepe yer değiştirmesinin ölçümü için ise üç adet LVDT kullanılmıştır. Bu ölçerler, numunenin ön yüzündeki WBC, arka yüzündeki EBC ve kiriş-kolon birleşim noktasındaki MC kodlu sensörlerdir.

Bahsi geçen LVDT'ler, numuneye uygulanan tersinir yüklemeler sonucunda kiriş ekseninde oluşan tepe yer değiştirmesini hassas şekilde kaydetmektedir. MC ve WBC kodlu ölçerler SDP-100 tipi olup, veri toplayıcı cihazın (Data Logger) 35. (MC) ve 26. (WBC) numaralı kanallarından ölçüm alınmaktadır.

Numunenin arka yüzündeki tepe yer değiştirmesini ölçen EBC kodlu LVDT, CDP-25 tipi olup 36. kanaldan veri almaktadır. EBC ve WBC kodlu yerdeğiştirme ölçerler, numunenin düzlem dışı hareketini engelleyen sabitleştiricilere mesnetlenmiştir. Deney süresince numunede oluşabilecek düzlem dışı hareketler, OPEL ve OPER kodlu ölçerlerle izlenirken; taban kayması FC ve temeldeki genel kalkma hareketleri CE1 ve CW1 kodlu ölçerler tarafından takip

edilmiştir. Bu ölçerlerden gelen veriler, veri toplayıcının (Data Logger) sırasıyla 39, 37, 16, 38 ve 17 numaralı kanallarından kaydedilmiştir.

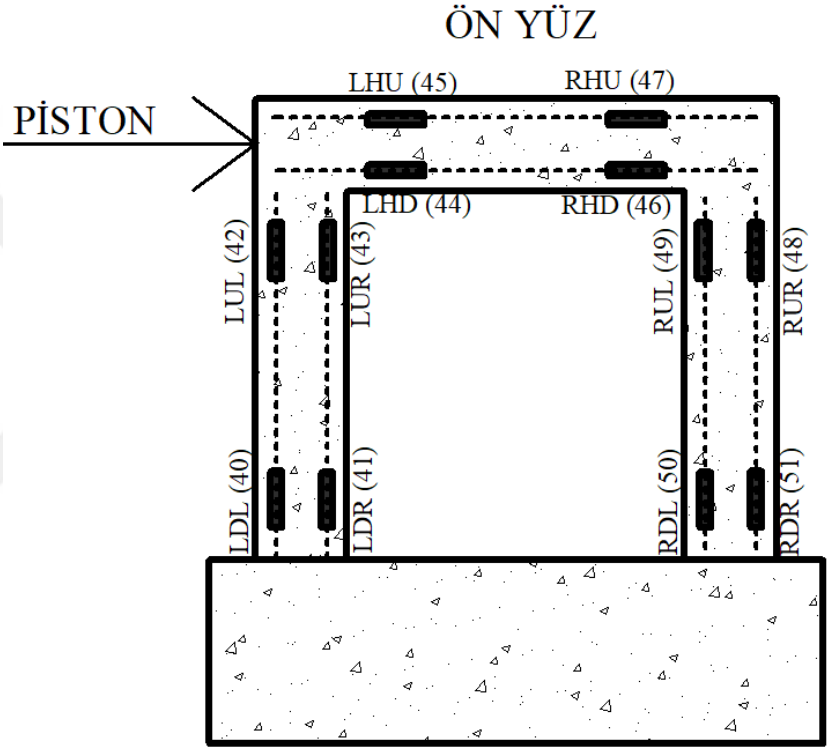
Tablo 3.1'de, deneyde kullanılan tüm yerdeğiştirme ölçerlerin (LVDT) kodları, tipleri ve bağlı oldukları kanal numaraları detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 3.1: Çerçeve numunelerinde kullanılan yerdeğiştirme ölçer listesi.

YERDEĞİŞTİRME ÖLÇER (LVDT) LİSTESİ		
LVDT Kodu	**LVDT Tipi**	**Kanal Numarası**
FC	CDP-10	16
CW1	CDP-25	17
LDL	CDP-5	20
LDR	CDP-5	21
LUL	CDP-5	22
LUR	CDP-5	23
LHU	CDP-5	24
LHD	CDP-5	25
WBC	SDP-100	26
X1	CDP-10	27
X2	CDP-10	28
RHU	CDP-5	29
RHD	CDP-5	30
RUL	CDP-5	31
RUR	CDP-5	32
RDL	CDP-5	33
RDR	CDP-5	34
MC	SDP-100	35
EBC	CDP-25	36
OPER	CDP-25	37
CE1	CDP-25	38
OPEL	CDP-25	39

Buna ek olarak, deney süresince betonarme çerçeve numunelerinde oluşan iç kuvvetlerin donatılar üzerindeki etkilerini izleyebilmek amacıyla, çeşitli noktalara strain gauge (elektriksel direnç tipi şekil değiştirme ölçerler) yerleştirilmiştir. Bu sensörler, donatı

çubuklarının yüzeyine yalıtımlı bantla yapıştırılarak eksenel doğrultuda uygulanmış ve her biri, deney boyunca oluşan gerilmeleri doğrudan izlemek üzere veri toplama sistemine entegre edilmiştir. Strain gauge yerleşimi, özellikle eğilme ve kesme gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerde (örneğin kolon-kiriş birleşimleri ve kolon alt/üst uçları) gerçekleştirilmiştir. Her bir strain gauge, bilgisayara bağlı yüksek hassasiyetli bir veri toplama ünitesinde tanımlı kanal numaralarıyla ilişkilendirilmiştir. Kanal eşleştirmeleri sayesinde, farklı donatı bölümlerinde meydana gelen birim şekil değiştirmeler ayrı ayrı izlenmiş ve zamana bağlı değişimleri analiz edilebilmiştir.



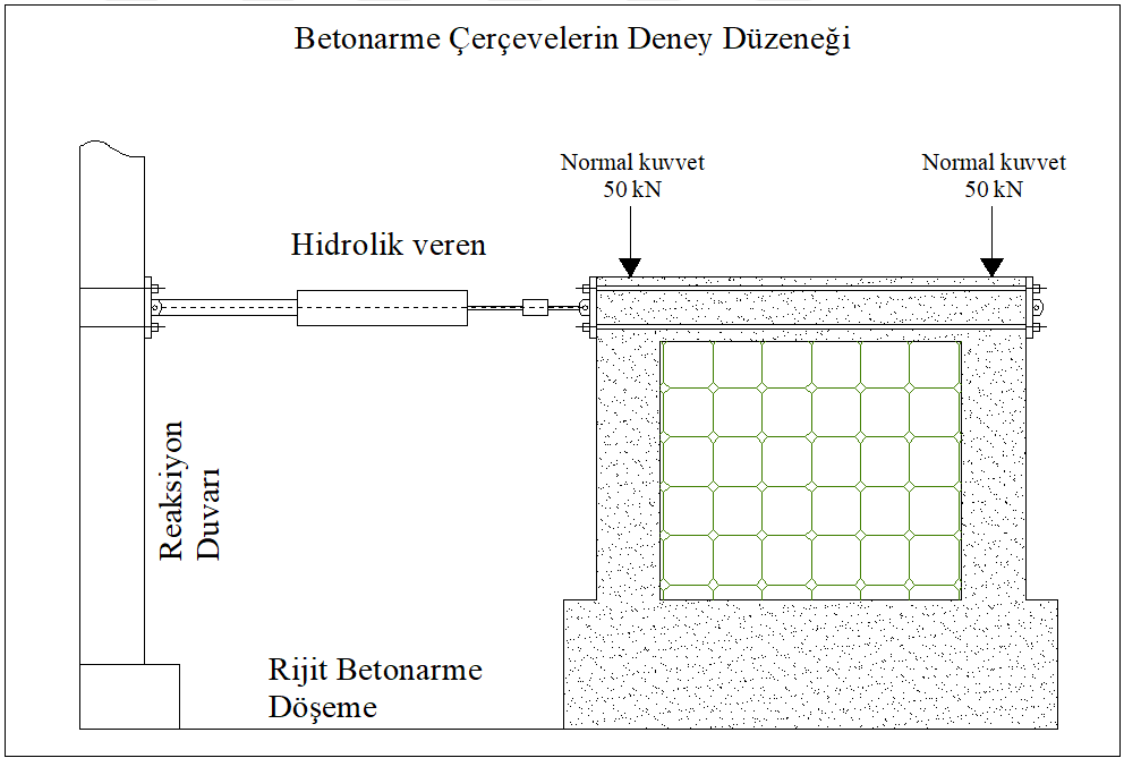
Şekil 3.2: Donatılara yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerin (strain gauge) yerleri ve kanal numaraları.

Ölçüm sistemi, strain gauge'lerden gelen analog sinyalleri dijital forma çevirerek her yükleme adımında veri kaydını otomatik olarak gerçekleştirmiştir. Böylece hem elastik hem de plastik davranış bölgesinde oluşan şekil değiştirmeler, zamana bağlı olarak yüksek çözünürlükte elde edilmiştir. Ölçüm verileri, donatıların akma başlangıcı, maksimum gerilme noktaları ve muhtemel gevrek kırılma riski gibi kritik yapısal davranışların belirlenmesinde önemli bir referans sağlamıştır.

Kullanılan şekil değiştirme ölçüm düzeneği ile strain gauge'lerin numune üzerindeki konumları ve bağlandıkları kanal numaraları, Şekil 3.2'de şematik olarak sunulmuştur.

3.1.2. Yükleme düzeneği

Deneysel çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut olan gelişmiş yükleme düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme çerçevesi, yüksek dayanımlı çelik profillerden imal edilmiştir ve deney sırasında oluşan reaksiyon kuvvetlerini rijit ve donanımlı laboratuvar beton döşemesine emniyetli bir şekilde aktarabilmektedir. Tersinir yatay yüklemeler, ±250 kN maksimum kuvvet ve ±300 mm maksimum yer değiştirme kapasitesine sahip MTS ACTUATOR marka hidrolik veren sistemi ile uygulanmıştır. Bu sistemin reaksiyon kuvveti, deneysel düzenekte yer alan betonarme reaksiyon duvarına iletilmiş, böylece yük aktarımı stabil ve kontrollü bir şekilde sağlanmıştır. Hidrolik verenin her iki ucunda bulunan mafsallar, yükün hem yükleme düzlemi yönünde hem de buna dik doğrultuda serbestçe hareket etmesine olanak tanıyarak yapısal deformasyonların doğal olarak gelişmesini sağlamıştır.



Şekil 3.3: Çerçeve numunelerine eksenel ve yatay yüklemenin yapıldığı düzeneğin şematik çizimi.

Deney kapsamında, test edilen betonarme çerçeveler, 5 katlı bir yapının zemin katında bulunan bir aksın modellenmesi amacıyla eksenel yük altında değerlendirilmiştir. Kat yükleri, yönetmeliklere uygun olarak her kat için 10 kN olarak hesaplanmış ve toplamda 50 kN eksenel kuvvet zemin kata uygulanmıştır. Bu eksenel yük, deney esnasında yük hücresi (loadcell) yardımıyla hassas şekilde ölçülmüş ve veri toplayıcı (Data Logger) ile gerçek zamanlı olarak

bilgisayara aktarılmıştır. Bu sayede, uygulanan eksenel yükün deney boyunca stabilitesi ve doğruluğu sürekli izlenmiş, veri güvenilirliği sağlanmıştır.



Şekil 3.4: Deney düzeneği.

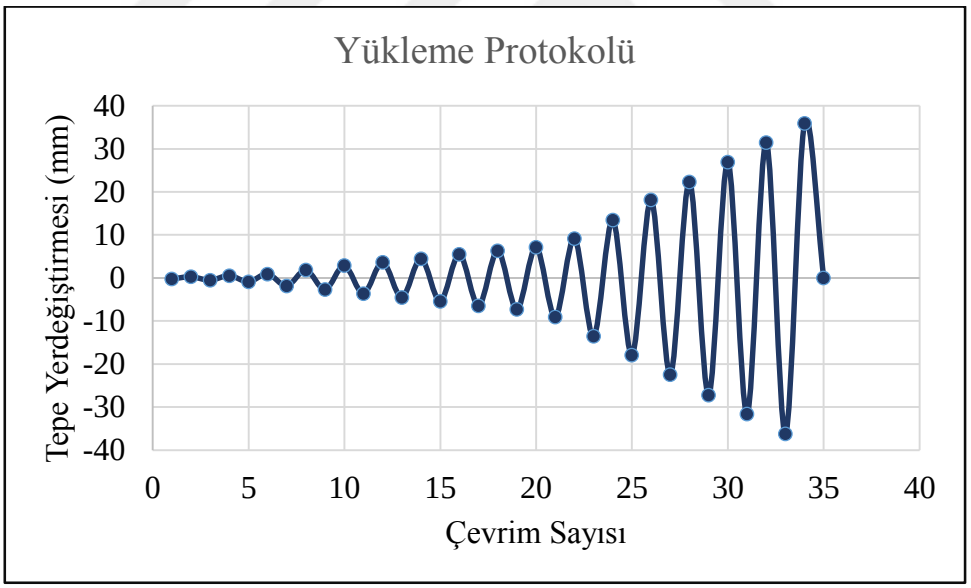
Tersinir yükleme uygulamalarının gerçekleştirilmesi amacıyla, ACTUATOR hidrolik verenin yük uygulama başlığındaki deliklerden geçirilen Ø18 mm çapında iki adet yüksek dayanımlı ankraj çubuğu, numunenin karşı ucunda bulunan kalın çelik plakaya somunlarla kuvvetli bir şekilde bağlanmıştır. Bu ankraj sistemi, yükün güvenli ve etkin aktarımını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca, deneyde yatay yükler altında temel mesnetinin gerçekçi ve güvenilir ankastre davranış sergilemesi için, toplam 24 adet Ø18 mm çapında ankraj bulonu kullanılmıştır. Bu bulonlara uygulanan ön germe kuvveti, mesnetleme sisteminin rijitliğini artırarak deney boyunca mesnet hareketlerinin minimize edilmesini sağlamıştır. Deney sırasında yapılan sıkı kontrol ve izleme ölçümleri, mesnetleme sisteminin ankastre koşullara oldukça yakın performans gösterdiğini doğrulamıştır.

Numunenin deney esnasında düzlem dışı hareketlerinin engellenmesi amacıyla, deney düzeneğinin ön ve arka yüzeylerinde, kiriş seviyesinde olmak üzere iki adet çelik kiriş konumlandırılmıştır. Bu kirişler, deney çerçevesine modüler olarak takılıp çıkarılabilmekte ve esnek bir kullanım imkânı sağlamaktadır. Çelik kirişlerin kesitlerinde bulunan özel tasarımlı boşluklardan geçen tekerlek mekanizmaları, numunenin düzlem içi hareketini kontrollü şekilde sınırlandırarak düzlem dışı serbest hareketlerin önüne geçmiştir. Böylece deney sonuçlarının doğruluğu ve tekrarlanabilirliği artırılmıştır.

Deneyler yer değiştirme kontrollü yöntemle yürütülmüş olup, her bir yükleme çevrimi için hedeflenen yer değiştirme değerleri, gelişmiş bilgisayar kontrollü sistem ve otomatik kontrol ünitesi aracılığıyla ACTUATOR hidrolik verene hassas şekilde iletilmiştir. Uygulanan tersinir yüklerin büyüklüğü, hidrolik veren gövdesine entegre edilen yüksek hassasiyetli yük hücresi (loadcell) tarafından ölçülmüş ve anlık olarak veri toplayıcı (Data Logger) sistemine iletilmiştir. Bu sayede hem uygulanan yüklerin hem de numunenin davranışının gerçek zamanlı olarak izlenmesi sağlanmıştır. Deney düzeneği ve yükleme çerçevesinin detaylı görünümü Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

3.1.3. Yükleme protokolü

Deneyler statik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Statik deneylerde kullanılan yükleme protokolü, Şekil 3.5'de detaylı olarak sunulmuştur. Her bir yer değiştirme genliği, numuneye bir tam çevrim (bir kez itme ve bir kez çekme) şeklinde uygulanmıştır (Özkan, 2012). Bu yöntem, numunenin tersinir davranışını analiz etmek ve malzeme ile yapı elemanlarının performansını her bir adımda değerlendirebilmek için tercih edilmiştir.



Şekil 3.5: Deneylerde uygulanan yer değiştirme protokolü.

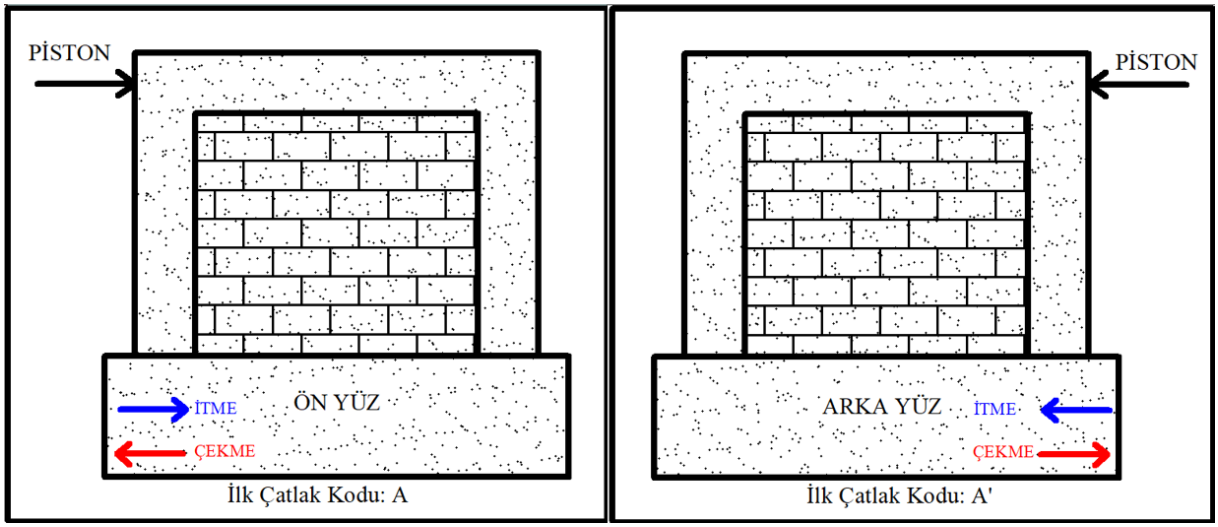
Deneyler yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme çevrimleri, özel olarak geliştirilmiş kontrol yazılımı aracılığıyla bilgisayardan hidrolik verene komutlar halinde iletilmektedir. Bu yazılım, kullanıcı tarafından girilen hedef yer değiştirme değerleri ile adım sayısı doğrultusunda, hidrolik verene hassas ve kademeli hareket komutları göndermekte; böylece deney sürecinde istenilen yer değiştirme adım adım ve kontrollü şekilde uygulanmaktadır.

Deney protokolünde, her betonarme çerçeve numunesi için yatay yük taşıma kapasitesinin azalma kriteri olarak maksimum yatay yükün %85'ine düşmesi esas alınmıştır. Bu eşik, numunenin dayanımında belirgin bir azalma ve yapısal hasar seviyesinin oluştuğunu göstermek üzere belirlenmiştir. Deneylerin bu noktada sonlandırılması, numunenin güvenli çalışma sınırlarının ötesine geçmeden mekanik performansının objektif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Ayrıca, deney süresince elde edilen yük-yer değiştirme verileri anlık olarak veri toplayıcı sistemine kaydedilmekte; böylece numunenin deformasyon ve enerji tüketim karakteristikleri detaylı olarak analiz edilebilmektedir. Bu veriler, numunenin davranışının modellenmesi ve güçlendirme tekniklerinin etkinliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

3.1.4. Deneysel Hasar ve Olay Takibi

Betonarme çerçeveler, yukarıda açıklanan deney ve ölçüm düzenekleri kullanılarak, belirlenen yükleme protokolüne uygun şekilde, numunelere itme ve çekme hareketleri uygulanarak tersinir olarak test edilmiştir. Deneyler, numunelerin maruz kaldığı sabit eksenel yükler altında statik olarak yürütülmüştür. Uygulanan eksenel yük sabit tutulmuş ve her deneyde 50 kN olarak verilmiştir.



Şekil 3.6: Deneylerde uygulanan itme-çekme yönleri ve kalem renkleri.

Bu sabit eksenel yük, deneyde incelenen 5 katlı yapının zemin katındaki betonarme çerçeve üzerine gelen toplam yükü temsil etmektedir. Eksenel yükün sabit tutulması, numunenin gerçek hizmet koşullarına benzer davranış göstermesini sağlamakta ve itme-çekme yüklemeleri altında yapısal performansının daha doğru değerlendirilmesine olanak

tanımaktadır. Deney sürecinde, yük ve yer değiştirme değerleri hassas sensörler ve veri toplama sistemleri ile sürekli izlenmiş; bu sayede numunelerin dayanım, deformasyon ve enerji tüketim karakteristikleri detaylı bir şekilde analiz edilebilmiştir.

Deneylerde, her bir itme hareketi ile ona karşılık gelen çekme hareketi bir çevrim (cycle) olarak tanımlanmıştır. Bu çevrimsel yükleme, numunelerin tersinir davranışlarını ve hasar gelişim süreçlerini her bir adımda detaylı olarak incelemek amacıyla uygulanmıştır. Deney sırasında, numunelerde oluşan çatlaklar sistematik bir şekilde harflerle isimlendirilmiş ve izlenmiştir.

Ön yüzeyde gözlemlenen ilk çatlak "A" harfiyle etiketlenmiş, sonraki çatlaklar ise alfabetik sıra ile devam ettirilmiştir. Arka yüzeyde ise çatlaklar, ilk oluşan çatlak "A'" (A üssü) ile isimlendirilmiş, ardından gelen çatlaklar sırasıyla "B'", "C'" gibi tırnak işareti eklenerek tanımlanmıştır. Bu isimlendirme sistemi, çatlakların konum ve gelişim süreçlerinin ayrıntılı takibini sağlamaktadır.

Çatlak genişlikleri, her bir çevrim tamamlandığında ölçülmüş ve deney süresince değişimleri kayıt altına alınmıştır. Çatlakların oluşma zamanları, renk kodlama yöntemi ile görsel olarak da izlenmiştir; itme yüklemesi sırasında oluşan çatlaklar mavi kalemle, çekme yüklemesi sırasında gelişen çatlaklar ise kırmızı kalemle işaretlenmiştir (Şekil 3.6). Bu renk ayrımı, numunelerin farklı yükleme yönlerine verdikleri tepkilerin analizini kolaylaştırmaktadır.

Deneylere öncelikle referans numuneler (çıplak betonarme çerçeve ve içine dolgu duvar örülmüş çerçeveler) ile başlanmış, ardından TRCC plakalar ile güçlendirilmiş numuneler sırayla test edilmiştir. Her bir numune için deney sürecinde elde edilen veriler ışığında, yük-yer değiştirme ilişkileri ve zarf eğrileri oluşturulmuş; numunelerin enerji tüketimleri hesaplanarak dayanım ve süneklik özellikleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, güçlendirme yöntemlerinin performansını anlamak ve referans numunelerle karşılaştırmak açısından önemli bir temel teşkil etmektedir.

Son olarak, her numunenin deney sürecinde meydana gelen önemli olaylar, oluşan çatlakların konumları ve gelişim şekilleri, ayrıca deney sırasında yapılan gözlemler sistematik olarak analiz edilmiştir. Bu analizler, yapı elemanlarının hasar mekanizmalarının anlaşılması ve gelecekteki güçlendirme uygulamalarının optimizasyonu için kritik öneme sahiptir.

4. BULGULAR

Betonarme çerçeve deneylerinin gerçekleşmesi sırasında kayıt altına alınan ve deney sürecinde meydana gelen önemli olaylar, numunelerde oluşan çatlaklar ve deneylerde yapılan gözlemler kısaca özetlenmiştir. Verilen çatlak genişlikleri, tamamlanan çevrimin sonunda ölçülen genişliklerdir. Kırmızı kalem ile çizilmiş çatlaklar çekme sırasında, mavi kalemle çizilen çatlaklar ise itme sırasında oluşan çatlaklar olduğu yukarıda belirtilmiştir. Bu çatlak numune üzerine işaretlendiği gibi şematik olarak da çizilmiş ve numunelerdeki çatlak durumunun daha net anlaşılması sağlanmıştır. Deney sürecinde numunelerden gelen kırılma, ezilme ve kopma gibi sesler de belirtilmiş ve hangi çevrimde olduğu kayıt altına alınmıştır. Deneylerle ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir.

4.1. BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ

Deneylere öncelikle referans numuneleri (çıplak ve dolgu duvarlı çerçeveler) ile başlanıp akabinde TRCC ile güçlendirilen numuneler (AR-2-2-A ve AR-2-4-A) sırasıyla denenmiştir. Deney sonunda her bir numunenin deneysel parametrelerinden yola çıkılarak yük-yer değiştirme ilişkisi ve enerji tüketimleri gibi teknik özellikleri belirlenmiş ve bu durumlar üzerinden güçlendirilmiş numuneler ile referans numunelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

4.1.1. Çıplak/Yalın Çerçeve Deneyi

Deney sürecinde numunede meydana gelen önemli olaylar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Çıplak çerçeve numunesi deneyinde ilk çatlak 6. Çevrimde, numunenin ön yüzünde oluştu. Çekme adımında numunenin ön yüzünde oluşan çatlak A olarak işaretlendi. A çatlağının genişliği 0,1 mm'den küçük olarak ölçüldü.

7. Çevrim itmede numunenin ön yüzünde 0,2 mm genişliğinde B çatlağı meydana geldi. Piston tarafındaki köşe birleşiminde ve ön yüzdeki B çatlağının simetriği olarak numunenin arka yüzünde A' çatlağı görüldü ve 0,1 mm olarak ölçüldü.

Aynı çevrim çekme adımında A çatlağı 0,4 mm olarak ölçüldü ve çatlakta bulunduğu köşeye doğru ilerleme meydana geldi. Numunenin arka yüzünde pistonun karşı tarafında B' çatlağı oluştu (0,1 mm).

8. Çevrim itmede B çatlağı genişleyerek 0,6 mm olarak ölçüldü.



Şekil 4.1: Çıplak çerçeve numunesi deney düzeneği

8. Çevrim çekme adımında ise A çatlağı genişlemeye devam ederek 0,7 mm olarak ölçüldü ve çatlakta köşeye doğru ilerleme devam etmiştir. Aynı çevrim çekmede numunenin arka yüzündeki mevcut B' çatlağı genişledi ve 0,5 mm olarak ölçüldü.

9. Çevrim itme adımında C çatlağı meydana geldi ve 0,1 mm olarak ölçüldü. Numunenin arka yüzünde mevcut A' çatlağı genişledi 0,3 mm olarak ölçüldü.

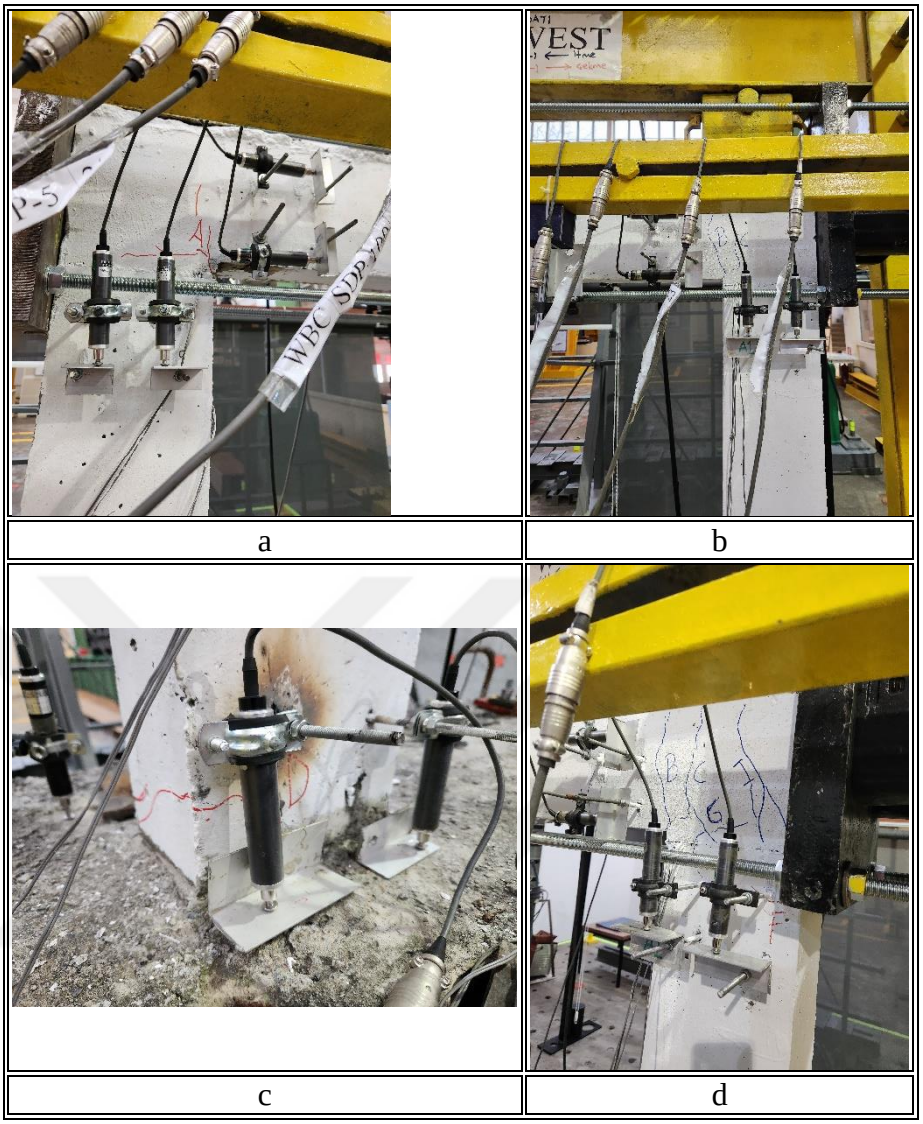
9. Çevrim çekmede ise A çatlağı 1,2 mm olarak ölçüldü ve çatlakta ilerlemeler meydana geldi. Pistonun karşı tarafındaki kolon-temel birleşimine yakın D çatlağı oluştu, çatlak 0,2 mm olarak ölçüldü ve kolonun dış yüzüne doğru devam ederek arka yüzüne ulaştı.

9. Çevrim çekme adımında numunenin arka yüzündeki mevcut B' çatlağı genişledi ve 1,2 mm olarak ölçüldü. Kirişte C' çatlağı 0,1 mm'den küçük olduğu görüldü.

10. Çevrim itme adımında numunenin arka yüzündeki mevcut A' çatlağı genişledi, 0,5 mm olarak ölçüldü.

10. Çevrim çekme adımında ise A çatlağı 1,3 mm, D çatlağı 0,5 mm olarak ölçüldü. Aynı çevrim ve aynı adımda (çekme) kolonda yeni çatlaklar oluştu. Bu çatlaklar; E çatlağı 0,1 mm ve F çatlağı 0,2 mm olarak ölçüldü.

Yine aynı çevrim çekme adımında numunenin arka yüzünde, ön yüzdeki mevcut D çatlağının devamı olarak D' çatlağı meydana geldi ve 0,1 mm olarak ölçüldü. D – D' çatlağının birleştiği hatta kolonun temel birleşiminde kırılmalar meydana gelmiştir. Mevcut B' çatlağı genişleyerek 1,0 mm olarak ölçüldü.



Şekil 4.2: Çıplak çerçeve numunesinde 7. ve 8. çevrimlerde oluşan ilk çatlaklar.

11. Çevrim itmede numuneden kırılma sesleri geldi. Piston tarafındaki kolon-kiriş birleşim yeri üzerinde G çatlağı oluştu ve 0,1 mm olarak ölçüldü. Aynı bölgede ezilmeler oluştu. Yine aynı çevrimde ve aynı adımda (itme) mevcut C çatlağı 0,8 mm ve B çatlağı 1,3 mm olarak ölçüldü.

Numunenin arka yüzünde piston tarafındaki kolonun üst tarafında E' çatlağı oluştu ve 0,1 mm'den küçük olarak ölçüldü. A' çatlağı ilerledi ve genişliği 0,7 mm olarak ölçüldü.

11. Çevrim çekme adımında mevcut A çatlağı iyice genişleyerek 1,3 mm oldu ve pistonun karşı tarafındaki kolon-kiriş birleşiminde yeni oluşan H çatlağı 0,2 mm olarak ölçüldü.

Numunenin arka yüzünde kolonun etriyeleri hizasında yeni çatlaklar oluştu. Bu çatlaklar sırasıyla F', G' ve H' olarak kodlandı. Çatlak genişlikleri yaklaşık olarak 0,1 mm civarında ölçüldü.

12. Çevrim itme adımında piston tarafındaki kolon-kiriş birleşim bölgesinde I çatlağı oluştu (0,2 mm) ve aynı bölgede beton ezilmeleri iyice arttı. Mevcut G çatlağı kolonun dış yüzüne doğru ilerledi ve numunenin arka yüzündeki simetriği olan A' çatlağıyla oluşturduğu hatta kolon-kiriş birleşimi iyice açıldı.

Kirişin alt yüzünde ve kiriş etriyesi hizasında 0,2 mm genişliğinde J çatlağı oluştu. Mevcut C çatlağı 1,4 mm olarak genişledi. Pistonun karşı köşesinde K çatlağı oluştu ve 0,3 mm olarak ölçüldü.

Aynı zamanda numunenin arka yüzündeki mevcut A' çatlağı genişledi ve ön yüzdeki G çatlağıyla birleşerek numunenin bu hattaki kolon-kiriş birleşim bölgesinin ayrıştığı görüldü.

Numunenin arka yüzünde pistonun karşı köşesinde yeni çatlaklar oluştu; I', K' ve J' çatlaklarının 0,2 mm olduğu belirlendi.

12. Çevrim çekmede piston tarafındaki köşede numunenin ön yüzünde L ve arka yüzünde simetrik olarak L' çatlağı oluştu ve o çatlaktan kolon-kiriş birleşimi iyice açıldı. Açılma genişliği 1,1 mm olarak ölçüldü.

Mevcut E çatlağı kolonun yüzünde ilerledi ve A çatlağı iyice açılarak A-C' çatlak hattı 2,2 mm olarak ölçüldü.

13. Çevrim itmede mevcut çatlaklar açılmaya ve genişlemeye devam etti. C çatlağı 2,0 mm ve K çatlağı 1,1 mm olarak ölçüldü.

Arka yüzdeki A' çatlağının olduğu hat iyice açıldı ve 2,0 mm'ye ulaştı.

Yine arka yüzde piston tarafındaki kolonun etriyeleri hizasında M' ve N' çatlakları oluştu (0,1 mm).

13. Çevrim çekmede A çatlağı iyice genişleyerek 3,1 mm oldu ve çatlağın olduğu pistonun karşı tarafındaki kolon ve kiriş birleşimi açılmaya devam etti.

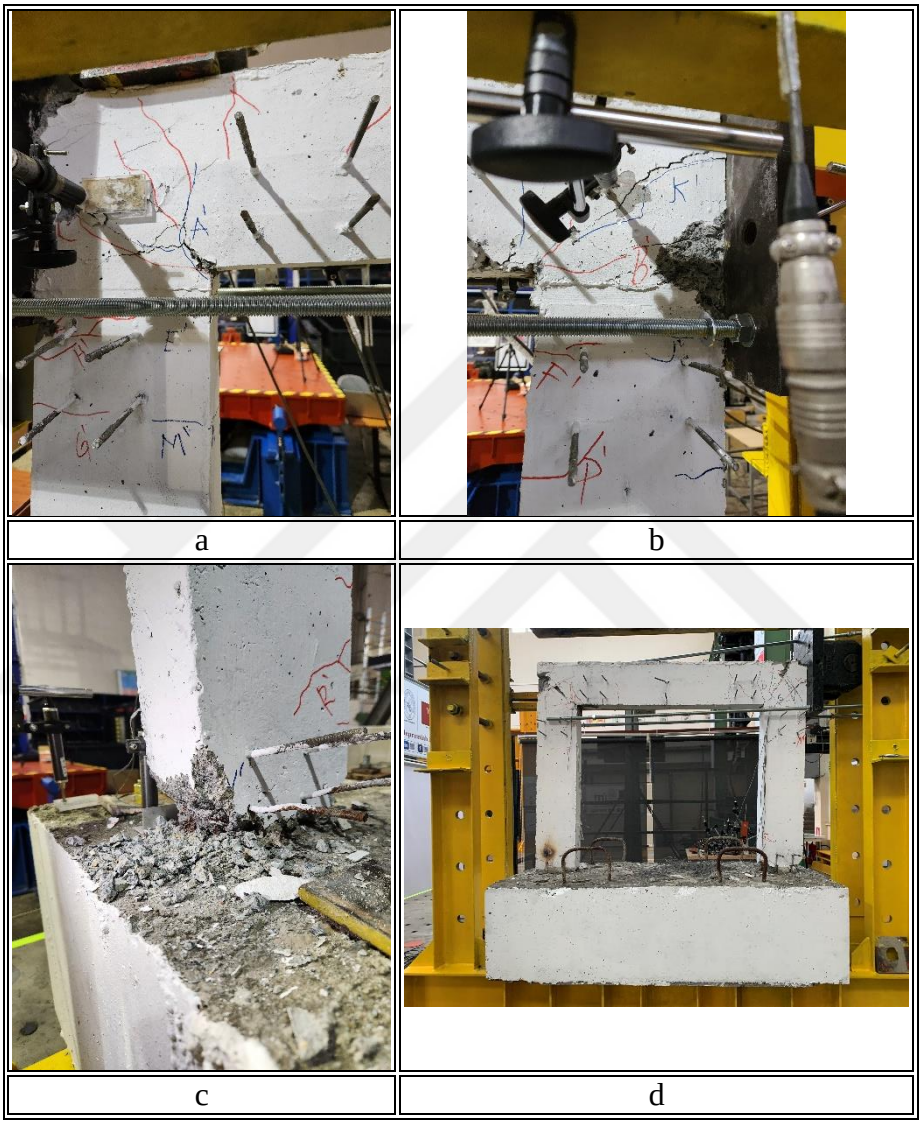
Kolon yüzünde yeni P, M ve N çatlakları oluştu ve kolon yüzüne doğru ilerledi (0,2 mm). L çatlağının genişliği yaklaşık 2,00 mm olarak ölçüldü.

Arka yüzdeki mevcut C' çatlağı açıldı ve 2,7 mm olarak ölçüldü. Yine aynı şekilde D' çatlağı genişledi ve 1,7 mm oldu.

Pistonun karşısındaki kolonda, etriye hizasında 0,2 mm genişliğinde P' çatlağı oluştu.

14. Çevrim itmede L çatlağı 2,7 mm'ye kadar genişledi. Kolon-kiriş birleşim yeri açılmaya devam etti ve birleşim C çatlağından iyice ayrıştı.

Mevcut K çatlağı 2,7 mm genişliğe ulaştı. Piston tarafındaki kolon-temel birleşiminde beton ezilerek ayrışma iyice ortaya çıktı.



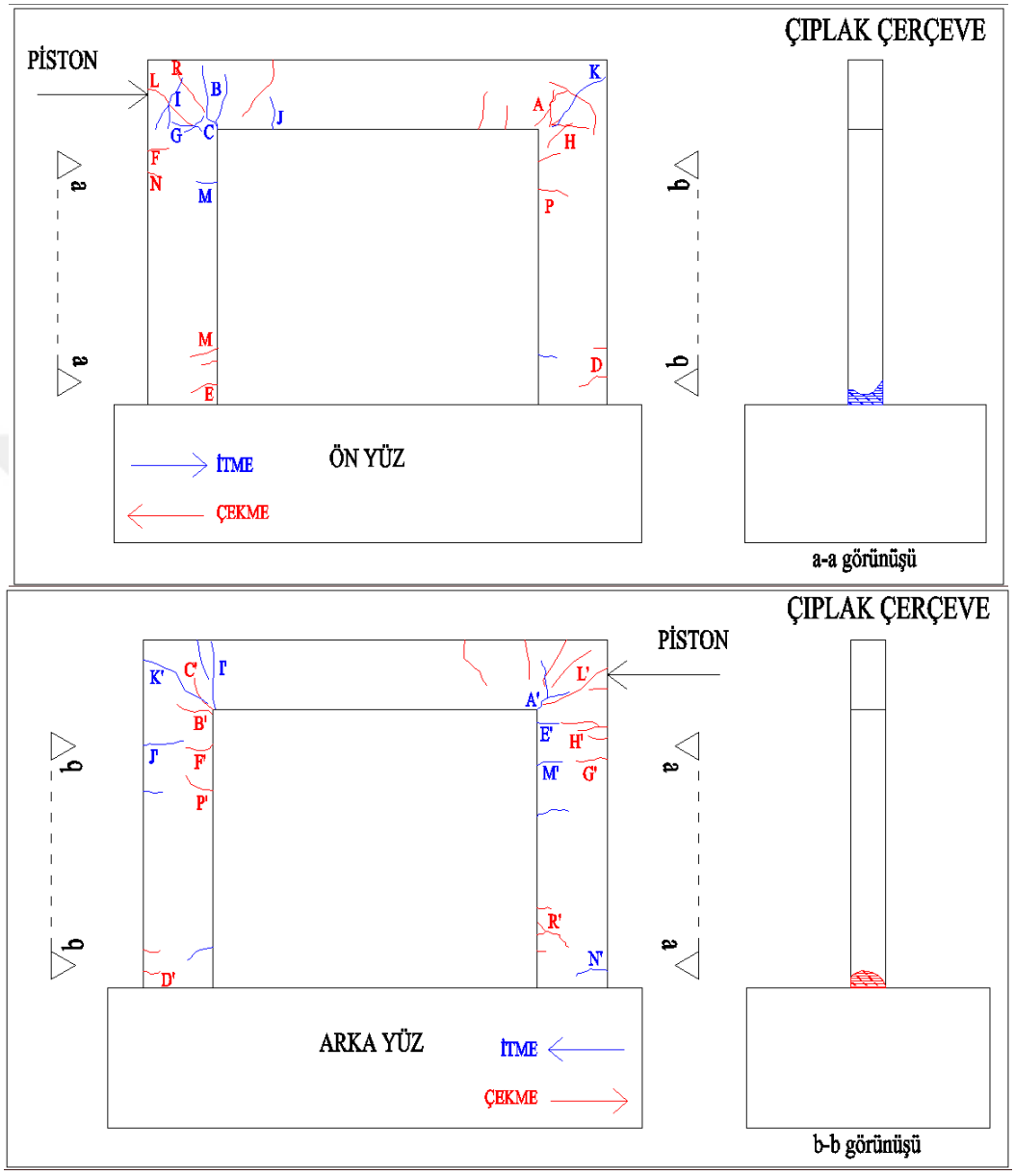
Şekil 4.3: Çıplak çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu.

Kolon dış yüzlerinde etriye hizasında çatlaklar belirginleşti. Birleşim bölgeleri (Temel-Kolon, Kiriş-Kolon) bu çevrimde iyice ayrıştı ve beton kırılmaları önemli oranda arttı.

14. Çevrim çekmede A çatlağı açılarak 3,00 mm oldu. Pistonun karşı tarafındaki başlık (kiriş betonu) ezildi.

Piston tarafında kolon-kiriş birleşiminde yeni R çatlağı oluştu ve 1,2 mm olarak ölçüldü.

Mevcut M çatlakları iyice ilerledi. Kiriş ve kolonlarda özellikle etriye hizalarından hem yeni çatlaklar oluştu hem de aynı bölgelerdeki mevcut çatlaklar genişledi.



Şekil 4.4: Çıplak çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi.

Piston tarafında kolon-temel birleşiminde betonun kırılması devam etti. Numunenin arka yüzündeki çatlaklar ön yüzündekilerle paralel olarak ilerledi ve genişledi. Aynı kırılma ve ayrışmalar numunenin arka yüzünde de meydana geldi.

15. Çevrim itmede mevcut K – K' ve C – A' çatlaklarının oluşturduğu hattan kolon-kiriş birleşim bölgeleri iyice kırıldı ve tamamen ayrıştı.

Mevcut I çatlağı 3,00 mm olarak ölçüldü.

Tablo 4.1: Çıplak çerçeve numunesi deneyinde meydana gelen önemli olaylar.

Çevrim No	Tepe Yer Değiştirme (mm)	Kat Göreli Öteleme Yüzdesi (%)	Oluşan Çatlaklar ve Genişlikleri (mm)
3	0.90	0.1	Belirgin gözlem yok
4	1.80	0.2	Belirgin gözlem yok
5	2.70	0.3	Belirgin gözlem yok
6	3.60	0.4	İlk çatlak A (ön yüz, <0.1 mm)
7	4.50	0.5	B (0.2 mm), A’ (arka yüz, 0.1 mm), A→ 0.4 mm, B’ (arka yüz, 0.1 mm)
8	5.40	0.6	B→ 0.6 mm, A→ 0.7 mm, B’→ 0.5 mm
9	6.30	0.7	C (0.1 mm), A’→ 0.3 mm, A→ 1.2 mm, D (0.2 mm), B’→ 1.2 mm, Yeni C’ çatlağı (<0.1 mm)
10	7.20	0.8	A’→ 0.5 mm, A→ 1.3 mm, D→ 0.5 mm, yeni çatlaklar: E (0.1 mm), F (0.2 mm), D’ (0.1 mm), B’ → 1.0 mm. Kolon-temel birleşiminde kırılmalar.
11	9.00	1	G çatlağı (0.1 mm) ve beton ezilmesi (piston tarafı). C→ 0.8 mm, B→ 1.3 mm. E’ oluştu (<0.1 mm). A’ → 0.7 mm. H çatlağı (0.2 mm). Arka yüzde F’, G’, H’ çatlakları oluştu (~0.1 mm).
12	13.50	1,5	I (0.2 mm) ve beton ezilmesi arttı (kolon-kiriş birleşimi). J çatlağı (kiriş alt yüzü, 0.2 mm). C→ 1.4 mm, K (0.3 mm), A’ çatlağı G ile birleşti. Arka yüzde: I’, J’, K’ (0.2 mm). L ve L’ çatlakları (kolon-kiriş açılma 1.1 mm). A–C’ hattı → 2.2 mm.
13	18.00	2	C→ 2.0 mm, K→ 1.1 mm. A’ hattı→ 2.0 mm. Yeni çatlaklar: M’, N’ (0.1 mm). A → 3.1 mm. Kolon yüzünde: P, M, N çatlakları (0.2 mm). L→ 2.0 mm. C’→ 2.7 mm, D’→ 1.7 mm, P’ (0.2 mm)
14	22.50	2.5	L→ 2.7 mm. C çatlağından kolon-kiriş ayrışması. K→ 2.7 mm. Temel-kolon birleşiminde beton ezilmesi. R çatlağı (1.2 mm), A→ 3.0 mm. Piston karşısı başlık ezilmesi.
15	27.00	3.0	K–K’ ve C–A’ hattında birleşim kırığı. I→ 3.0 mm. A, L, R ve simetrik çatlaklardan numune neredeyse tamamen kırıldı.
16	31.50	3.5	Beton dökülmeleri, beton kırılmaları, donatıların açığa çıkması, donatı akması gözlendi.
17	36.00	4.0	Yük %80 altına düştü. Deney sonlandırıldı.
18	40.50	4.5	-
19	45.00	5.0	-

15. Çevrim çekme adımında mevcut A, L ve R çatlakları ile numunenin arka yüzündeki simetrik çatlaklar olan C', B' ve L' çatlaklarından numune iyice kırıldı.

16. Çevrimde deneye devam edilerek kolon-kiriş birleşim bölgeleri ile temel-kolon birleşimlerinden numunenin iyice hasar alması sağlandı.

Aynı çevrim itme ve çekme adımlarında beton dökülmeleri, beton kırılmaları, donatıların açığa çıkması ve donatı akması gibi durumlar izlendi. Kolonların temel bağlantılarında mafsallaşma oluştu.

17. Çevrimde ise hem itme hem de çekme adımlarında numuneye yatay olarak etkitilen maksimum yükün %85'inin altına düşüldüğü için deneye son verilmiştir.

Numuneye ait deney sonu hasar durumunu gösteren resimler Şekil 4.3'te, çatlak oluşumunun şematik olarak çizimi ise Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çıplak çerçeve numunesi deneyi süresince yukarıda anlatılan ve gözle izlenip kaydedilen önemli olaylar (çatlak oluşumu, hasar durumu vs.) Tablo 4.1'de her çevrim için ayrı ayrı özetlenmiştir.

4.1.2. Dolgu Duvarlı Çerçeve Deneyi

Deney sürecinde numunede meydana gelen önemli olaylar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

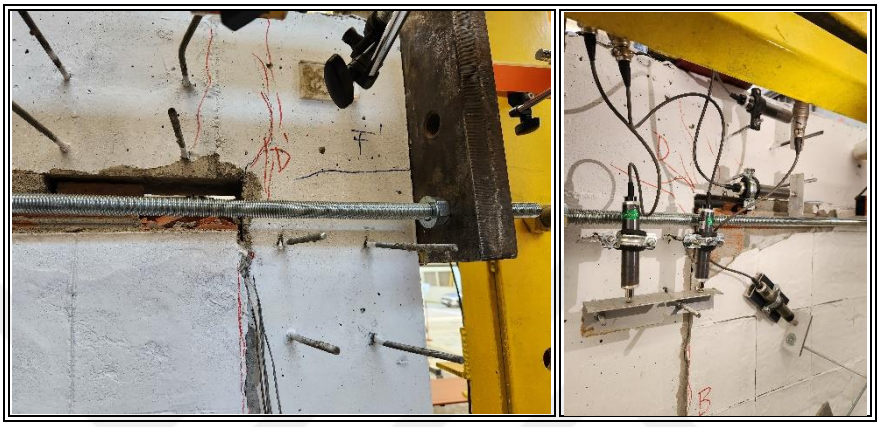


Şekil 4.5: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deney düzeneği

Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deneyinde ilk çatlak 3. Çevrimde, çekme adımında, kolon-duvar birleşim bölgelerinde (düşeyde) çatlamalar ve ayrılmalar şeklinde başladı. Aynı çevrimde

numunenin arka yüzünde de benzer şekilde duvar ve kolon arasında çok ince çatlama ve ayrılmalar gözlemlendi.

4. Çevrim çekme adımında ön yüzde her iki kolonun duvarla birleştiği yerde A ve B çatlakları oluştu, çatlak genişlikleri 0,2 mm olarak ölçüldü. Aynı çevrimde arka yüzde ön yüzdeki çatlaklara simetrik olacak şekilde A'-B' çatlağı meydana geldi ve çatlak genişliği ön yüzdeki çatlaklarla aynı genişlikte, 0,2 mm olarak kaydedildi.



Şekil 4.6: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinde ilk çevrimlerde oluşan çatlaklar.

5. Çevrim itme adımında numunenin her iki yüzünde görülen kiriş-duvar birleşiminde C ve C' çatlakları (duvar-kiriş ayrışması) oluştu. Ön yüzdeki mevcut A-B çatlakları ile arka yüzdeki mevcut A'-B' çatlakları genişleyerek 0,4 mm'ye ulaştı.

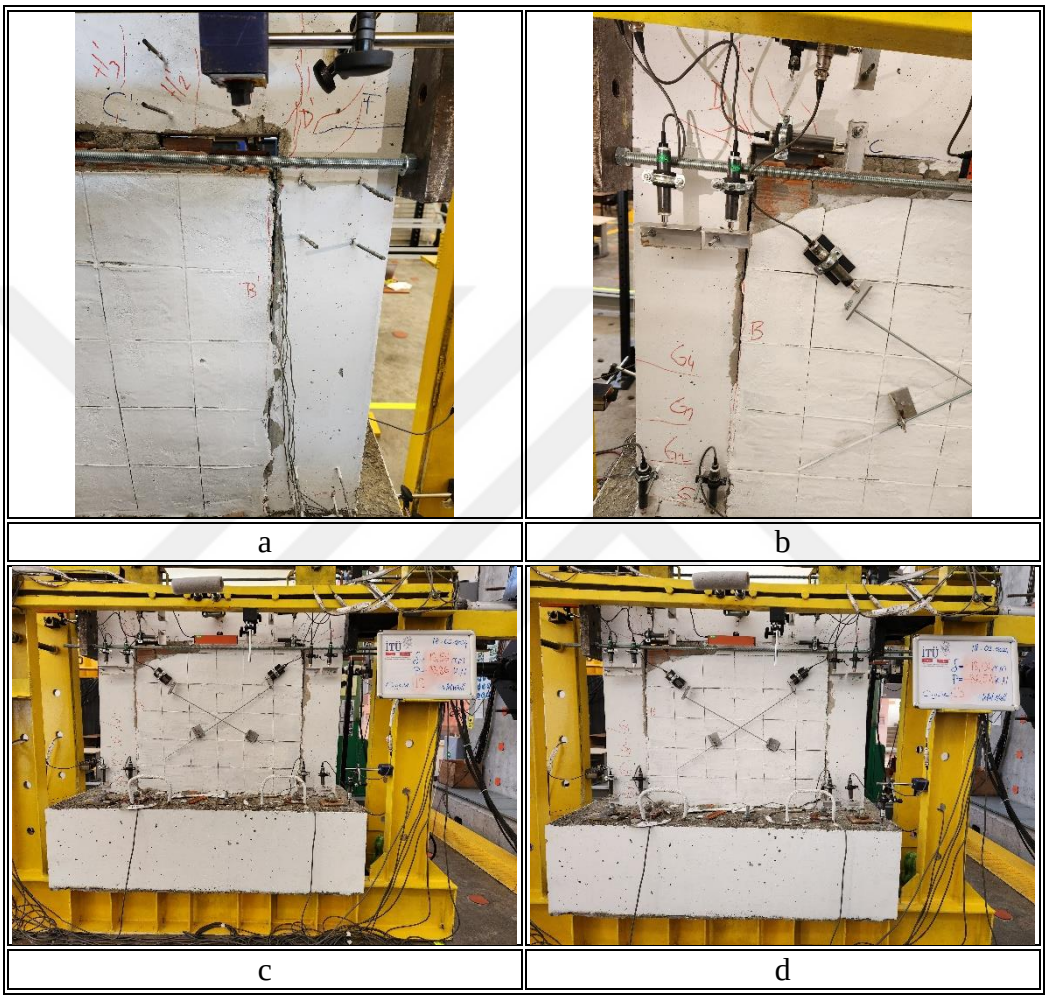
6. Çevrim itme adımında ön yüzde B ve arka yüzdeki B' düşey hattı (kolon-duvar birleşimi) genişleyerek 1,2 mm oldu.

6. Çevrim çekme adımında B-B' hattı (kolon-duvar birleşimi) genişleyerek 1,8 mm'ye ulaştı. Boya dökülmeleri gözlemlendi. Aynı adımda numunenin ön yüzünde D çatlağı ile arka yüzde D' çatlakları oluştu ve genişliği 0,1 mm olarak ölçüldü.

7. Çevrim itme adımında birleşim bölgelerinden (duvar-taşıyıcı sistem) sıva dökülmeleri başladı. Ön yüzde piston tarafındaki köşede E çatlağı oluştu (0,2 mm), mevcut diğer çatlaklar genişleyip ilerledi. Arka yüzde aynı çevrimde E çatlağının izdüşümünde E' çatlağı oluştu ve 0,6 mm olarak ölçüldü.

7. Çevrim çekme adımında numunenin ön yüzündeki mevcut D çatlakları ilerlemeye başladı. Arka yüzde ise aynı durumdaki mevcut D' çatlaklarının ön yüzdeki D çatlaklarıyla paralel düzeyde ilerlediği gözlemlendi.

8. Çevrim itme adımında ön yüzdeki mevcut E çatlakları kolon-kiriş birleşim bölgesine doğru yayıldı. Piston tarafındaki kolon-duvar birleşimi temele doğru düşeyde gözle görülür bir şekilde iyice ayrılmaya başladı. Numunenin arka yüzünde ise E' çatlağı aynı şekilde ilerleyerek genişliği 1,0 mm'ye ulaştı. Kiriş-duvar birleşiminden (C' hattı) sıva dökülmeleri başladı ve kolon-duvar birleşimindeki B' çatlağından duvar kolondan ayrıldı.



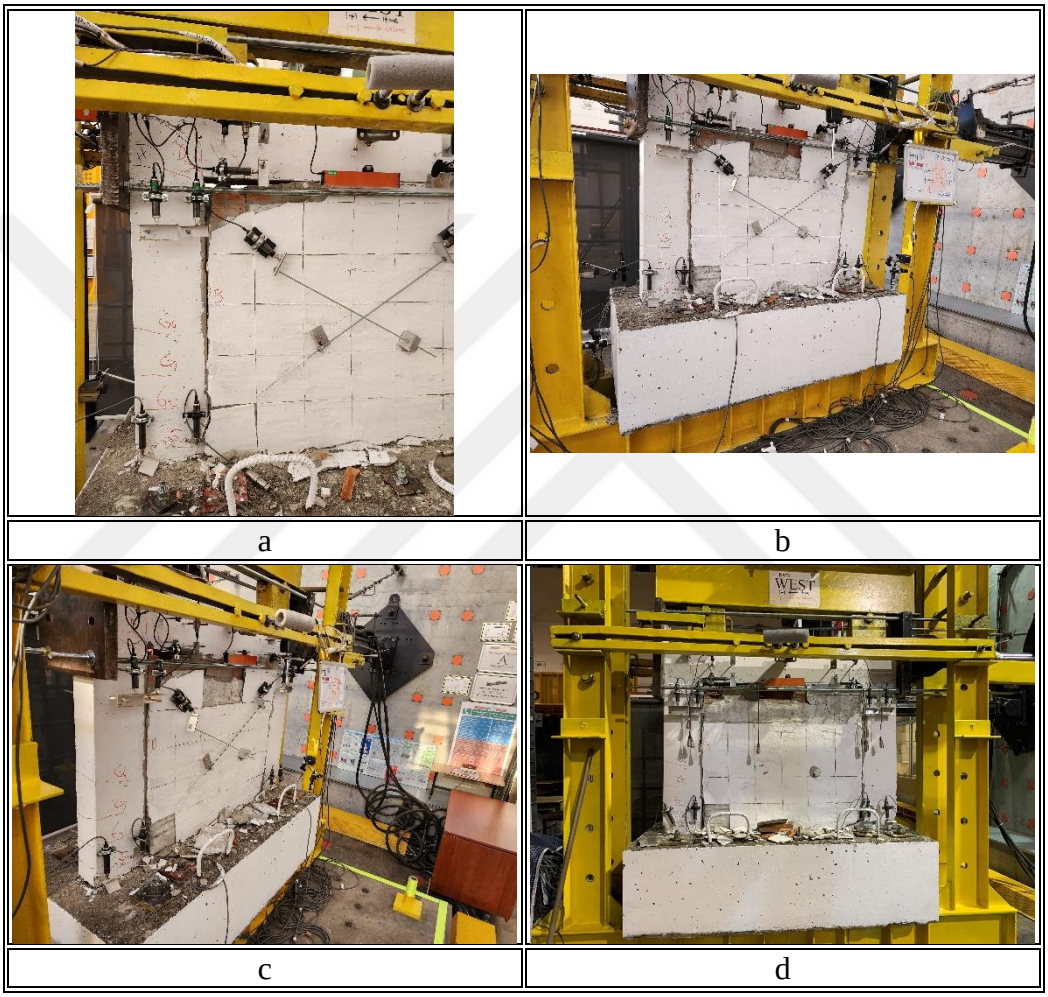
Şekil 4.7: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinin ilerleyen çevrimlerdeki hasar durumu.

8. Çevrim çekme adımında ön yüzdeki A çatlağından duvar kolondan tamamen ayrıldı. D çatlakları dallanarak ilerlemeye devam etti. Arka yüzde A' çatlağı boyunca duvar ve kolonun tamamen ayrıldığı gözlemlendi, B' deki kolon-duvar hattı da bu adımda ayrışmaların iyice büyüdüğü görüldü.

9. Çevrim itme adımında ön yüzdeki B-C ile arka yüzdeki B'-C' çatlakları birleşimindeki sıva döküldü ve tuğlalar ezilmeye başladı.

9. Çevrim çekme adımında ön ve arka yüzlerdeki D ve D’ çatlakları genişlemeye ve ilerlemeye devam etti. Ön yüzdeki B-C ve arka yüzdeki B'-C' hattı birleşimindeki sıvalar döküldü. Bu hatta beton-duvar ayrışması belirginleşti.

10. Çevrim itme adımında arka yüzde pistonun karşısındaki kolonda F' çatlağı oluştu ve 0,3 mm olarak ölçüldü. Aynı adımda B-C çatlaklarının birleşim yerindeki tuğlaların kırılmasıyla pistonun karşı köşesi tamamen boşaldı.

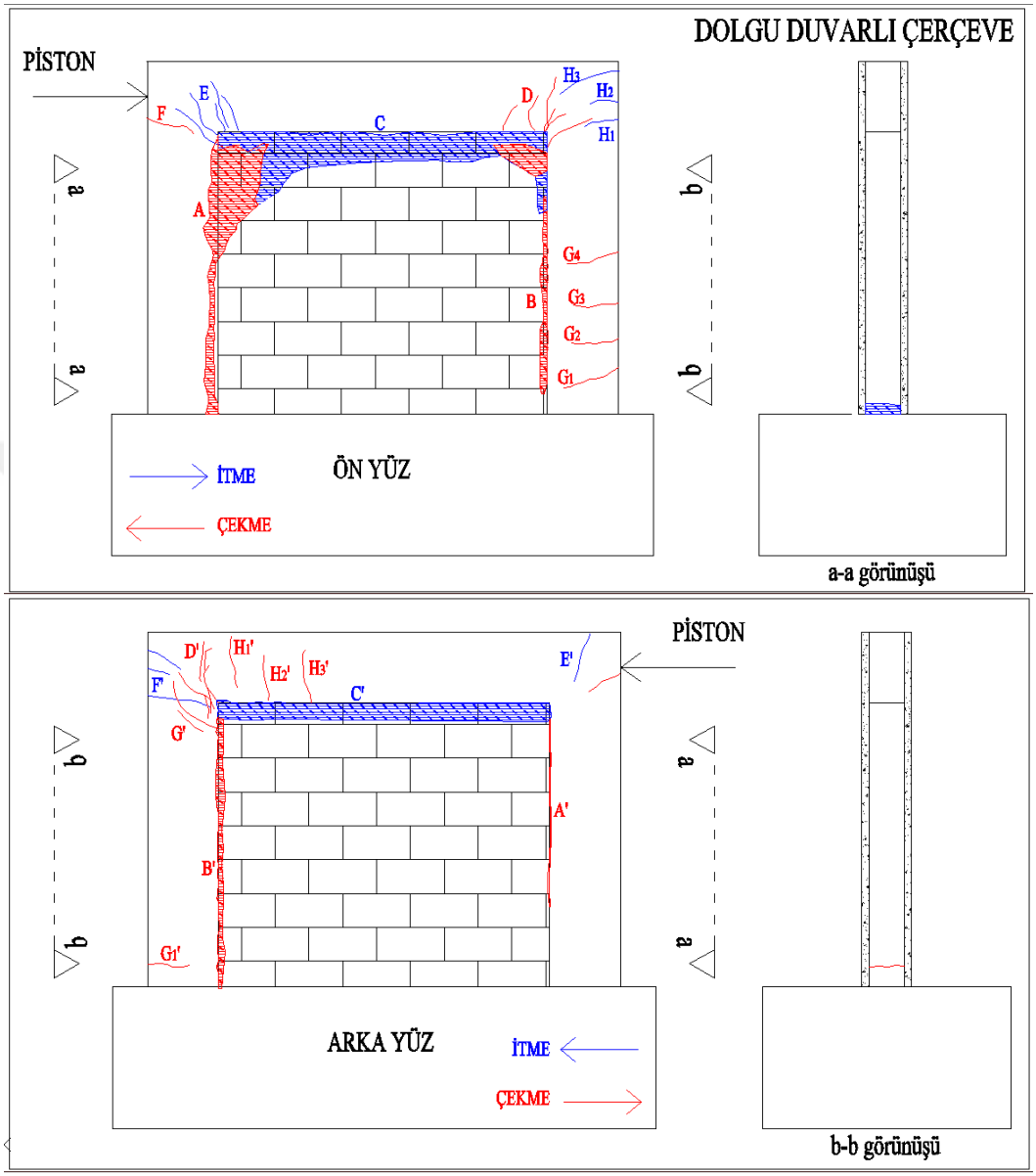


Şekil 4.8: Dolgu duvarlı çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu.

11. Çevrim çekme adımında numunenin ön yüzünde kolon yatay donatılarının hizalarında G çatlakları (G1, G2, G3 ve G4) oluştu, kolon arkasında ve yüzeyinde ilerledi. Genişliği 0,2 mm olarak ölçüldü. Arka yüzde ise kiriş alt yüzünde, kirişin etriye donatıları hizasında H' (H1, H2 ve H3) 0,1 mm genişliğinde çatlaklar oluştu.

12. Çevrim itmede numunenin ön yüzünde pistonun karşı köşesindeki kolon-kiriş birleşim bölgesi yüzeyinde 0,2 mm genişliğinde H çatlakları (H1, H2 ve H3) oluştu. Betonarme – tuğla

duvar birleşimleri iyice ayrıştı. Duvar, betonarmeden iyice ayrıldı. Duvar yüzeyindeki sıvalar ve numune boyası yer yer döküldü.



Şekil 4.9: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi.

13. Çevrim itme ve çekme adımlarında numune yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde kaybetmeye başladı.

14. Çevrim itme adımında ise piston tarafındaki kolon-temel birleşimi kırıldı. Tuğla duvar, taşıyıcı sistemden ayrıldı. Kolon-Kiriş birleşimleri iyice açıldı.

14. Çevrim çekme adımı sonunda, numuneye etkitilen maksimum yatay yükün %80 altına düştüğü için deney sonlandırılmıştır. Numuneye ait deney sonu hasar durumunu gösteren resimler Şekil 4.8'de, çatlak oluşumunun şematik olarak çizimi ise Şekil 4.9'da verilmiştir.

Dolgu duvarlı çerçeve numunesi deneyi süresince meydana gelen ve kaydedilebilen önemli olaylar (çatlak oluşumu, hasar durumu vs.) Tablo 4.2'de her çevrim için ayrı ayrı özetlenmiştir.

Tablo 4.2: Dolgu duvarlı BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar.

Çevrim No	Tepe Yer Değiştirme (mm)	Kat Göreli Öteleme (%)	Olaylar, Çatlaklar ve Gözlemler
1	0.27	0.03	Belirgin gözlem yok
2	0.54	0.06	Belirgin gözlem yok
3	0.90	0.10	Kolon-duvar birleşiminde ayrılma (ön/arka, ince)
4	1.80	0.20	A ve B çatlakları (ön yüz, 0.2 mm); A', B' çatlakları (arka yüz, 0.2 mm)
5	2.70	0.30	C ve C' çatlakları (duvar-kiriş ayrışması); A–A', B–B' çatlakları → 0.4 mm
6	3.60	0.40	B–B' hattı → 1.2 mm (itme), → 1.8 mm (çekme); boya dökülmeleri, D ve D' (0.1 mm)
7	4.50	0.50	Sıva dökülmeleri (duvar-taşıyıcı sistem birleşim hattı); E (ön yüz, 0.2 mm) ve E' (arka yüz, 0.6 mm); D–D' çatlakları ilerledi
8	5.40	0.60	E/E' çatlakları kolon-kiriş bölgesine doğru ilerledi, B' çatlağından duvar ayrıldı, C' hattından sıva döküldü; A'dan duvar tamamen ayrıldı, A' ve B' hattı boyunca tam ayrışma
9	6.30	0.70	B–C ve B'–C' çatlaklarında sıva dökülmesi, tuğla ezilmesi; D–D' çatlakları ilerlemeye devam etti
10	7.20	0.80	F' çatlağı (arka yüz, 0.3 mm); B–C çatlakları birleşiminde tuğla kırılması → piston karşı köşe boşaldı
11	9.00	1.00	G çatlakları (ön yüzde, kolon yatay donatı hizası, G1–G4, 0.2 mm); H' çatlakları (arka yüzde, kiriş etriye hizası, H1–H3, 0.1 mm)
12	13.50	1.50	H çatlakları (ön yüzde, piston karşı köşe, H1–H3, 0.2 mm); Duvar-betonarme birleşimi ayrıldı; sıva ve boya dökülmesi
13	18.00	2.00	Yük taşıma kapasitesinde belirgin düşüş (itme/çekme)
14	22.50	2.50	Kolon-temel birleşimi kırıldı (piston tarafı), tuğla duvar taşıyıcı sistemden tamamen ayrıldı; kolon-kiriş birleşimleri açıldı; çekme adımında yatay yük %85'in altına düştü → deney sonlandırıldı
15	27.00	3.00	-
16	31.50	3.50	-
17	36.00	4.00	-
18	40.50	4.50	-
19	45.00	5.00	-

4.1.3. AR-2-2-A Kodlu Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi

Deney sürecinde numunede meydana gelen önemli olaylar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

AR-2-2-A çerçeve deneyinde ilk çatlak 6. Çevrim çekme adımında belirlendi. Pistonun karşı köşesindeki kolon-kiriş birleşiminde beliren A çatlakları 0,2 mm olarak ölçüldü ve duvar-beton birleşim yerlerinde yavaş yavaş ayrışma başladı. Numunenin arka yüzünde A çatlağının izdüşümü olarak A' oluştu ve aynı genişlikte ölçüldü.



Şekil 4.10: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi deney düzeneği.

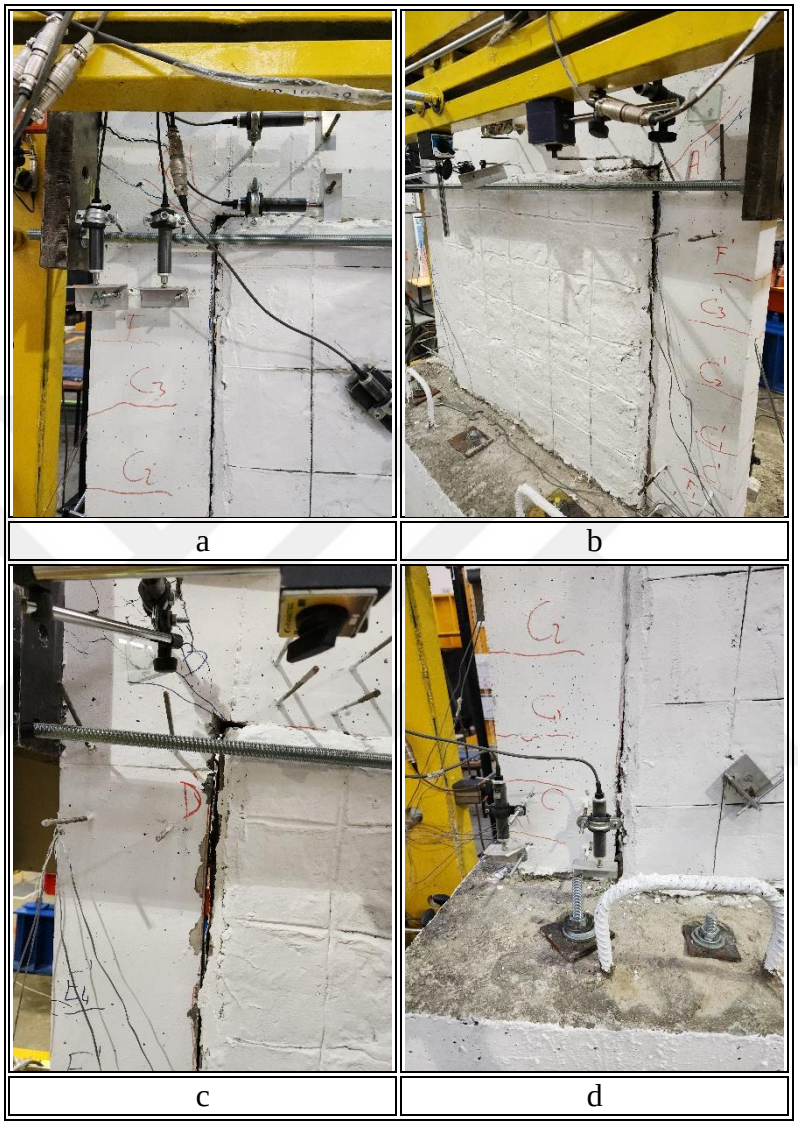
7. Çevrim itmede numuneden çatırtı sesleri gelmeye başladı. Beton-tuğla birleşim yerlerinde sıva, boya dökülmeleri görüldü. Piston tarafındaki köşede numunenin ön yüzünde B, arka yüzünde ise B' çatlağı oluştu ve genişliği 0,1 mm'den küçük olarak ölçüldü.

7. Çevrim çekmede pistonun karşı kolonunda numunenin ön yüzde C çatlakları (C, C1, C2, ve C3) ve çatlaklar kolonun dış yüzünde de devam ederek arka yüzünde C' çatlakları (C', C1', C2' ve C3') olarak belirdi. Bu çatlakların, kolonların sargı donatısı hizasında olduğu görüldü ve genişliği 0,1 mm olarak ölçüldü. Güçlendirilmiş duvar, kolon ve kirişten ayrılmaya başladı. Bu ayrışma piston tarafındaki kolon-duvar ve kiriş-duvar olarak görüldü. Ön yüzde bu ayrışmaya D, arka yüzde ise D' olarak işaretlendi. A ve A' çatlağı hattı 0,3 mm genişliğe ulaştı.

8. Çevrimde deney boyunca numuneden çatırtı, kırılma ve kopma sesleri gelmiştir.

9. Çevrim itme adımında, numunenin ön yüzünde ve piston tarafındaki kolonda E çatlakları (E1, E2, E3 ve E4) oluşmuştur. Bu çatlaklar kolonun dış yüzünden devam ederek arka yüzde de E' (E1', E2', E3' ve E4') çatlakları olarak belirmiştir. E ve E' çatlakları kolonun sargı

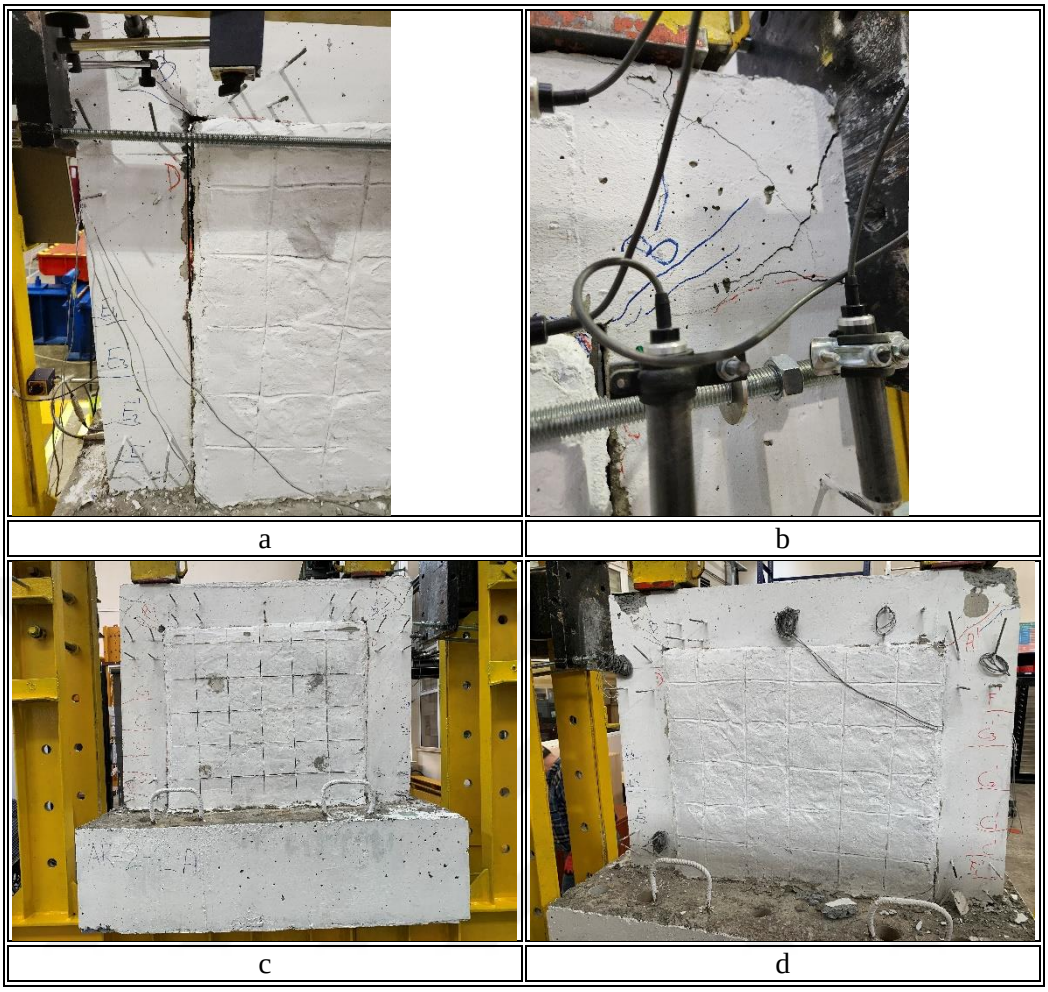
donatısı hizasında olduğu görülmüş ve 0,1 mm'den küçük olarak ölçülmüştür. B çatlağı 0,2 mm'ye genişlediği görüldü. A-A' çatlağı hattındaki köşeden kolon-kiriş birleşiminde gözle görülür boşluk (tuğlaların ezilmesi sonucu) oluşmuştur.



Şekil 4.11: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesinde oluşan çatlaklar.

9. Çevrim çekme adımında mevcut C çatlarının altında ve üstünde sırasıyla F1 ve F çatlağı oluşmuştur. Aynı çatlaklar arka yüzde de görülmüş (F1', F') ve işaretlenmiştir. Bu çatlakların genişliği 0,1 mm olarak ölçüldü. A-A' çatlağı hattı iyice ilerledi ve köşede ayrışma belirginleşti. C ve C' çatlakları 0,3 mm olarak ölçüldü ve belirgin hale geldiği görüldü.

10. Çevrim itmede ön yüzdeki B çatlağı ile arka yüzdeki B' çatlağı 0,7 mm olarak ölçüldü. A – A' çatlaklarının olduğu köşede duvarda tuğlaların kırılması nedeniyle boşluklar oluştu. Duvar – betonarme birleşimleri iyice açıldı. Birleşim yerlerinden sıva ve boya dökülmeleri görüldü.



Şekil 4.12: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu.

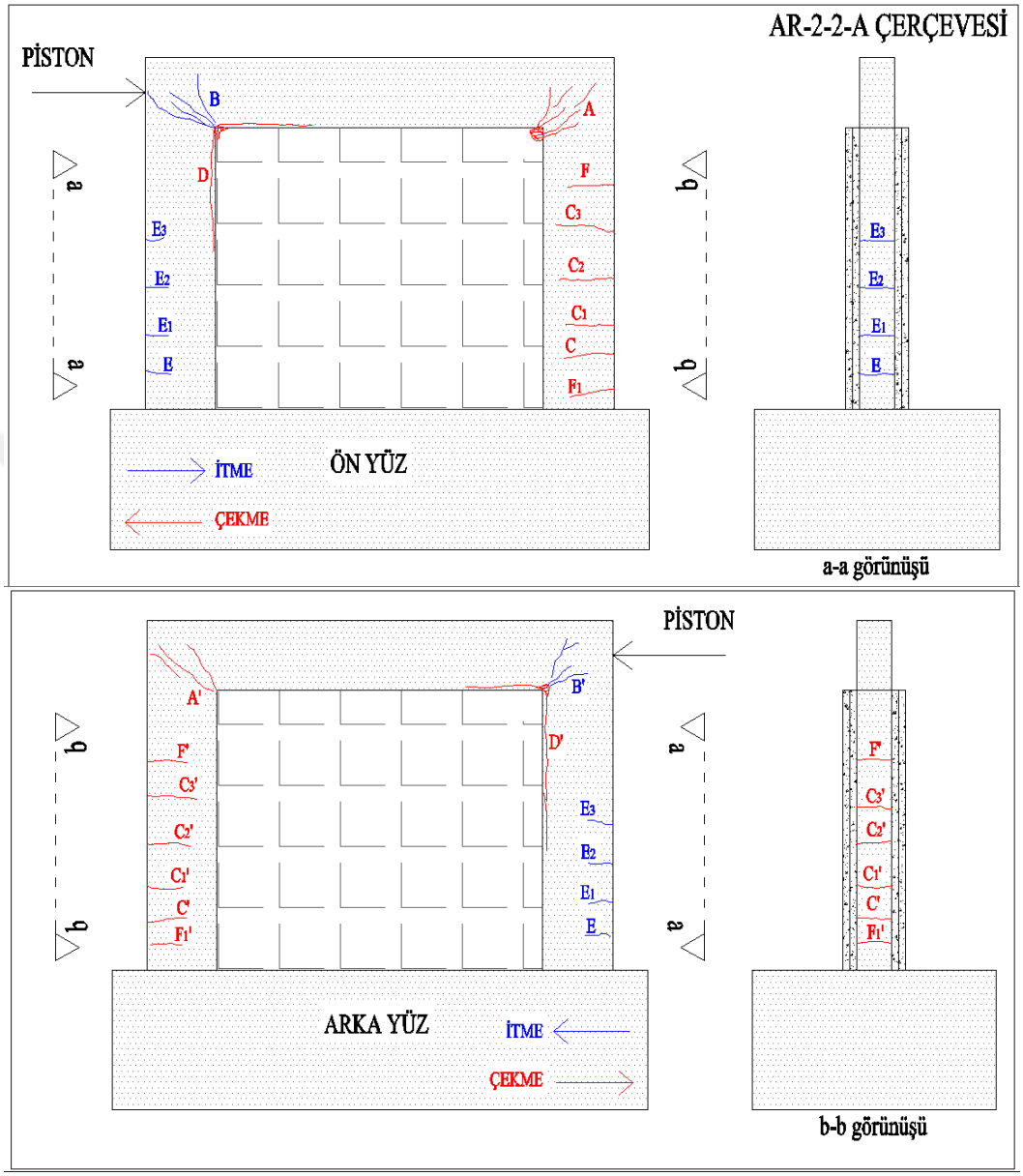
10. Çevrim çekme adımında D-D' çatlakları hattından duvar- taşıyıcı sistem birbirinden iyice ayrıldı. B-B' köşesinde tuğla kırılmaları devam ederek, köşede boşluklar iyice büyüdü.

11. Çevrim itmede mevcut B ve B' çatlakları ilerledi ve 1,5 mm'ye kadar genişledi. Güçlendirilmiş duvar, pistonun karşı köşesindeki çatlaktan itibaren kolon ve kirişten tamamen ayrıldı. Çevrim boyunca numuneden kopma, kırılma sesleri gelmiştir. Mevcut E ve E' çatlakları genişleyerek 0,6 mm oldu.

11. Çevrim çekmede piston köşesinden (D-D' çatlağı hattından) itibaren duvar taşıyıcı sistemden iyice ayrıştı. A-A' çatlakları ilerledi, genişleyerek 2,0 mm'ye ulaştı. Numunenin önemli oranda hasar aldığı görüldü. Numunenin ön yüzündeki mevcut C, F çatlakları ile arka yüzdeki C' ve F' çatlakları 0,6 mm'ye ulaştı.

12. Çevrim itmede mevcut B ve B' çatlakları 2,5 mm olarak ölçüldü. Duvar ve betonarme sistem birbirinden ayrı olarak hareket etmeye başladı. E ve E' çatlakları 0,8 mm olarak ölçüldü.

12. Çevrim çekme adımında duvar numuneden tamamen ayrıldı ve çerçeveden ayrıştı. Çerçevenin yük taşıma kapasitesinde azalma artmaya başladı.



Şekil 4.13: AR-2-2-A çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi.

13. Çevrim hem itme hem de çekme adımlarında kolon-kiriş birleşim yerleri sırasıyla B-B' ve A-A' çatlakları hattından büyük oranda ayrıştı. İtme adımında piston tarafındaki kolon ile temel birleşiminde beton kırılmaları meydana geldi ve kolon dibinde beton örtüsü kırılarak donatılar görüldü.

14. Çevrim itmede duvar numuneden tamamen ayrılmıştır. Duvar çerçeve dışına çıkmıştır ve numune tamamen hasar almıştır. Kolon diplerinde ve birleşim yerlerinde kırılmalar ve kırılmalar dolayısıyla plastik mafsallaşmalar meydana geldi.

Tablo 4.3: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar.

Çevrim No	Tepe Yer Değiştirme (mm)	Kat Göreli Öteleme Yüzdesi (%)	Oluşan Çatlaklar ve Genişlikleri (mm)
1	0.27	0.03	Belirgin gözlem yok
2	0.54	0.06	Belirgin gözlem yok
3	0.90	0.1	Belirgin gözlem yok
4	1.80	0.2	Belirgin gözlem yok
5	2.70	0.3	Belirgin gözlem yok
6	3.60	0.4	A-A′ çatlakları oluştu (0.2 mm), Birleşim yerlerinde ayrışma başladı.
7	4.50	0.5	B-B′ çatlakları oluştu (0.1 mm) Sıva dökülmeleri görüldü C-C′ çatlakları belirdi (0.1 mm) A-A′ → 0.3 mm
8	5.40	0.6	Numuneden sesler geldi D-D′ çatlağı boyunca ayrışma
9	6.30	0.7	E-E′ çatlakları oluştu (0.1 mm) B-B′ → 0.2 mm F-F′ çatlakları oluştu C-C′ → birleşti
10	7.20	0.8	B-B′ → 0.7 mm A-A′ köşesinde ezilme ve sıva dökülmeleri D-D′ çatlakları ilerledi
11	9.00	1	B-B′ → 1.5 mm A-A′ → 2.0 mm C, F ve simetrik çatlaklar → 0.6 mm Duvar taşıyıcıdan ayrıldı
12	13.50	1,5	B-B′ → 2.5 mm E-E′ → 0.8 mm Duvar tamamen ayrıldı → taşıyıcıdan kopma gözlendi
13	18.00	2	A-A′ ve B-B′ hattında birleşim ayrıldı Kolon-temel bölgesinde beton örtüsü kırıldı
14	22.50	2.5	Duvar tamamen ayrıldı çerçeve dışına çıktı Kolon-kiriş birleşimlerinde plastikleşme başladı
15	27.00	3.0	Yük taşıma kapasitesi kaybedildi → deney sonlandırıldı
16	31.50	3.5	-
17	36.00	4.0	-
18	40.50	4.5	-
19	45.00	5.0	-

14. Çevrim çekmede çerçeve yük taşıma kapasitesini büyük oranda kaybetmiştir. Duvar çerçeveden ayrılmış ve çerçeve dışına çıkmıştır. Kolon dipleri kırılmış ve pistonun bastığı ve

çektiği başlıklarda kırılmalar ve beton ezilmeleri meydana geldi. Kolon kiriş birleşimleri tamamen plastikleşmiştir.

15. Çevrimde her iki adımda da çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini büyük oranda kaybettiği görüldüğü için deney sonlandırılmıştır.

Numunenin betonarme çerçevesinde oldukça büyük hasarlar olmasına karşın güçlendirilmiş duvar yüzeyinde deney boyunca herhangi bir çatlak veya hasar kaydedilmemiştir.

Numuneye ait deney sonu hasar durumunu gösteren resimler Şekil 4.12'de, çatlak oluşumunun şematik olarak çizimi ise Şekil 4.13'te verilmiştir.

AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi deneyi süresince yukarıda detaylı olarak anlatılan ve gözle izlenip kaydedilebilen önemli olaylar ve gelişmeler (çatlak oluşumu, hasar durumu vs.) Tablo 4.3'te her çevrim için ayrı ayrı özetlenmiştir.

4.1.4. AR-2-4-A Kodlu Güçlendirilmiş Çerçeve Deneyi



Şekil 4.14: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi deney düzeneği

AR-2-4-A Çerçeve deneyinde ilk çatlak 5. Çevrim itme adımında piston tarafındaki köşede A çatlağı 0,1 mm genişliğinde oluştu. Aynı çatlak numunenin arka yüzünde de görüldü. Çatlak genişliği aynı olduğu görüldü ve A' çatlağı olarak işaretlendi. Pistonun karşı köşesinde kolon-kiriş ve duvar ayrışması olarak B çatlağı meydana geldi. B çatlağının karşı tarafında, numunenin arka yüzünde de duvar ayrışmasından kaynaklı B' çatlağı görüldü. Güçlendirilmiş duvarın, itme adımından itibaren B – B' hattından betonarmeden ayrışmasının başladığı görüldü.

5. Çevrim çekme adımında, pistonun karşı köşesinde kolon-kiriş birleşim bölgesinde numunenin ön yüzünde C çatlağı, arka yüzünde ise ön yüzdeki çatlağın izdüşümü olarak C' çatlağı oluştu ve çatlak genişlikleri 0,1 mm olarak ölçüldü. Piston tarafındaki köşeden kolon, kiriş ve duvar birleşiminde düşeyde ve yatayda ayrışma oldu ve D çatlağı olarak kodlandı. Ayrışma arka yüzde de görüldü ve D' olarak belirlendi.

6. Çevrim itmede numunenin her iki yüzündeki mevcut A ve A' çatlaklarında köşeye doğru ilerleme meydana geldi ve çatlak genişlikleri 0,2 mm oldu.

6. Çevrim çekme adımında mevcut D – D' (duvar – beton ayrışması) çatlaklarında ilerleme görüldü ve çatlak genişliği arttı.

7. Çevrim itmede numunenin ön yüzünde E (E1, E2, E3 ve E4) çatlakları oluştu, aynı çatlak kolonun dış yüzünde ve arka yüzde de belirdi. Arka yüzdeki çatlaklar da E' (E1', E2', E3' ve E4') olarak işaretlendi. Piston tarafındaki kolonun sargı donatılarının hizasında meydana gelen E ve E' çatlakları 0,1 mm'den küçük olarak ölçüldü. Pistonun karşı köşesindeki betonarme-duvar ayrışması (B – B' çatlağının olduğu ayrışma hattı) belirginleşti. Duvar ayrışmalarının olduğu hatlarda (B – B') çatlak genişliği 1,0 mm'yi geçti. Her iki yüzdeki mevcut A, A' çatlaklarının olduğu kolon-kiriş birleşimi açılıp genişledi ve genişlik 1,0 mm olarak ölçüldü. A – A' çatlakları hem genişledi hem de kirişin yüzünde dallandı ve A1 – A1' çatlakları olarak işaretlendi A1 – A1' çatlakları 0,2 mm olarak ölçüldü.

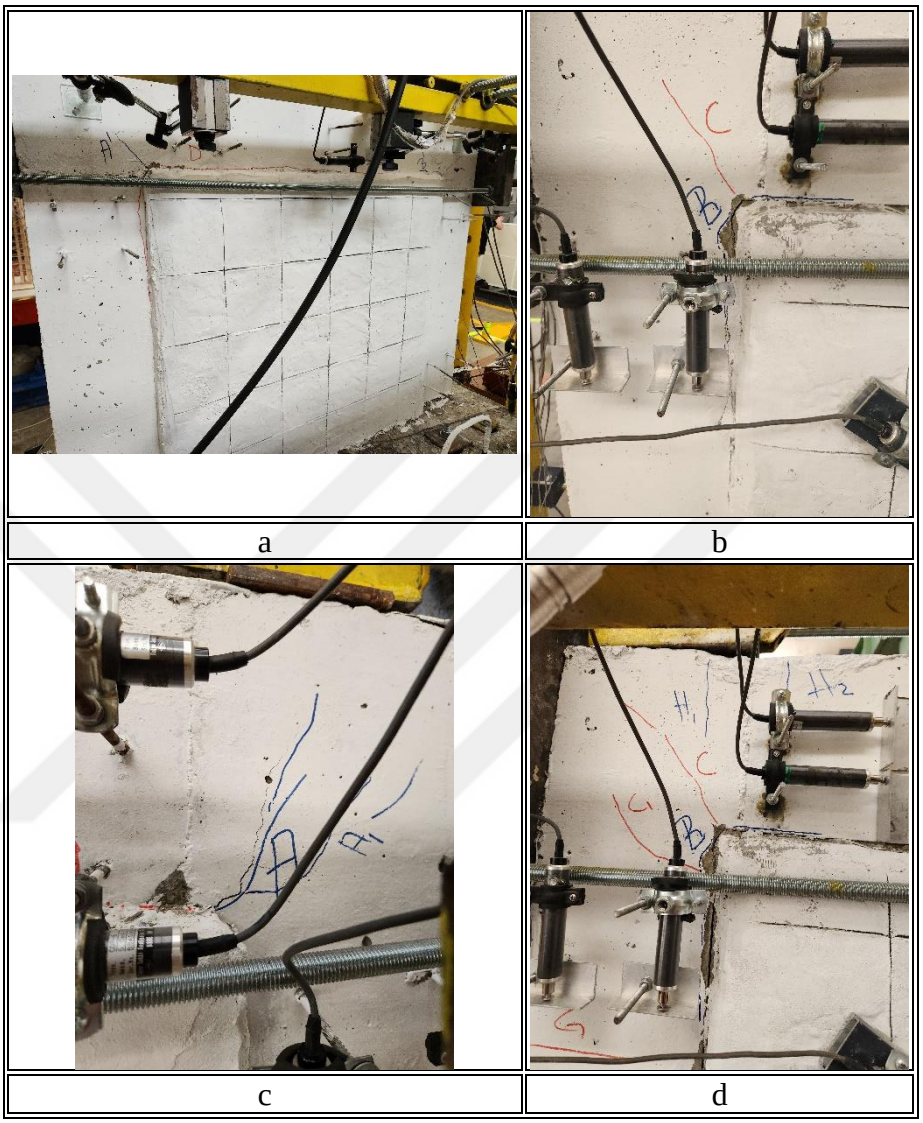
7. Çevrim çekmede pistonun karşı köşesindeki mevcut C – C' çatlakları genişledi 0,3 mm olarak ölçüldü. Duvar beton ayrışması (D – D') hattında ayrışma 1.0 mm olduğu görüldü.

8. Çevrim itmede numunenin ön yüzündeki mevcut A çatlağı ile arka yüzündeki izdüşümü olan A' çatlakları genişleyerek 1,4 mm oldu. Mevcut B – B' köşesinden duvar ve beton ayrışması iyice genişleyerek 2 mm'ye ulaştı ve köşe açılmaya başladı.

8. Çevrim çekmede pistonun karşı kolonunda ve kolon sargı donatıları doğrultusunda ön yüzde F (F1, F2, F3 ve F4), ön yüzdeki çatlaklar kolonun dışından devam ederek arka yüzde F' (F1', F2', F3' ve F4') çatlakları oluştu ve 0,1 mm olarak ölçüldü. Mevcut C ve C' çatlakları genişleyerek 0,3 mm oldu ve aynı zamanda çatlak dallanarak ön yüzde C1, arka yüzde C1' çatlağı ilavesi geldi. C1 ve C1' çatlakları 0,1 mm olarak okundu.

9. Çevrim itme adımında piston köşesindeki mevcut A ve A' çatlakları genişleyerek 2,00 mm'ye ulaştı ve kolon-kiriş ayrışması önemli oranda arttı. Duvar – betonarme ayrışması mevcut

B – B’ köşesinden yatayda ve düşeyde 2,5 mm’ye genişleyerek ayrıştı. Numuneden kopma ve ezilme sesleri geldi.



Şekil 4.15: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesinde 5. ve 6. çevrimlerde oluşan ilk çatlaklar.

9. Çevrim çekmede pistonun karşı kolonunda ve kolon sargı donatısı hizasında 0,1 mm genişliğinde G çatlağı oluştu ve kolon yüzünden arka yüze ulaştı. Arka yüzdeki çatlak G’ olarak işaretlendi ve genişliği 0,1 mm olarak okundu. Pistonun karşı köşesindeki mevcut C – C’ çatlakları 1,5 mm’ye genişledi ve kolon-kiriş ayrışması önemli oranda açıldı.

10. Çevrim itme adımında B – B’ çatlağı olarak işaretlenen duvar beton ayrışması yatayda ve düşeyde ilerledi ve genişledi. Ayrışma genişliği 3.0 mm olarak belirlendi. Ayrışma hattından sıva ve tuğla ezilmeleri dolayısıyla dökülmeler arttı.

10. Çevrim çekme adımında D – D’ köşesi boşaldı ve betonarme- duvar ayrışması 3,0 mm ye çıktı.

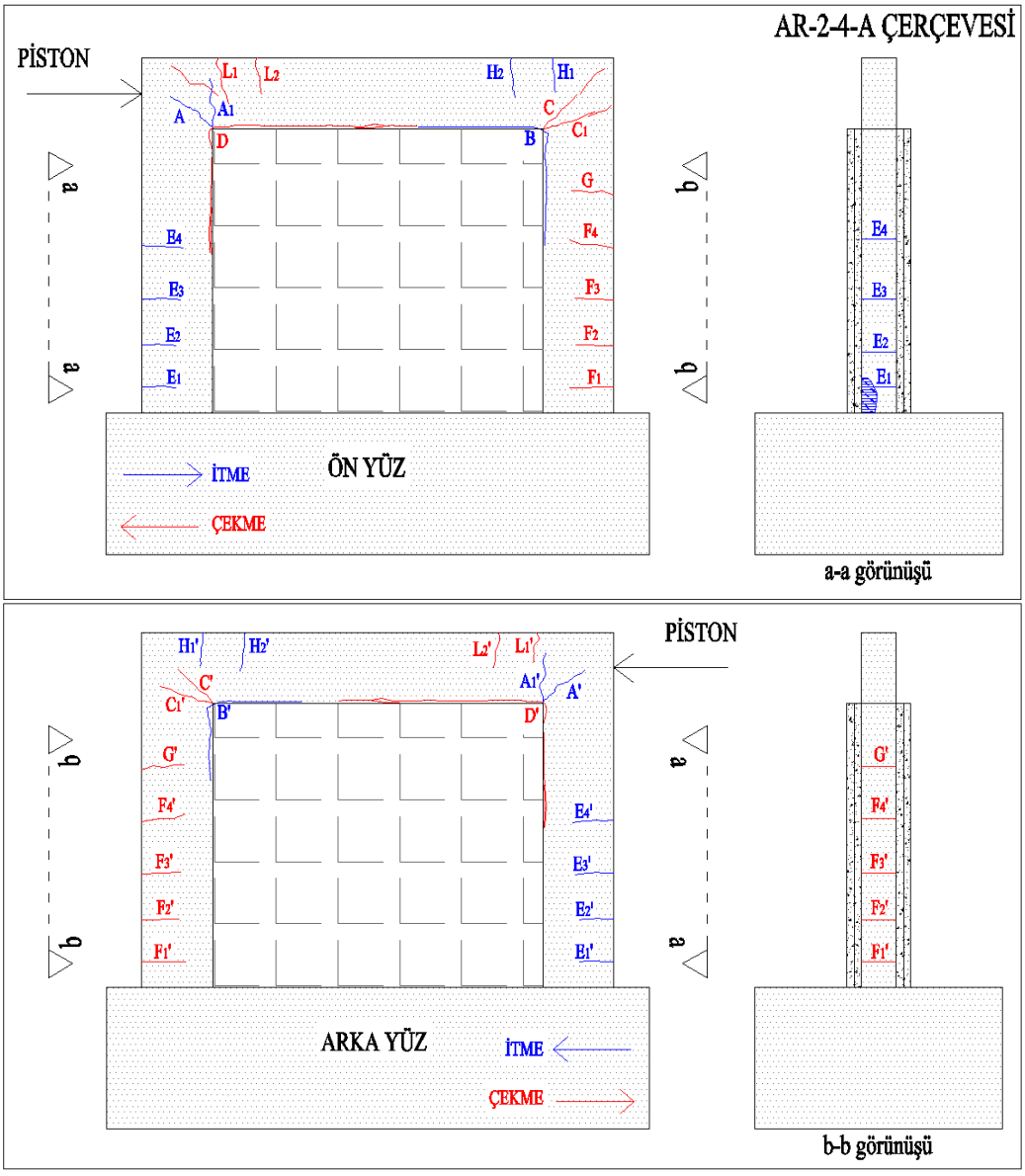


Şekil 4.16: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesinin deney sonu hasar durumu.

11. Çevrim itme adımında numunenin ön yüzünde pistonun karşı köşesinde, kirişin üst bölgesinde ve kiriş sargı donatısı hizasında H1 ve H2 çatlakları oluştu ve çatlak genişlikleri 0,1 mm olarak ölçüldü. Aynı çatlaklar kirişin üstünden devam ederek arka yüzde de olduğu görüldü (H1’, H2’) ve genişlik ön yüzdeki çatlaklarla aynı olarak (0,1 mm) okundu. Pistonun karşı köşesindeki B – B’ hattı doğrultusunda düşeyde kolon ve duvarın birbirinden tamamen ayrıştığı görüldü.

11. Çevrim çekme adımında piston tarafında kirişin üstünde ve etriye doğrultusunda L1 ve L2 çatlakları oluştu. Aynı çatlaklar kirişin üstünde ve arka yüzüne de devam etti (L1’ ve L2’). L1, L2, L1’ ve L2’ çatlaklarının genişlikleri 0,1 mm olarak ölçüldü. Piston tarafındaki köşe mevcut D-D’ çatlağı hattından iyice ayrıştı ve ayrışma genişliği 5.0 mm’nin üstüne çıktı.

12. Çevrim itme adımında ön yüzdeki mevcut A çatlağı ile aynı çatlağın simetriği olarak arka yüzde oluşan A' çatlakları genişleyerek 3.2 mm oldu. Kolon-kiriş ayrışması iyice belirginleşti. Mevcut D – D' çatlağının olduğu köşeden kolon ve duvar tamamen ayrıldı ve tuğlalarda kırılma meydana geldi.



Şekil 4.17: AR-2-4-A çerçeve numunesi deney sonu hasar durumu şematik çizimi.

12. Çevrim çekmede numunenin her iki yüzündeki mevcut çatlaklar iyice ilerledi ve genişledi. Her iki yüzde de C – C' çatlaklarının olduğu bölgelerde pas payı örtüsü dökülmeleri meydana geldi.

13. Çevrim itme adımında duvar – kolon birleşimi B köşesinden itibaren tamamen ayrıldı. A köşesindeki kolon-kiriş birleşimindeki çatlak genişliği 4.2 mm ye çıktı.

Tablo 4.4: AR-2-4-A kodlu BA çerçeve deneyinde meydana gelen önemli olaylar.

Çevrim No	Tepe Yer Değiştirme (mm)	Kat Göreli Öteleme Yüzdesi (%)	Oluşan Çatlaklar ve Genişlikleri (mm)
2	0.54	0.06	Belirgin gözlem yok
3	0.90	0.1	Belirgin gözlem yok
4	1.80	0.2	Belirgin gözlem yok
5	2.70	0.3	İlk çatlaklar; A ve A' (0.1 mm) B ve B' hattı (Duvar B-B' hattından ayrışma) C ve C' (0.1 mm) D ve D' (0.1 mm)
6	3.60	0.4	A-A' çatlakları (→0.2 mm) D-D' çatlakları ilerledi.
7	4.50	0.5	E ve E' çatlakları (<0.1 mm) A-A' (→1.0 mm) A1-A1' (0.2 mm) B-B' ayrışması →1.0 mm C-C' (→0.3 mm) D-D' ayrışması →1.0 mm.
8	5.40	0.6	A-A' çatlakları (→1.4 mm) B-B' ayrışması →2.0 mm F ve F' (0.1 mm) C1 ve C1' çatlakları eklendi (0.1 mm).
9	6.30	0.7	A-A' →2.0 mm B-B' ayrışması →2.5 mm, sesli ezilmeler G ve G' (0.1 mm) C-C' →1.5 mm
10	7.20	0.8	B-B' →3.0 mm D-D' ayrışması →3.0 mm Sıva ve tuğla dökülmeleri arttı.
11	9.00	1	H1-H2 ve H1'-H2' çatlakları oluştu (0.1 mm) B-B' ayrışması tam ayrılma seviyesine ulaştı L1-L2 ve L1'-L2' (0.1 mm) D-D' köşesi tamamen boşaldı (→5.0 mm)
12	13.50	1,5	A-A' →3.2 mm D-D' köşesi ayrıldı, tuğlalar kırıldı. C-C' bölgelerinde pas payı dökülmeleri
13	18.00	2	B köşesinden birleşim tamamen ayrıldı A köşesinde çatlak genişliği →4.2 mm Duvar-betonarme ayrışmaları el kalınlığına ulaştı
14	22.50	2.5	Duvar-çerçeve ayrışması tamamlandı Çatlaklar dallandı ve büyüdü Kolon-kiriş birleşimi kırıldı
15	27.00	3.0	Kopma ve kırılma sesleri duyuldu Plastik mafsallaşmalar oluştu Yük taşıma kapasitesi büyük oranda kaybedildi Deney sonlandırıldı.
16	31.50	3.5	-
17	36.00	4.0	-
18	40.50	4.5	-

13. Çevrim çekmede beton, mevcut çatlaklardan kırıldı. Duvar-betonarme ayrışmaları el kalınlığına ulaştı.

14. Çevrim itmede duvar ve taşıyıcı elemanlar tamamen ayrıldı. Duvar betonarme çerçeveden ayrı hareket etmeye başladı. Pistonun itip-çektiği bölgelerde çatlaklar dallandı ve genişledi.

14. Çevrim çekme adımında piston ve karşısındaki bölgelerde çatlaklar büyük oranda açıldı. Her iki uçtaki kolon-kiriş birleşimi tamamen kırıldı.

15. Çevrim itmede kopma ve kırılma sesleri geldi. Kolon-kiriş birleşimlerinde plastik mafsallaşmalar oluştu ve numunede yük aktarımı büyük oranda durdu.

15. Çevrim çekme adımında numunenin yük taşıma kapasitesi oldukça azaldı ve ulaşılan maksimum yatay yük seviyesinin oldukça altına indiği için deney sonlandırılmıştır.

Numunenin betonarme çerçevesinde oldukça büyük hasarlar olmasına karşın güçlendirilmiş duvar yüzeyinde deney süresince herhangi bir çatlak veya hasar oluşmamıştır.

Numuneye ait deney sonu hasar durumunu gösteren resimler Şekil 4.16'da, çatlak oluşumunun şematik olarak çizimi ise Şekil 4.17'de verilmiştir.

AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi deneyi süresince yukarıda detaylı olarak anlatılan ve gözle izlenip kaydedilebilen önemli olaylar ve gelişmeler (çatlak oluşumu, hasar durumu vs.) Tablo 4.4'te her çevrim için ayrı ayrı özetlenmiştir.

5. TARTIŞMA

Çerçeve deneylerinin bitmesi sonrasında deneysel sonuçlardan elde edilen parametreler kullanılarak numunelerle ilgili teknik detaylar çıkarılmaya çalışılmıştır. Bunlarla ilgili grafikler çizilmiş ve elde edilen grafikler yardımıyla numunelerin yapısal davranışları üzerinden değerlendirilmeye çalışılmıştır. Anlaşılacağı üzere deney sonunda her bir numunenin deneysel parametrelerinden yola çıkılarak yük-yer değiştirme ilişkisi ve zarf eğrileri çizilmiş, enerji tüketimleri belirlenmiş, yatay rijitlik değişimi matematiksel olarak gösterilmiş ve referans numuneleriyle karşılaştırılarak kendi aralarında değerlendirilmeye çalışılmıştır. Deneylerde çerçevelerin yatay rijitlik değişimlerini gösteren grafik, her çevrimin itme yönündeki en büyük taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirmesi noktalarını birleştiren doğrunun eğimi hesaplanarak elde edilmiştir. Çevrimler sırasında çerçeve tarafından tüketilen enerji ise taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirmesi eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanmasıyla bulunmuştur.

5.1. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

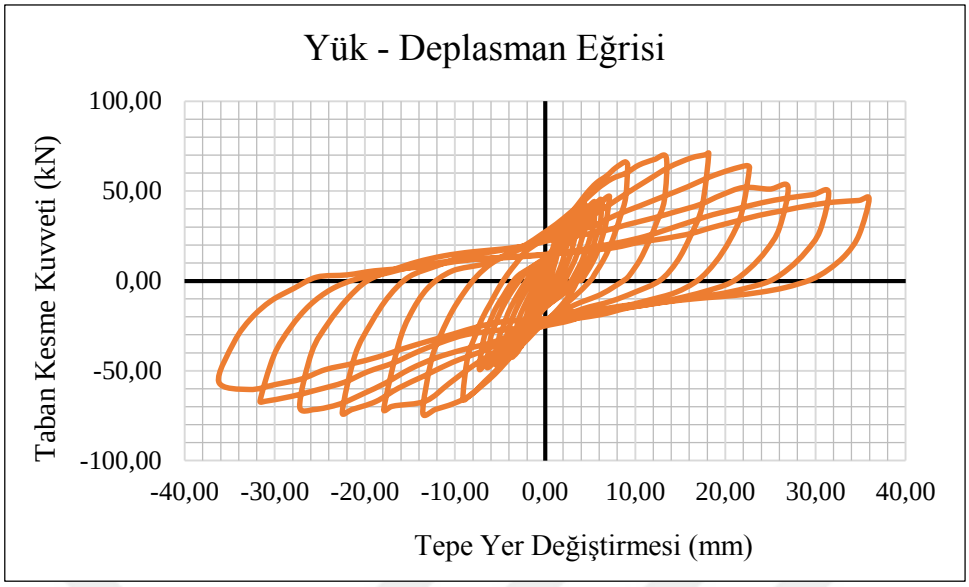
Deney sonuçlarının değerlendirilmesi deney sırasına göre yapılmıştır. Aşağıda öncelikle referans numuneleri (çıplak ve dolgu duvarlı çerçeveler) ile başlanıp akabinde TRCC ile güçlendirilen numunelerin (AR-2-2-A ve AR-2-4-A) deneysel sonuçları sırasıyla verilmiştir.

5.1.1. Çıplak Betonarme Çerçeve

Dolgu duvarsız betonarme çerçeve numunesinin statik deneyi, deney sırasında gözlemlenen önemli olaylar ve numune yüzeyinde meydana gelen çatlaklar Bölüm 4.1.1'de özetlenmiştir. Deney sonunda oluşan hasar durumu ise Şekil 4.3'te görsel olarak sunulmaktadır.

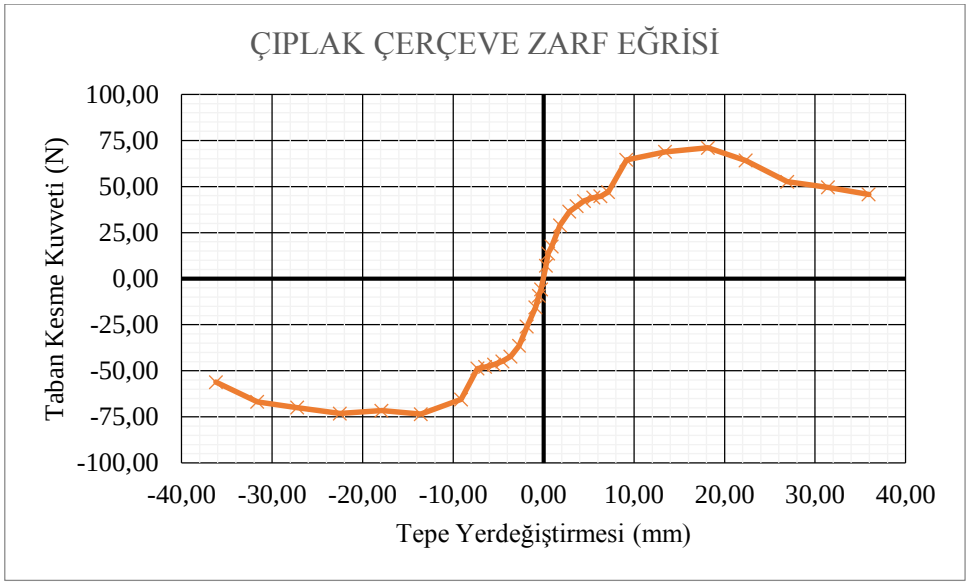
Ayrıca, Tablo 5.1'de bu numuneye ait toplam çevrim (cycle) sayısı, ulaşılan tepe yer değiştirmeleri ve bu yer değiştirmelere karşılık gelen yatay yük değerleri detaylı olarak verilmiştir. Her çevrim için hedeflenen tepe yer değiştirmesinin yanındaki parantez içine alınmış değerler deneysel süreçte numuneden alınan yer değiştirme değerleridir.

Tablodan da görüleceği üzere, bu deney toplam 17 çevrimlik statik bir yükleme prosedürü kapsamında gerçekleştirilmiştir. Maksimum tepe yer değiştirmesi 36,20 mm olarak ölçülmüştür. Numune, maksimum yatay yük değerine 12. çevrimde, itme yüklemesi sırasında, tepe yer değiştirmesi 13,56 mm iken ulaşmıştır. Bu maksimum yatay yük değeri 73,51 kN olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.1: Çıplak çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi.

Deney; 17. çevrimde uygulanan yatay yük değeri, maksimum yatay yükün %85'inin altına düştüğünden ve hasar durumu göz önünde bulundurulduğunda numunenin yük taşıma kapasitesini iyice kaybettiği görüldüğünden dolayı sonlandırılmıştır. Deney süresince, numunenin farklı bölgelerine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden (LVDT) alınan veriler kullanılarak, numunenin yatay yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 5.1'de, ayrıca numune zarf eğrisi ise Şekil 5.2'de sunulmuştur.

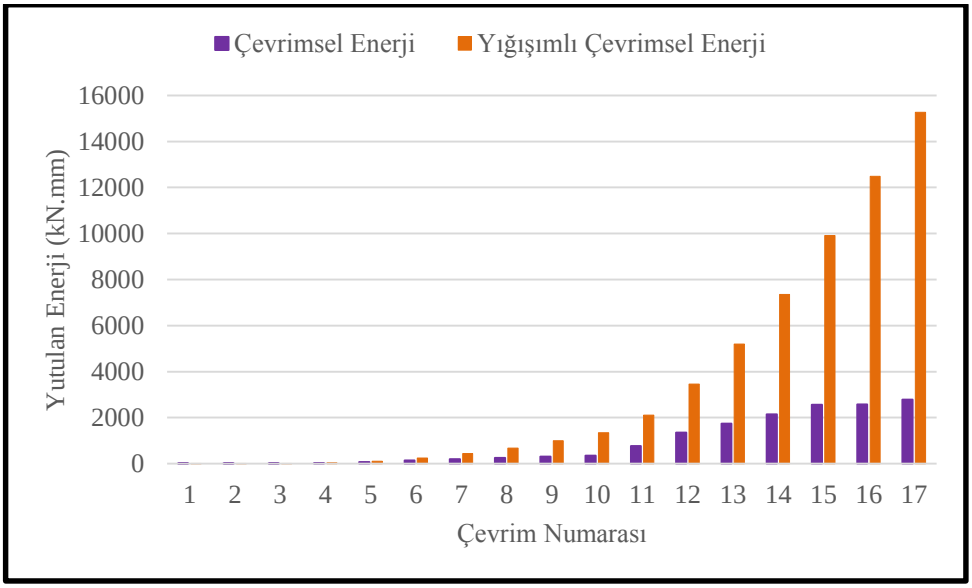


Şekil 5.2: Çıplak çerçeve numunesi zarf eğrisi.

Tablo 5.1: Çıplak BA çerçeve numunesi yükleme protokolü.

ÇIPLAK ÇERÇEVE				
ÇEVRİM NO	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (İTME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (ÇEKME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)
1	0,27 (0,26)	5,76	-0,27 (-0,26)	-7,01
2	0,54 (0,52)	9,29	-0,54 (-0,52)	-13,65
3	0,90 (0,92)	15,53	-0,90 (-0,90)	-17,43
4	1,80 (1,84)	26,03	-1,80 (-1,82)	-28,98
5	2,70 (2,70)	36,42	-2,70 (-2,86)	-36,46
6	3,60 (3,64)	42,26	-3,60 (-3,66)	-39,26
7	4,50 (4,54)	44,88	-4,50 (-4,48)	-42,19
8	5,40 (5,44)	46,55	-5,40 (-5,50)	-44,03
9	6,30 (6,46)	47,88	-6,30 (-6,30)	-44,64
10	7,20 (7,30)	48,79	-7,20 (-7,15)	-47,03
11	9,00 (9,10)	65,48	-9,00 (-9,16)	-64,51
12	13,50 (13,56)	73,51	-13,50 (-13,44)	-68,79
13	18,00 (17,90)	71,59	-18,00 (-18,16)	-70,97
14	22,50 (22,50)	70,19	-22,50 (-22,60)	-63,09
15	27,00 (27,50)	69,88	-27,00 (26,94)	-52,54
16	31,50 (31,62)	66,79	-31,50 (31,44)	-49,56
17	36,00 (36,20)	56,13	-36,00 (35,94)	-45,75
18	40.50	-	-40.50	-
19	45.00	-	-45.00	-

Bu betonarme çerçeve numunesi hem TRCC ile güçlendirilmiş numunelere hem de dolgu duvarlı çerçeve numunesine referans teşkil etmesi amacıyla üretilmiştir. Diğer tüm çerçeve numunelerine ait deneysel veriler, bu referans numunesi ile dolgu duvarlı çerçeve numunesinden elde edilen sonuçlar esas alınarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilecektir.



Şekil 5.3: Çıplak çerçeve numunesi enerji grafiği.

Şekil 5.3'te, çıplak betonarme çerçeve numunesine ait enerji tüketim grafiği sunulmaktadır. Grafik üzerinde, her bir itme ve çekme çevrimi sonunda numune tarafından tüketilen enerji miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir. Ayrıca, her bir çevrim sonunda tüketilen enerji miktarını gösteren rakamsal veriler Tablo 5.2 'de verilmektedir. Deneyin sonlandığı 17. çevrim itibarıyla elde edilen toplam enerji tüketimi hesaplanmış ve bu değer 15264,17 kN.mm olarak bulunmuştur.

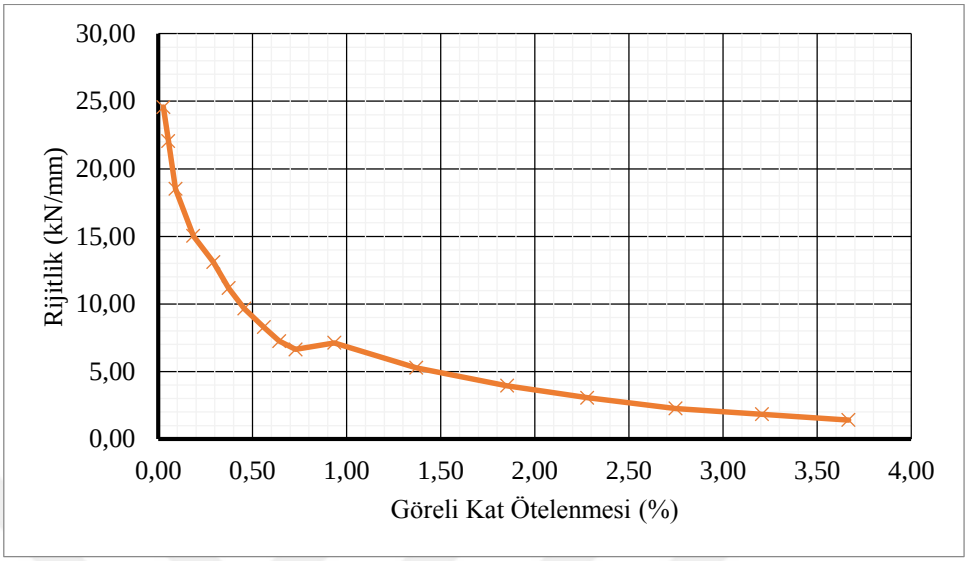
Tablo 5.2: Çıplak BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi

Çıplak Çerçeve Yutulan Enerji Değerleri (kN.mm)		
Çevrim Sayısı	Çevrimsel Enerji	Yığışımlı Çevrimsel Enerji
1	0,78	0,78
2	2,97	3,75
3	4,84	8,59
4	29,00	37,59
5	69,27	106,86
6	133,31	240,17
7	192,80	432,97
8	248,87	681,84
9	308,56	990,4
10	348,72	1339,12
11	766,45	2105,57
12	1354,00	3459,57
13	1742,00	5201,57
14	2149,30	7350,87
15	2558,70	9909,57
16	2570,10	12479,67
17	2784,50	15264,17

Diğer çerçeve deneylerinin çevrim sayısı göz önünde bulundurulduğunda yapılabilen minimum çevrim sayısının 14 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla tüm numunelerin tükettiği enerji miktarı 14. Çevrim'deki değer baz alınarak hesaplanacak ve bu çevrimdeki değer üzerinden kıyaslanacaktır. Bu durumda çıplak çerçeve numunesinin 14. Çevrimdeki tüketilen toplam enerji değeri 7350,87 kN.mm olarak hesaplanmıştır.

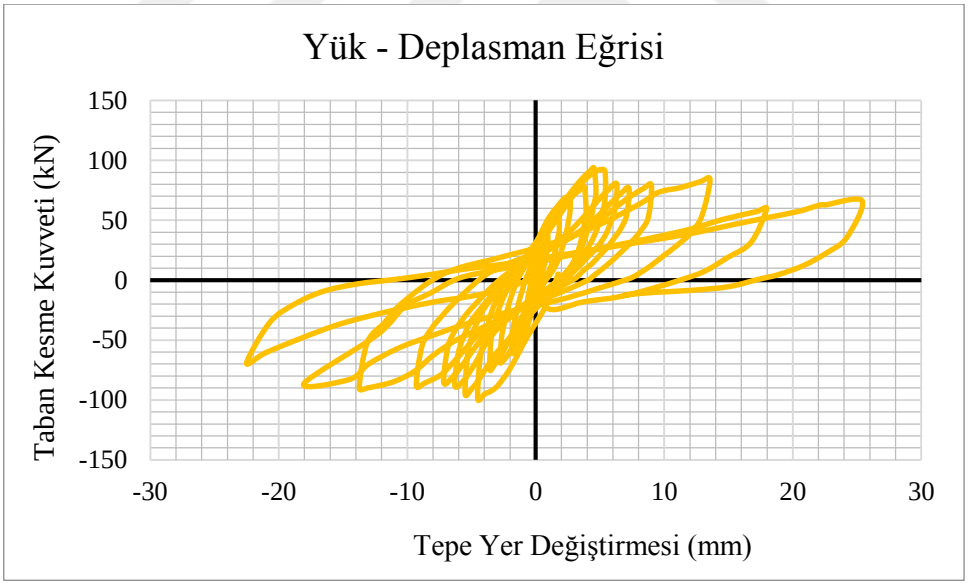
Deneysel çalışmalarda yatay rijitlik değerleri, her yükleme çevrimi için itme ve çekme yönlerinde elde edilen en büyük taban kesme kuvveti ile bu kuvvetlere karşılık gelen tepe yer değiştirmesi noktaları arasındaki doğrusal ilişkinin eğimi alınarak hesaplanmıştır. Bu yöntemle elde edilen eğim, ilgili çevrimin efektif yatay rijitliğini temsil etmektedir. Şekil 5.4'te çıplak

çerçeve numunesine ait yükleme çevrimleri sonucunda elde edilen yatay rijitlik değişimini gösteren grafik sunulmuştur.



Şekil 5.4: Çıplak çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi.

5.1.2. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve



Şekil 5.5: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi.

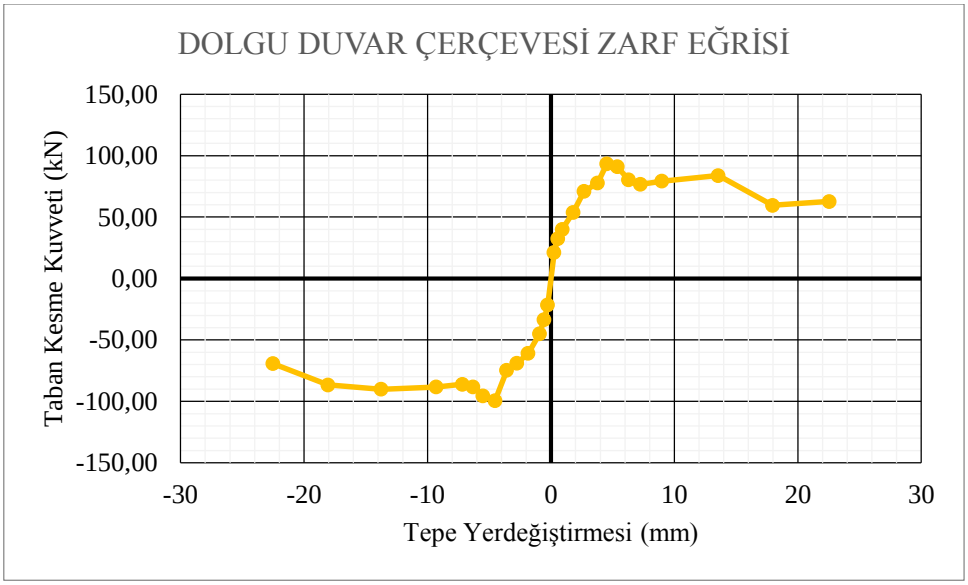
Bu çerçeve numunesi, dolgu duvarlı ve çimento harcı ile sıvalı olarak hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur. Deney süresince gözlemlenen çatlak oluşumları ile dikkat çeken yapısal davranışlara ilişkin ayrıntılı açıklamalar Bölüm 4.1.2'de sunulmuştur. Numuneye uygulanan yer değiştirme ve yükleme protokolü ile deneysel veriler Tablo 5.3'te sistematik biçimde verilmiştir. Bu çizelgede, her bir çevrim (cycle) sonunda ölçülen tepe yer değiştirmeleri ile bu yer değiştirmelere karşılık gelen yatay yük değerleri açık şekilde gösterilmektedir. Her

çevrim için hedeflenen tepe yer değiştirmesinin yanındaki parantez içine alınmış değerler deneysel süreçte numuneden alınan yer değiştirme değerleridir.

Bu numune üzerinde gerçekleştirilen deney toplam 14 çevrim sürmüştür. Ulaşılan maksimum tepe yer değiştirmesi 22,54 mm, maksimum yatay yük taşıma kapasitesi ise 99,54 kN olarak ölçülmüştür. Bu maksimum yatay yük değeri, 7. çevrim sırasında ve itme yönünde, tepe yer değiştirmesinin 4,52 mm olduğu anda elde edilmiştir. Öte yandan, çekme yönünde ulaşılan en yüksek yatay yük değeri, yine aynı çevrimde ölçülmüş olup 93,42 kN olarak kaydedilmiştir.

Bu numunede, itme yönündeki yükleme sırasında ulaşılan maksimum yatay yük değerinin %85'ine düşüş, çekme çevrimi sırasında 9. çevrimde gerçekleşmiştir. 14. Çevrimde piston tarafındaki kolon-temel birleşiminin kırılması, tuğla duvarın taşıyıcı sistemden ayrılması ve kolon-kiriş birleşimlerinin açılması sonucu yük aktarımında büyük bir azalma olmuş ve deney bu çevrimde sonlandırılmıştır.

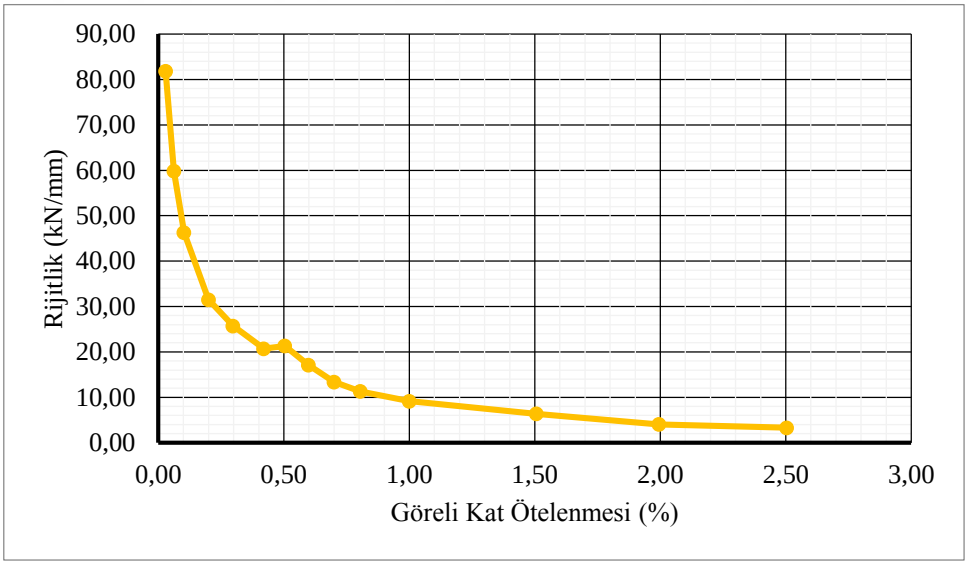
Deney süresince, numune üzerine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden (LVDT) elde edilen ölçüm verileri doğrultusunda oluşturulan tepe yer değiştirmesi-yatay yük ilişkisi eğrisi, Şekil 5.5'de; bu numuneye ait zarf eğrisi ise Şekil 5.6'da sunulmuştur. İlgili grafikler, numunenin tersinir tekrarlı yükler altındaki yapısal davranış karakteristiklerini ve çevrimler boyunca meydana gelen rijitlik değişimlerini açık bir biçimde ortaya koymakta; ayrıca dolgu duvarın çerçeve sistemine katkısını değerlendirme imkânı sunmaktadır.



Şekil 5.6: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi zarf eğrisi.

Tablo 5.3: Dolgu duvarlı BA çerçeve numunesi yükleme protokolü.

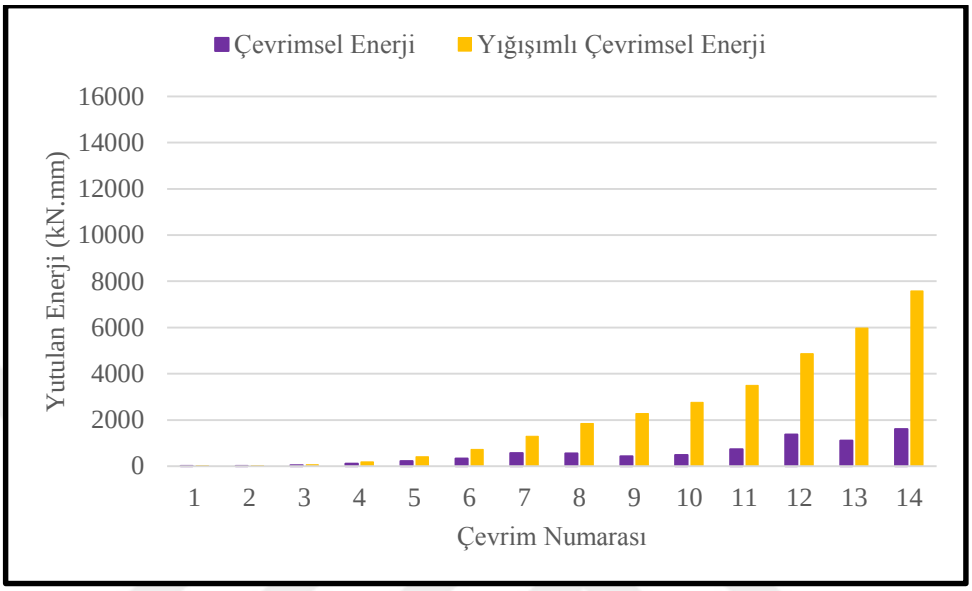
DOLGU DUVARLI ÇERÇEVE				
ÇEVRİM NO	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (İTME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (ÇEKME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)
1	0,27 (0,26)	21,41	-0,27 (-0,26)	-21,15
2	0,54 (0,54)	33,39	-0,54 (-0,52)	-32,38
3	0,90 (0,92)	45,09	-0,90 (-0,92)	-40,04
4	1,80 (1,84)	60,98	-1,80 (-1,80)	-53,71
5	2,70 (2,76)	69,01	-2,70 (-2,68)	-70,91
6	3,60 (3,58)	74,79	-3,60 (-3,78)	-77,74
7	4,50 (4,52)	99,54	-4,50 (-4,54)	-93,42
8	5,40 (5,50)	95,46	-5,40 (-5,38)	-90,96
9	6,30 (6,30)	88,27	-6,30 (-6,30)	-80,25
10	7,20 (7,16)	86,01	-7,20 (-7,25)	-76,64
11	9,00 (9,30)	88,28	-9,00 (-9,00)	-79,19
12	13,50 (13,74)	90,12	-13,50 (-13,56)	-83,86
13	18,00 (18,06)	86,54	-18,00 (-17,96)	-59,53
14	22,50 (22,51)	69,22	-22,50 (-22,54)	-62,76
15	27,00	-	-27,00	-
16	31,50	-	-31,50	-
17	36,00	-	-36,00	-
18	40,50	-	-40,50	-
19	45,00	-	-45,00	-



Şekil 5.7: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi.

Şekil 5.7'de, dolgu duvarlı çerçeve numunesine ait yükleme çevrimleri sonucunda hesaplanan yatay rijitlik değerlerinin değişimini gösteren grafik sunulmuştur. Grafikte, numunenin her çevrimi için itme ve çekme yönlerinde elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri ile bu kuvvetlere karşılık gelen tepe yer değiştirmeleri arasındaki doğrusal ilişki

dikkate alınarak hesaplanan çevrimsel yatay rijitlik değerleri sunulmaktadır. Bu yaklaşım, yapı elemanının tersinir tekrarlı yükler altındaki rijitlik davranışını ortaya koymakta; aynı zamanda dolgu duvarının çerçeve sistemine katkısını zamana bağlı olarak değerlendirme ve görsel olarak izleme olanağı sağlamaktadır.



Şekil 5.8: Dolgu duvarlı çerçeve numunesi enerji grafiği.

Tablo 5.4: Dolgu duvarlı BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi

Dolgu Duvarlı Çerçeve Yutulan Enerji Değerleri (kN.mm)		
Çevrim Sayısı	Çevrimsel Enerji	Yığışımlı Çevrimsel Enerji
1	5,51	5,51
2	18,18	23,69
3	40,03	63,72
4	115,39	179,11
5	222,75	401,86
6	326,05	727,91
7	560,26	1288,17
8	558,80	1846,97
9	430,56	2277,53
10	481,63	2759,16
11	738,91	3498,07
12	1369,60	4867,67
13	1113,10	5980,77
14	1599,50	7580,27

Şekil 5.8'de, dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesine ait enerji tüketim grafiği verilmiştir. Bu eğride, her bir çekme ve itme çevriminin sonunda numune tarafından tüketilen enerji miktarları zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresince gerçekleştirilen toplam 14

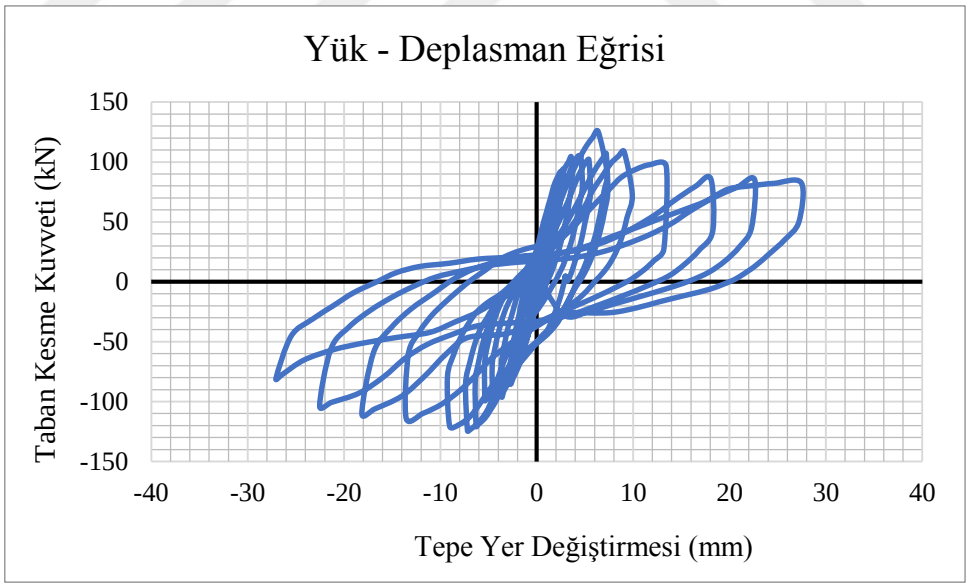
tersinir yük çevrimi sonucunda, numune tarafından sönümlenen toplam enerji miktarı 7580,27 kN.mm olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, her bir çevrim sonunda tüketilen enerji miktarını gösteren rakamsal veriler Tablo 5.4'te görülmektedir.

Toplam enerji tüketimi, çerçevenin histeretik davranışı çerçevesinde değerlendirildiğinde hem yapının sismik performansı hem de plastik şekil değiştirme kapasitesi açısından oldukça kritik bir parametredir. Bu bağlamda, dolgu duvarlı sistemlerin taşıyıcı sistem tasarımında göz önünde bulundurulmasının, özellikle deprem etkisi altındaki yapı performans kriterleri açısından faydalı olacağı sonucuna varılabilir.

5.1.3. AR-2-2-A Kodlu Betonarme Çerçeve

Bu çerçeve numunesi, sıvalı dolgu duvarlı bir sistem olarak tasarlanmış ve deney öncesinde her iki yüzeyine, mevcut sıva tabakası üzerinden uygulanan ankrajlı ve iki katmanlı çimento esaslı kompozit (TRCC) plakalar ile güçlendirilmiştir. TRCC uygulaması, yüzeye uygulanan özel harç ile birlikte yüksek aderans sağlayacak şekilde ankrajlanmıştır. Böylece, hem dolgu duvar-sistem bütünlüğü korunmuş hem de ilave bir taşıyıcı tabaka oluşturulmuştur.



Şekil 5.9: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatya yük-yer değiştirme ilişkisi.

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve gözlemler, Bölüm 4.1.3'te kapsamlı bir biçimde sunulmuş ve ilgili fotoğraflarla desteklenerek numune davranışı ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bu numune için uygulanan tersinir yükleme sonucunda kaydedilen tepe yer değiştirmesi-yatay yük ilişkisi eğrisi ve buna karşılık gelen zarf eğrisi, sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da grafiksel olarak verilmiştir.

Bu güçlendirme uygulamasının, numunenin yatay yük taşıma kapasitesi, şekil değiştirme sünekliği ve enerji sönümleme potansiyeli üzerinde ne ölçüde etkili olduğu, ilgili grafik ve deneysel veriler üzerinden ilerleyen bölümlerde karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

Tablo 5.5: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yükleme protokolü.

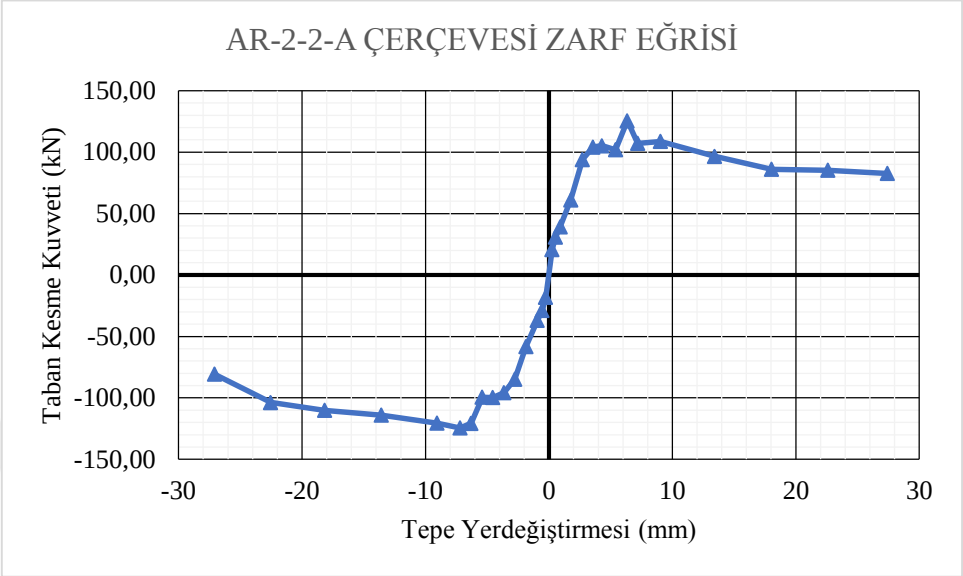
AR-2-2-A				
ÇEVRİM NO	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (İTME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (ÇEKME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)
1	0,27 (0,26)	18,21	-0,27 (-0,26)	-20,75
2	0,54 (0,54)	28,82	-0,54 (-0,54)	-31,02
3	0,90 (0,94)	36,89	-0,90 (-0,92)	-39,35
4	1,80 (1,86)	58,29	-1,80 (-1,78)	-61,24
5	2,70 (2,76)	84,86	-2,70 (-2,72)	-94,01
6	3,60 (3,65)	95,82	-3,60 (-3,58)	-104,15
7	4,50 (4,55)	99,66	-4,50 (-4,57)	-104,46
8	5,40 (5,40)	99,36	-5,40 (-5,40)	-102,02
9	6,30 (6,30)	120,71	-6,30 (-6,35)	-125,61
10	7,20 (7,20)	124,43	-7,20 (-7,20)	-107,12
11	9,00 (9,05)	120,53	-9,00 (-9,05)	-108,77
12	13,50 (13,56)	114,01	-13,50 (-13,42)	-96,66
13	18,00 (18,16)	110,15	-18,00 (-18,05)	-86,04
14	22,50 (22,54)	103,75	-22,50 (-22,60)	-85,30
15	27,00 (27,00)	80,69	-27,00 (27,44)	-82,73
16	31,50	-	-31,50	-
17	36,00	-	-36,00	-
18	40,50	-	-40,50	-
19	45,00	-	-45,00	-

Tablo 5.5'te, söz konusu numunenin gerçekleştirdiği toplam çevrim (cycle) sayısı, her bir çevrimde ulaşılan tepe yer değiştirme (mm) değerleri ile bu yer değiştirmelere karşılık gelen yatay yük (kN) değerleri açık bir biçimde sunulmuştur. Bu numunede toplam 15 tam çevrim uygulanabilmiştir.

Deney boyunca ölçülen en yüksek tepe yer değiştirmesi 27,44 mm olarak kaydedilmiştir. Numunenin ulaştığı maksimum yatay yük ise 125,61 kN olup, bu değere 9. çevrimde uygulanan çekme sırasında, tepe yer değiştirmesinin 6.35 mm olduğu konumda ulaşılmıştır. İtme yönünde kaydedilen maksimum yatay yük değeri ise 10. çevrimde ölçülmüş ve bu değer 124,43 kN olarak belirlenmiştir.

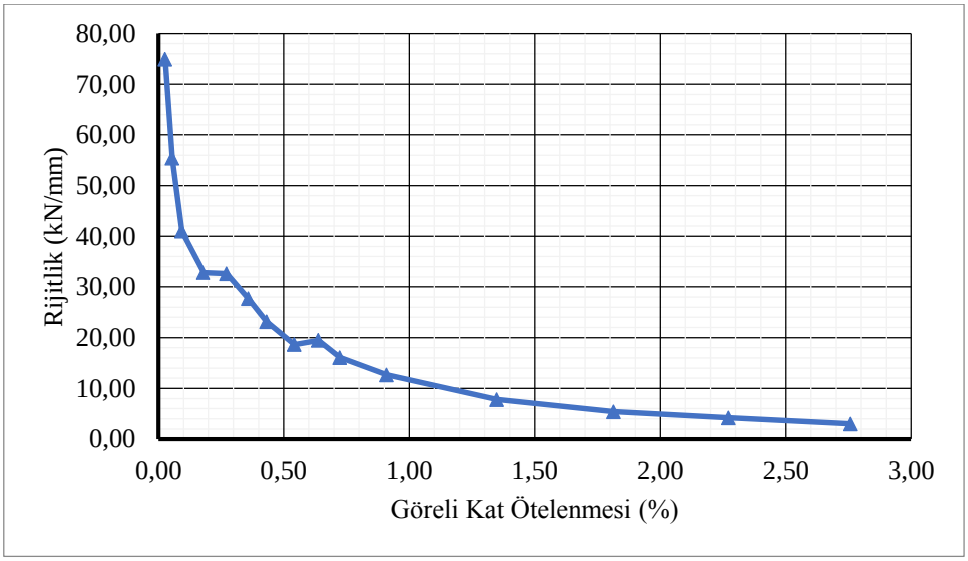
Bu numuneye ait yatay yük-yer değiştirme davranışı incelendiğinde, özellikle 4. çevrim sonrası, her iki adımda (itme-çekme) yönünde elde edilen yatay yük değerlerinin bir önceki

çevrime kıyasla belirgin şekilde artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, güçlendirme uygulamasının çalışmaya başlaması ve numune rijitliğinin güçlendirme etkisine bağlı olarak artış göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.10: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatay yük-yer değiştirme ilişkisi.

Deney, 15. çevrim sonunda hem itme hem de çekme yönlerinde ulaşılan yatay yüklerin, önceden kaydedilen maksimum yatay yük değerinin %85'inin altına düşmesi ve kolon dipleri ile kolon kiriş birleşimlerindeki plastikleşme sebebiyle sonlandırılmıştır.

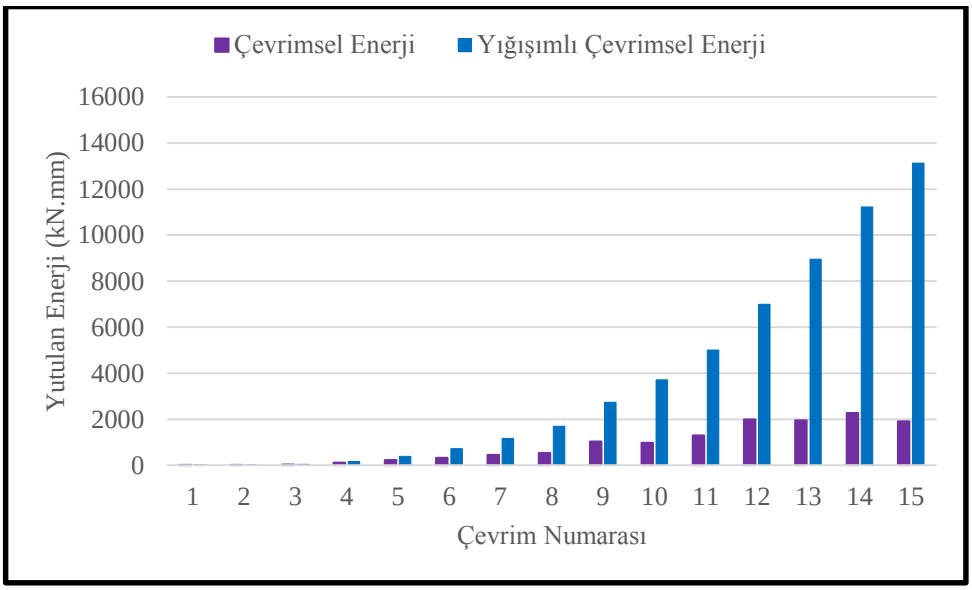


Şekil 5.11: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi.

Tablo 5.6: AR-2-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi.

AR-2-2-A Çerçevesi Yutulan Enerji Değerleri (kN.mm)		
Çevrim Sayısı	Çevrimsel Enerji	Yığışımlı Çevrimsel Enerji
1	2,99	2,99
2	11,41	14,4
3	27,55	41,95
4	119,50	161,45
5	226,58	388,03
6	328,57	716,6
7	448,50	1165,1
8	534,27	1699,37
9	1034,20	2733,57
10	979,56	3713,13
11	1291,60	5004,73
12	1993,40	6998,13
13	1951,60	8949,73
14	2268,10	11217,83
15	1906,65	13124,48

Şekil 5.11'de, AR-2-2-A numaralı çerçeve elemanına ait yükleme çevrimleri sonucunda elde edilen yatay rijitlik değerlerinin değişimini gösteren grafik verilmiştir. Bu grafikte, her çevrim için itme ve çekme yönlerindeki maksimum taban kesme kuvveti ile karşılık gelen tepe yer değiştirmesi arasındaki doğrusal ilişkinin eğimi esas alınarak hesaplanan yatay rijitlik değerleri sunulmuştur. Bu sayede, ilgili çerçevenin yatay taşıma kapasitesi ve rijitlik karakteristiği zamana bağlı olarak değerlendirilebilmektedir.



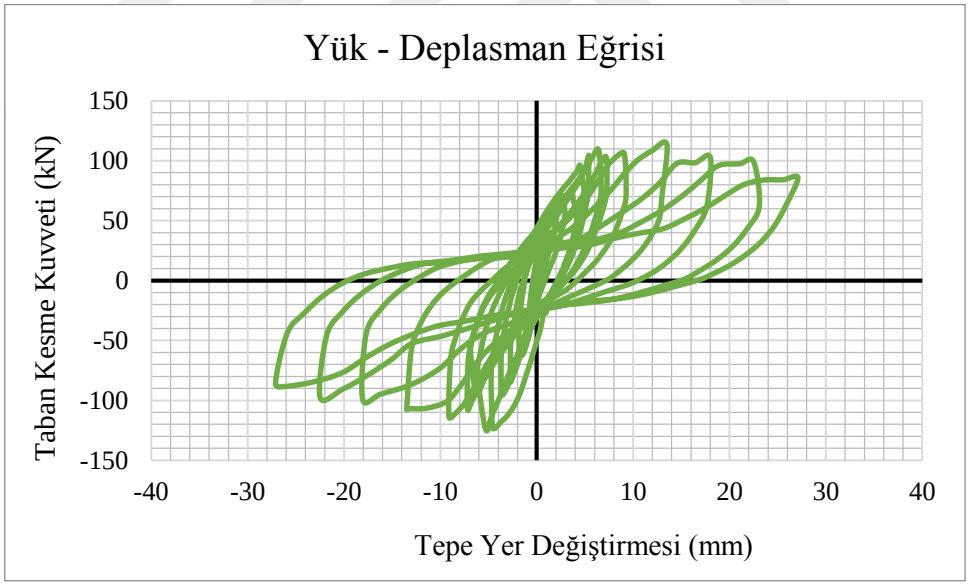
Şekil 5.12: AR-2-2-A kodlu çerçeve numunesi enerji grafiği.

Şekil 5.12'de AR-2-2-A çerçevesi numunesine ait enerji tüketim grafiği verilmiştir. Bu eğride, her bir çekme ve itme çevriminin sonunda numune tarafından tüketilen enerji miktarları çevrimlere bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresince gerçekleştirilen toplam 15 tersinir yükleme çevrimi için tüketilen toplam enerji miktarı 13124,48 kN.mm iken referans numunelerle karşılaştırılacak çevrim sayısı olan 14. çevrimdeki numune tarafından sönümlenen toplam enerji miktarı 11217,83 kN.mm olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, her bir çevrim sonunda tüketilen enerji miktarını gösteren rakamsal veriler Tablo 5.6'da her çevrim için ayrı ayrı verilmiştir.

5.1.4. AR-2-4-A Kodlu Betonarme Çerçeve

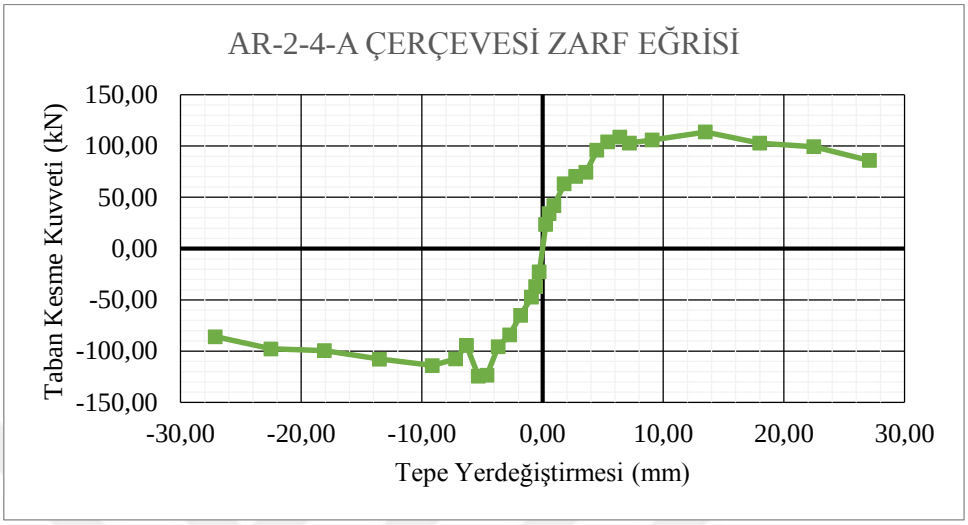
Bu deney numunesi, dolgu duvarlı ve sıvalı olarak hazırlanmış, ardından sıva yüzeyleri üzerinden her iki cepheden 4 katmanlı TRCC plaka ile ankrajlı şekilde güçlendirilmiş bir betonarme çerçevedir. Numunenin detayları ve deney süresince gözlemlenen çatlak oluşumları ile dikkat çeken hasar mekanizmaları, Bölüm 4.1.4'te ayrıntılı olarak açıklanmış ve görsellerle desteklenmiştir.



Şekil 5.13: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi yük-yer değiştirme ilişkisi.

Deneye ait yükleme protokolü ile tepe yer değiştirmelerine karşılık gelen yatay yük değerleri, Tablo 5.7'de kapsamlı bir biçimde sunulmaktadır. Bu deney, toplam 15 tam çevrim boyunca gerçekleştirilmiş ve en büyük yer değiştirme değeri 27.12 mm olarak kaydedilmiştir. Numune, maksimum yatay yük kapasitesi olan 124,25 kN'a, 8. çevrimde itme yönündeki 5.32 mm'lik tepe yer değiştirmesi sırasında ulaşmıştır. Çekme yönündeki maksimum yatay yük ise 12. çevrimde 113,74 kN olarak elde edilmiştir. Deney hem itme hem çekme yönlerinde ulaşılan

maksimum yatay yüklerin %85'inin altına düştüğü 15. çevrim sonunda kolon-kiriş birleşimlerinde plastik mafsallaşmaların olması ve numunede yük aktarımının büyük oranda durması sebebiyle sonlandırılmıştır.



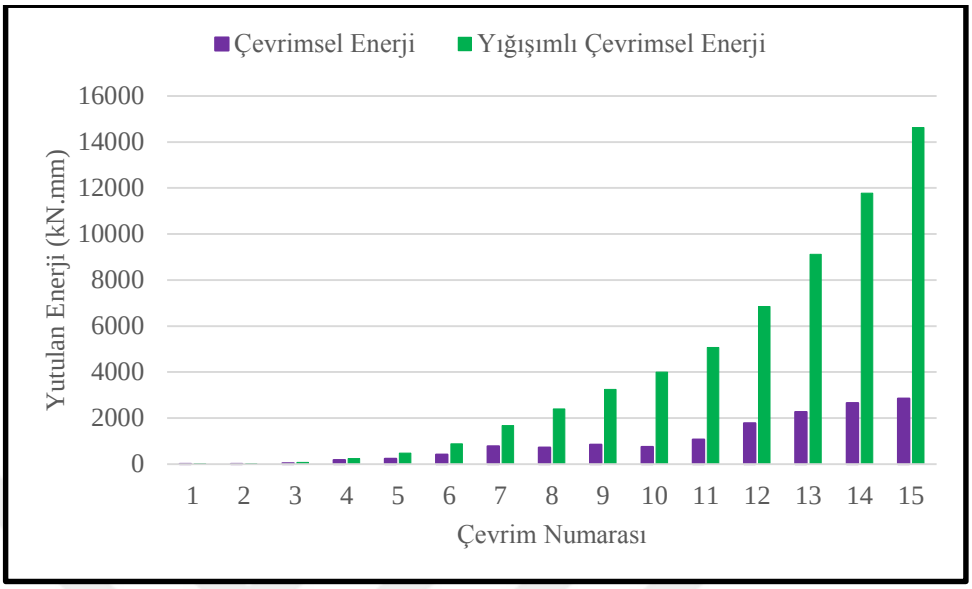
Şekil 5.14: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi zarf eğrisi.

Tablo 5.7: AR-2-4-A kodlu BA çerçeve numunesi yükleme protokolü.

AR-2-4-A				
ÇEVRİM NO	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (İTME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)	TEPE YER DEĞİŞTİRMESİ (ÇEKME/mm)	UYGULANAN YÜK (kN)
1	0,27 (0,26)	22,47	-0,27 (-0,26)	-23,52
2	0,54 (0,56)	37,07	-0,54 (-0,56)	-34,26
3	0,90 (0,90)	47,11	-0,90 (-0,94)	-41,86
4	1,80 (1,82)	64,99	-1,80 (-1,80)	-63,11
5	2,70 (2,72)	83,94	-2,70 (-2,74)	-70,26
6	3,60 (3,68)	95,43	-3,60 (-3,60)	-74,43
7	4,50 (4,60)	123,34	-4,50 (-4,51)	-95,86
8	5,40 (5,32)	124,25	-5,40 (-5,40)	-104,01
9	6,30 (6,30)	94,33	-6,30 (-6,42)	-108,82
10	7,20 (7,20)	107,45	-7,20 (-7,20)	-102,93
11	9,00 (9,12)	113,93	-9,00 (-9,08)	-105,94
12	13,50 (13,50)	107,63	-13,50 (-13,50)	-113,74
13	18,00 (18,07)	99,41	-18,00 (-18,01)	-102,71
14	22,50 (22,50)	97,73	-22,50 (-22,50)	-99,27
15	27,00 (27,12)	85,87	-27,00 (27,10)	-85,91
16	31,50	-	-31,50	-
17	36,00	-	-36,00	-
18	40,50	-	-40,50	-
19	45,00	-	-45,00	-

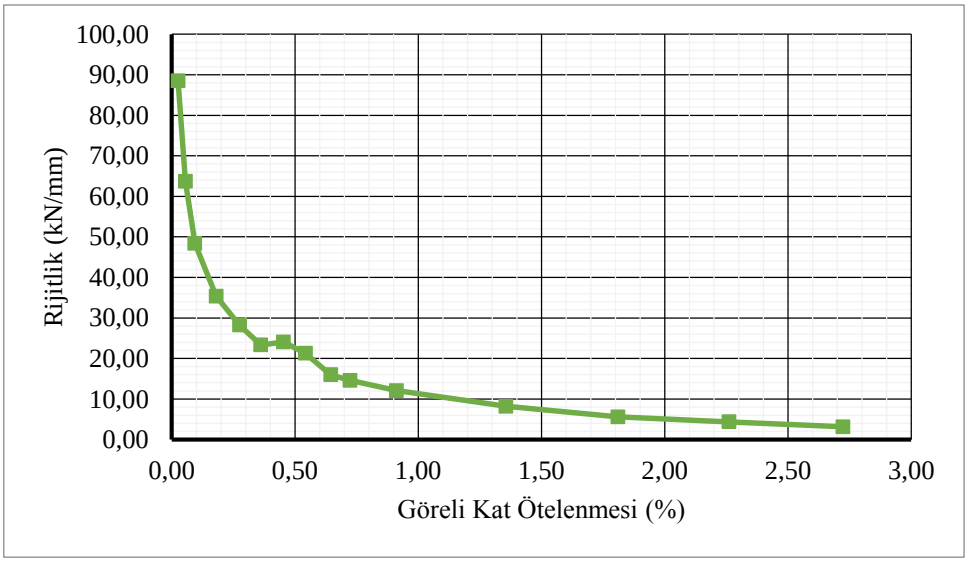
Deney sürecinde numuneye uygulanan yükleme sırasında elde edilen ölçüm verileri, numune üzerindeki yatay yük-tepe yer değiştirmesi ilişkisini ortaya koyacak şekilde analiz

edilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen yatay yük-tepe yer değiştirme eğrisi Şekil 5.13'te, buna karşılık gelen zarf eğrisi ise Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.15: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi enerji grafiği.

İtme ve çekme adımlarındaki yatay yük değerleri bu numune bazında paralel gitmediği ve özellikle çekme adımındaki değerlere bakıldığında itme adımlarına göre özellikle 6. Çevrimden sonra oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Yükleme protokolü ve deney uygulama detayları aynı olmasına rağmen bu farkın oluşmasının sebebi numunenin imalat detaylarından kaynaklandığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, elde edilen bu histeretik veriler üzerinden oluşturulan zarf eğrileri, numunenin yük taşıma kapasitesinin yanı sıra rijitlik azalımı ve enerji sönümleme özelliklerini de ortaya koymaktadır.



Şekil 5.16: AR-2-4-A kodlu çerçeve numunesi yatay rijitlik değişimi.

Güçlendirme yönteminin, taşıma kapasitesini artırmanın yanı sıra, numunenin süneklik, enerji tüketimi, hasar dağılımı ve rijitlik korunumu gibi parametrelerde de önemli iyileşmeler sağlaması beklenmektedir. Bu bağlamda, bu deney sonuçlarının referans numuneleriyle karşılaştırılması sonucunda bu parametreler değerlendirilecektir.

Şekil 5.15'te AR-2-2-A çerçevesi numunesine ait enerji tüketim grafiği verilmiştir. Bu eğride, her bir çekme ve itme çevriminin sonunda numune tarafından tüketilen enerji miktarları çevrimlere bağlı olarak gösterilmiştir. Deneyde ulaşılan toplam 15 tersinir yükleme çevrimi için tüketilen toplam enerji miktarı 14627,70 kN.mm iken referans numunelerle karşılaştırılacak ve maksimum çevrim sayısı olan 14. çevrimdeki numune tarafından sönümlenen toplam enerji miktarı 11776,20 kN.mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.8: AR-4-2-A kodlu BA çerçeve numunesi yutulan enerji çizelgesi

AR-2-4-A Çerçevesi Yutulan Enerji Değerleri (kN.mm)		
Çevrim Sayısı	Çevrimsel Enerji	Yığışımlı Çevrimsel Enerji
1	5,58	5,58
2	19,65	25,23
3	45,71	70,94
4	173,43	244,37
5	232,75	477,12
6	409,62	886,74
7	783,33	1670,07
8	727,85	2397,92
9	847,64	3245,56
10	753,04	3998,6
11	1075,80	5074,4
12	1779,90	6854,3
13	2269,70	9124
14	2652,20	11776,2
15	2851,50	14627,7

Şekil 5.16'da AR-2-4-A numaralı çerçeve numunesine ait deneysel yükleme çevrimlerinden elde edilen yatay rijitlik değerlerinin göreli kat ötelenmelerine göre değişimini gösteren grafik verilmiştir. Bu grafikte, her çevrim için itme ve çekme yönlerinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti ile bu kuvvetlere karşılık gelen tepe yer değiştirmesi arasındaki doğrusal ilişkinin eğimi esas alınarak hesaplanan rijitlik değerleri yer almaktadır. Böylece, AR-2-4-A çerçevesinin yatay taşıma davranışı ve rijitlik düzeyinin deneysel olarak nasıl değiştiği görsel biçimde analiz edilebilmektedir.

5.2. ANALİTİK ÇALIŞMA

Çimento esaslı kompozitlerle (TRCC) güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin tersinir tekrarlı yükler altındaki davranışı analitik yaklaşımla bu bölümde incelenmiştir. Analitik çalışma, analitik tahminler ve analitik modeller olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Analitik tahminler bölümünde, TBDY-2018 Bölüm 15C – Dolgu Duvarlarının Güçlendirilmesi' ne benzer olarak betonarme çerçevelerin maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Analitik modeller bölümünde ise, betonarme çerçevelerde kullanılan güçlendirme yöntemleri idealize edilerek mevcut bir betonarme binaya uygulanmış ve betonarme binanın davranışı incelenmiştir. Her iki bölümde de hesaplanan sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve ideal güçlendirme yöntemi tanımlanmıştır.

5.2.1. Analitik Yaklaşım

Güncel deprem yönetmeliği olan TBDY-2018'in 15C bölümünde, mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi konuları için dolgu duvarlarının güçlendirilmesi seçeneği sunulmaktadır. Dolgu duvarların güçlendirilmesinde, hasır çelik donatılı özel sıva ve lifli polimerler ile güçlendirmeler önerilmektedir.

Yürürlükteki yönetmelikte tanımlanan lifli polimerler (LP) ile güçlendirme yöntemi, lifli polimer malzemelerin yapı elemanlarının yüzeylerine epoksi esaslı kimyasal bağlayıcılar aracılığıyla uygulanmasını esas almaktadır. Ancak, ülkemizde henüz çok yeni olan çimento esaslı kompozit sistemlerle gerçekleştirilen güçlendirme uygulamaları, mevcut deprem yönetmeliği kapsamında doğrudan değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında çimento esaslı kompozitler ile gerçekleştirilecek güçlendirme uygulamaları için gerekli olan modelleme prensipleri yönetmelikte tanımlanan LP esaslı sistemlerin yöntemleri temel alınarak, benzer ilkeler doğrultusunda uyarlanmıştır.

Özellikle betonarme yapılarda çerçeve içerisine örülmüş duvarların yapı sistemine etkileri önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak yeni yapılan bina türü yapılarda bu duvarların etkisi dikkate alınmamakla beraber statik hesaplamalarda sadece üstünde bulunduğu yapı elemanına çizgisel yük olarak etkitilmektedir. Aynı zamanda bu taşıyıcı olmayan ve ikincil elemanlar olarak adlandırılan bölme duvarların, son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda yük taşıma kapasitelerine ve taşıyıcı sistem rijitliğine olan etkileri yavaş yavaş anlaşılmaya başlamıştır. Ancak yine de yeni yapılacak yapıların statik hesaplamalarında bölme duvarların etkisi ihmal edilmektedir. Bu durumda sadece yapının taşıyıcı karkasının yük taşıdığı ve bu karkasın çıplak bir şekilde hareket ettiği varsayılarak

analiz yapılmakta ve yapıya etkiyen dış etkenlerin yapının taşıyıcı karkası tarafından taşınması istenmektedir.

Bununla birlikte dolgu duvar etkisi her ne kadar yeni yapılan yapılarda göz ardı edilse de mevcut (özellikle konut türü katlı betonarme) yapılarda bu durum kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Bunun içindir ki dolgu duvar elemanlarının mevcut betonarme taşıyıcı sistemli yapılara olan etkileri bilindiğinden bu durum özellikle son iki deprem yönetmeliğinde de dikkate alınmış ve duvarların yapı taşıyıcı sistemine dahil edilmesi için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Ülkemizdeki mevcut betonarme çerçeve sistemli yapı stoku değerlendirildiğinde, bu yapıların büyük bir kısmının yetersiz mühendislik hizmetiyle inşa edildiği, herhangi bir kontrol mekanizmasından geçmediği, düşük dayanımlı ve standartların altında malzeme özelliklerine sahip oldukları bilinmektedir. Bu tür yapılar açısından dolgu duvarların taşıyıcı sistem davranışı üzerindeki etkisi çok daha kritik hale gelmekte; dolgu duvarların dikkate alınması durumunda yapının genel davranış biçimi yapılacak hesaplamalarda belirgin şekilde değiştirebileceği düşünülmektedir. Bazı araştırmacıların, bu dolgu duvarların hesaplamalara dahil edilmesi için verdikleri yaklaşık hesap yöntemleri aşağıda örnek olarak verilmiştir.

Örneğin, Bhat ve diğ. (2024) tarafından yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, mevcut analitik modeller ile karşılaştırılmış ve dayanım veya rijitlik parametreleri açısından optimum uyum sağlayan modeller belirlenmiştir. Bu çalışma, yığma dolgulu betonarme (BA) çerçeveli binaların sismik performansının değerlendirmesinde yaygın biçimde kullanılan modellerden biri olan basınç çubuğu (single strut) modeline odaklanmaktadır.

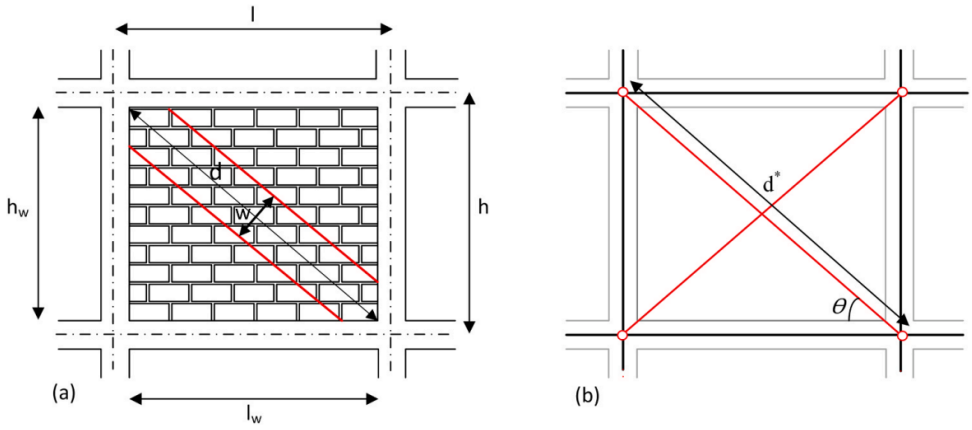


Fig. 20. Diagonal strut model: (a) geometric properties; (b) equivalent strut model.

Şekil 5.17: Çalışmada kullanılan dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli.

Pohoryles ve Bournas (2020) mevcut deneysel ve sayısal çalışmaları dikkate alarak, güçlendirilmiş dolgu duvarlara yönelik bir makro model önermiştir. Önerdikleri bu modelde, kompozit malzemelerin çekme dayanımını temsil eden bir çekme çubuğu (tie) ile birlikte, dolgu-duvar ve çerçeve arasındaki etkileşimin iyileştirilmesi sayesinde artırılmış diyagonal basınç çubuğu genişliği dikkate alınmıştır (Şekil 5.18). Literatür taramasından seçilen test edilmiş ve kompozit veya FRP ile güçlendirilmiş numunelere ait deneysel verilerin derlenmesiyle, çekme veya basınç çubuğuna ilişkin yaklaşık bağıntılar türetilmiştir.

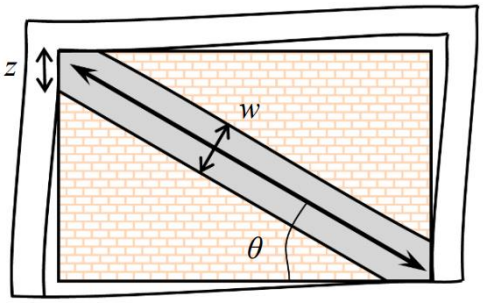


Fig. 1. Diagonal compressive-strut model for infilled frames.

Şekil 5.18: Çalışma kapsamında verilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli.

Basha ve Kaushik (2017) yapının göçme (kesme tipi) mekanizmalarını yakalayabilmek amacıyla, eşdeğer diyagonal çubuğa dayalı makro-modelleme yaklaşımı geliştirmiştir (Şekil 5.19).

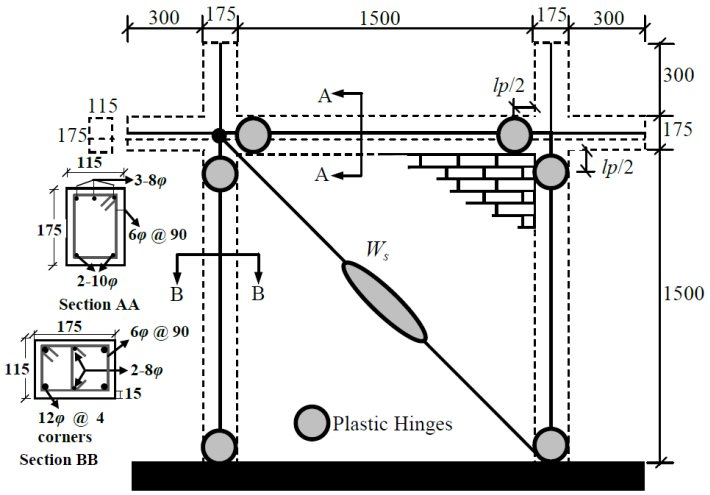


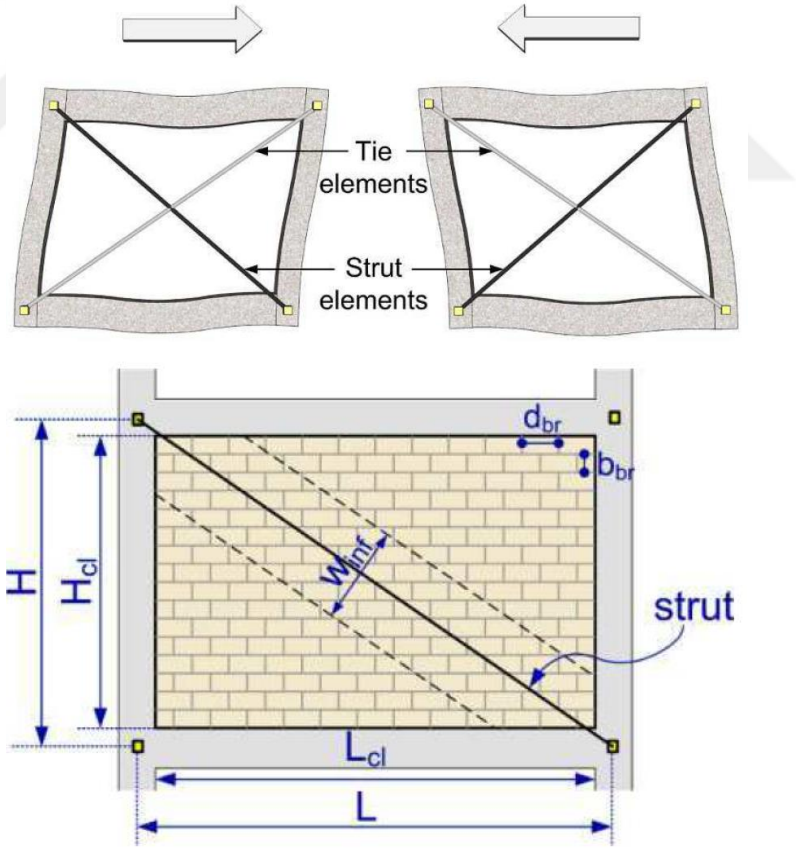
Fig. 2 - Details of analytical model and plastic hinge locations.

Şekil 5.19: Çalışmada geliştirilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli.

Önerilen modelleme tekniğini değerlendirmek amacıyla, literatürde yer alan deneysel çalışmalarda test edilmiş dolgulu betonarme çerçeve örnekleri seçilerek doğrusal olmayan itme

analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen modelleme tekniğinin betonarme kolonlarda meydana gelebilecek kırılmaları başarıyla öngörebildiğini ve dolayısıyla bu elemanlardaki kesme talebinin belirlenmesinde etkili biçimde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Koutas ve diğ (2014) tekstil takviyeli harç (TRM) ile güçlendirilmiş yığma duvarlı betonarme (BA) çerçevelerin, sismik yükler altında davranışını modellemeye yönelik analitik bir yaklaşım önermektedir. Önerilen modelde dolgu duvarın davranışını, eşdeğer tekli diyagonal çubuk ve çekme elemanı (tie) temsil etmektedir (Şekil 5.20). Model, OpenSees doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımında da uygulanmış ve diyagonal elemanlara ait parametreler ile TRM ile güçlendirilmiş yığma duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen çeşitli deneylerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen modelin TRM güçlendirmesinin yapının genel davranışı üzerindeki katkısını yeterli düzeyde yansıttığını açıkça göstermiştir.



Şekil 5.20: Çalışmada dikkate alınan dolgu duvarlı betonarme çerçeve modeli.

Kakaletsis (2012), betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarların güçlendirilmesi ile ilgili deney sonuçlarını sunmuştur. Önceden hasar verdiği çerçevelerin kolon-kiriş birleşim

bölgelerini epoksi enjeksiyonu ve CFRP plakalarla güçlendirmiş, daha sonra da dolgu duvarı CFRP çapraz bantlar ve cam lifli çimento esaslı kompozitlerle güçlendirmiştir. Çalışmasında dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yükler altındaki davranış modellerini sunmuştur (Şekil 5.21) Bu model, ilk olarak Kakaletsis ve Karayannis tarafından 2008 yılında yayınladıkları makalelerinde ortaya atılmıştır.

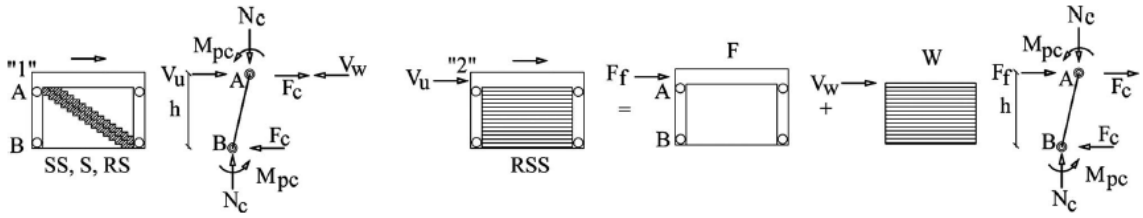
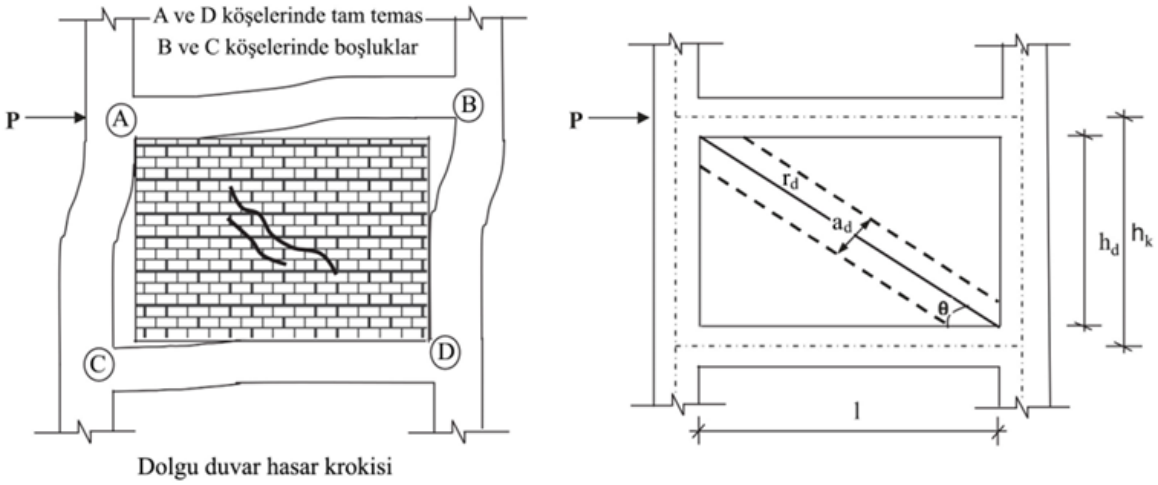


Fig. 12. Failure mechanisms

Şekil 5.21: Çerçevelerin göçme mekanizması.

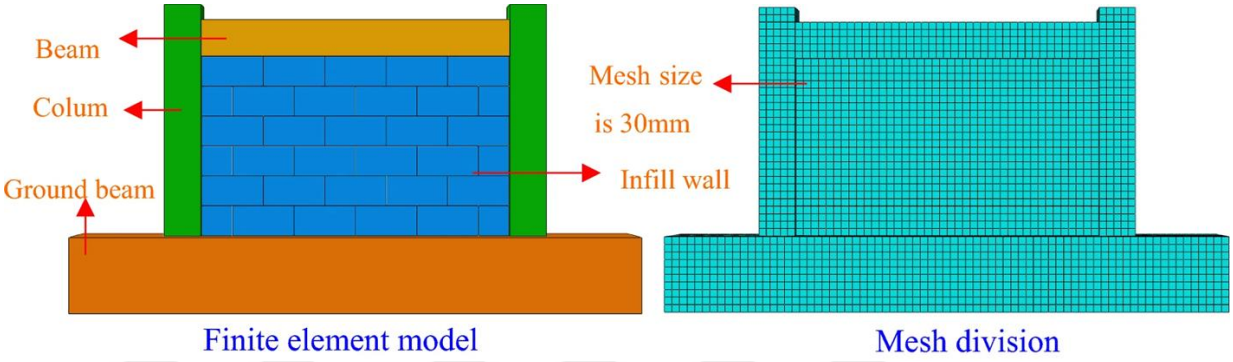
Yukarıda verilen kaynaklarda da görüldüğü gibi araştırmacıların, dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin modellenmesini iki ayrı yöntemle yapabildikleri görülmektedir. Bu yöntemler, Eşdeğer Basınç Çubuğu yaklaşımı ve Sonlu Elemanlar yaklaşımı olarak iki ana başlıkta özetlenebilir.

Eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı, sismik olarak çerçevelerin kat hizalarına etki ettiği düşünülen yatay kuvvetlerin altında kalan dolgu duvarın, yatay kuvvetin tesir etiği düğüm noktası ile bu düğüm noktasından çizilen köşegenin alt ucundaki düğüm noktası arasında bir basınç çubuğu gibi davrandığını varsaymaktadır.



Şekil 5.22: Eşdeğer basınç çubuğu modeli.

Sonlu elemanlar yaklaşımında ise dolgu duvar ve dolgu duvarlı çerçeve sistemleri, üçgen veya dörtgen parçalara sahip elemanlar ile modellenmektedir. Bu elemanların düğüm noktalarında, iç kuvvetlerin denge ve süreklilik şartlarını sağlayan, sonlu sayıda (tercihe bağlı olabilir) elemanlardan oluşmuş, yüksek dereceden hiperstatik gerilme denklemleri elde edilmektedir.



Şekil 5.23: Sonlu elemanlar modeli.

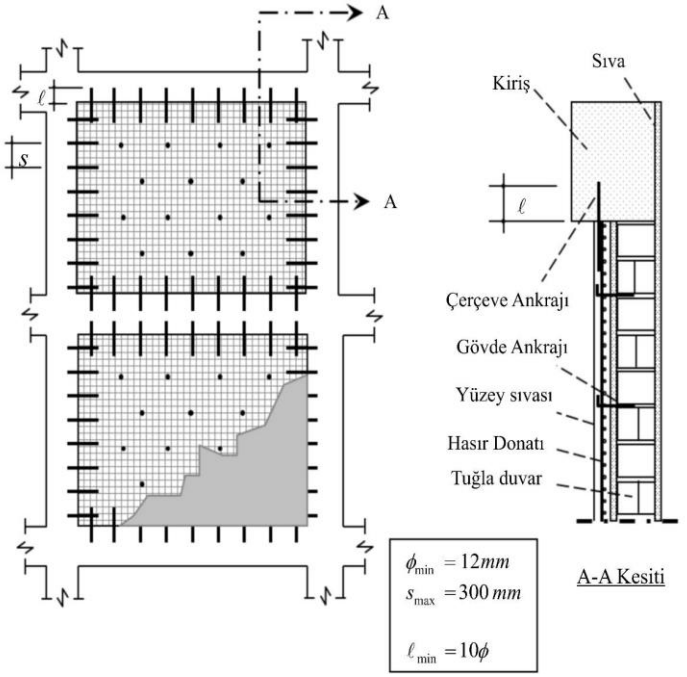
Eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı, alışılmış olduğu üzere sonlu elemanlar yaklaşımına göre pratik ve basit bir hesap yöntemidir. Özellikle 3D analiz yapabilen bilgisayar programlarının kullanımının zorunlu olduğu sonlu elemanlar yaklaşımında ise dolgu duvar ve çerçevenin gerçeğe yakın varsayımlarla modellenmesi mümkündür. Bu durum, daha detaylı modelleme imkânı sunduğundan dolgu duvar ile çerçeve arasındaki uygunluk tam olarak sağlanabilmekte ve geçeğe daha yakın sonuçlar alınabilmektedir. Bununla birlikte sonlu model (FEA) yaklaşımı için çok fazla parametre gereksinimi, detaylı ve uzun süren çalışma yükü ve bazı durumların model üzerine aktarılamaması bu yaklaşımın zorluklarıdır. Ayrıca malzeme özelliklerinin homojen olmadığı veya tam olarak tespit edilmediği sistemlerde, FEA modelinden hesaplanan sonuçlar ile deneysel sonuçlar farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle kolaylıkla uygulanabilen bir yaklaşım olduğundan bu çalışma kapsamında da hem analitik yaklaşım hem de analitik model için eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı kullanılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğu modeli Şekil 5.22'de gösterilmektedir.

Güncel deprem yönetmeliğimiz, 2018 yılında yayımlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'dir. TBDY-2018 kapsamında tanımlanan 15. Bölümde 'Deprem Etkisi Altında Mevcut Bina Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güçlendirme Tasarımı İçin Özel Kurallar' verilmektedir. Bu bölüme ek olarak verilen Ek 15C'de ise 'Ek 15C – Dolgu Duvarlarının Güçlendirilmesi' için hesaplama ve değerlendirme prosedürleri yer almaktadır. Bu durumda, dolgu duvar güçlendirmeleri için deprem

yönetmeliğinin 15. Bölümü'nde bulunan tanımla; temel üstünden yukarıya kadar üst üste süreklilik gösteren betonarme çerçeve içindeki bölme duvarlarının rijitliği ve kesme kuvveti dayanımı, EK 15C'de tanımlanan güçlendirme yöntemleri ile arttırılabilmektedir. Ayrıca yine aynı bölümde 'Eğer binanın güçlendirilmesi esas olarak bölme duvarların güçlendirilmesi ile yapılıyorsa, bu yöntem sadece bodrum hariç en fazla üç katlı binalarda uygulanabilir' uyarısı bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada dolgu duvar etkisinin daha net görülmesi ve parametrelerin birbiriyle kıyasının daha kolay olması için 14 katlı mevcut bir bina modellenmiştir.

TBDY-2018'de bulunan 'Ek 15C – Dolgu Duvarlarının Güçlendirilmesi' bölümünde iki ayrı güçlendirme tekniği önerilmektedir.

- DOLGU DUVARLARIN HASIR ÇELİK DONATILI ÖZEL SIVA İLE GÜÇLENDİRİLMESİ: Dolgu duvarlarının rijitliği ve kesme dayanımı, duvar yüzüne uygulanan hasır çelik donatılı, özel karışımlı sıva tabakası ile arttırılabilir.

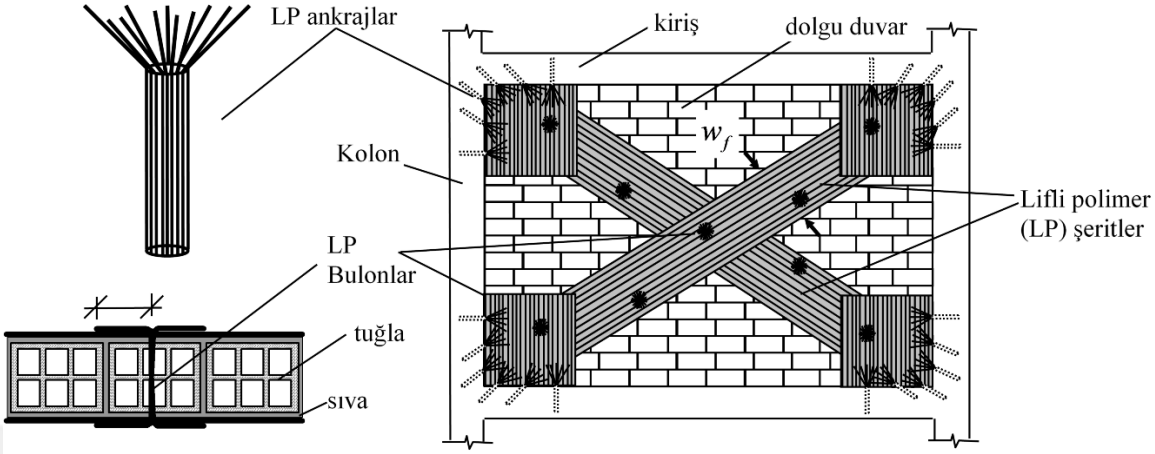


Şekil 5.24: Dolgu Duvarların Hasır Çelik Donatılı Özel Sıva ile Güçlendirilmesi

- DOLGU DUVARLARININ LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ: Uzunluğunun yüksekliğine oranı 0.5 ile 2 arasında olan dolgu duvarlarının rijitliği ve kesme dayanımı, duvar yüzüne uygulanan lifli polimerler (LP) ile arttırılabilir.

TBDY-2018 ilgili bölümlerde de verildiği gibi dolgu duvar davranışının eşdeğer çubuk yaklaşımı ile tanımlanabilmesi için birçok parametre sunulmuştur. Bu çalışmada, TRCC plaklar

ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar da lifli polimerler için EK-15C'de verilen basınç ve çekme çubukları çifti ile temsil edilecektir.



Şekil 5.25: Dolgu Duvarların Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesi

Eşdeğer basınç çubuğu modeli için gerekli parametreler TBDY-2018 EK-15C'de aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

(a) Rijitlik: Eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı güçlendirilmiş dolgu duvarının kalınlığına eşittir. Basınç çubuğu genişliği Denklem (5.1)'den hesaplanacaktır.

$$a_d = 0.175\,(\lambda_d\, h_k)^{-0.4}\, r_d \qquad (5.1)$$

Burada ad çubuk genişliği (mm), hk kolon boyu (mm), rd dolgu duvarı köşegen uzunluğudur (mm). λd ise Denklem (5.2)'den hesaplanacaktır.

$$\lambda_d = \left[\frac{E_d\, t_d \sin 2\theta}{4 E_c\, I_k\, h_d}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (5.2)$$

Ed ve Ec dolgu duvarı ve çerçeve betonunun elastisite modülü, td ve hd güçlendirilmiş duvarının kalınlığı ve yüksekliği (mm), Ik kolonun atalet momenti (mm4) ve θ köşegenin yatay ile olan açısıdır.

Köşegen basınç çubuk elemanının eksenel rijitliği ise Denklem (5.3) ile hesaplanacaktır.

$$k_d = \frac{a_d\, t_d\, E_d}{r_d} \qquad (5.3)$$

(b) Kesme Dayanımı: Hasır donatı ile güçlendirilen dolgu duvarın kesme dayanımı, köşegen çubuğun eşdeğer basınç kuvveti dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilecektir. Yatay kesit alanı Ad, basınç dayanımı fd ve kayma dayanımı τd olan güçlendirilmiş dolgu duvarın kesme kuvveti dayanımı Vd, Denklem (5.4) ile hesaplanacaktır.

$$V_d = A_d(\tau_d + f_{yd}\rho_{sh}) \leq 0.22\, A_d\, f_d \qquad (5.4)$$

Burada fyd hasır donatının tasarım akma dayanımı, ρsh ise duvardaki yatay gövde donatılarının duvar brüt enkesit alanına oranıdır. Hasır donatı yatay ve düşey doğrultularda aynı donatı alanına sahip olmalıdır.

(c) Çekme Çubukları: Çekme çubuğunun çekme dayanımı Tf Denklem (5.5) ile hesaplanacaktır.

$$T_f = 0.003\, E_f\, w_f\, t_f \qquad (5.5)$$

Çekme çubuğunun kesme dayanımı, çekme dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilecektir. Çekme çubuğunun eksenel rijitliği, Denklem (5.6) ile hesaplanacaktır.

$$k_t = \frac{w_f\, t_f\, E_f}{r_d} \qquad (5.6)$$

Bu denklemlerde Ef, wf ve tf sırasıyla lifli polimer şeritin elastisite modülü, genişliği ve kalınlığı, rd dolgu duvar köşegen uzunluğudur. wf değeri Denklem (5.1) ile hesaplanan genişlikten daha büyük alınamaz.

(d) Malzeme Özellikleri: Yukarıda verilen denklemlerde Ed, fd ve τd için çeşitli tuğla türlerinden yapılan dolgu duvarlarında önerilen değerler Denklem (5.7)'de verilmiştir. Elastisite modülünün, basınç ve kesme dayanımlarının hesaplanmasında güçlendirilmiş duvarın kompozit kesit yapısı dikkate alınabilir. Bu çalışmada boşluklu tuğla kullanıldığı için sadece boşluklu tuğla için değer verilmiştir.

Boşluklu fabrika tuğlası: *E*d = 2000 MPa; *f*d = 3.0 MPa; τd = 0.20 MPa (5.7)

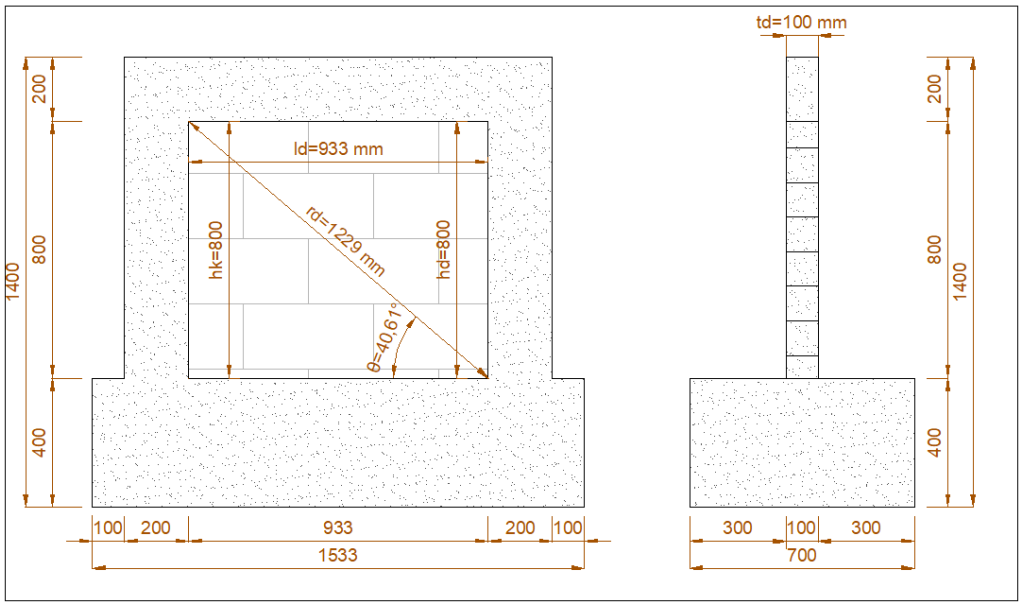
Yukarıdaki formülasyonlarda kullanılacak rakamsal değerler, güçlendirilmemiş dolgu duvar için Tablo 5.9'da, güçlendirilmiş dolgu duvar için ise Tablo 5.11'de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş dolgu duvarlar için eşdeğer basınç çubuğu değerleri bulunmuştur. Malzeme değerleri için '**2.3 KULLANILAN**

MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ' bölümünde verilen değerler ile yönetmelikteki yaklaşık olarak verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 5.9: Güçlendirilmemiş dolgu duvarın analitik parametreleri.

Değişken	Açıklama	Değer
E_c	Çerçeve betonunun elastisite modülü	30600 MPa
f_c	Çerçeve betonunun basınç dayanımı	27,1 MPa
E_d	Dolgu duvarı elastisite modülü	4480 MPa
f_d	Dolgu duvarı basınç dayanımı (%50)	3,30 MPa
t_d	Duvar kalınlığı	100 mm
h_d	Duvar yüksekliği	800 mm
l_d	Duvar uzunluğu	933 mm
t_s	Sıva harcı kalınlığı (Her iki yüz için ayrı ayrı)	10 mm
l_s	Sıva uzunluğu	933 mm
f_s	Sıva harcı basınç dayanımı	6,54 MPa
θ	Köşegenin yatay ile olan açısı (derece)	40,61°
I_k	Kolon atalet momenti (100x200) (mm^4)	66666666,67 mm^4
h_k	Kolon yüksekliği (mm)	800 mm
r_d	Dolgu duvarı köşegen uzunluğu (mm)	1229 mm

Yukarıda verilen (5.1), (5.2) ve (5.3) formüller ile Tablo 5.9'da verilen değerler kullanılarak güçlendirilmemiş dolgu duvar için bilgisayar modelinde kullanılacak eşdeğer basınç çubuğu genişliği ile eksenel rijitliği bulunmuştur.



Şekil 5.26: Dolgu Duvarların analitik parametreleri.

Yukarıda verilen (5.1), (5.2) ve (5.3) formüller ile Tablo 5.11'de verilen değerler kullanılarak TRCC ile güçlendirilmiş dolgu duvar için bilgisayar modelinde kullanılacak eşdeğer basınç çubuğu genişliği ile eşdeğer basınç çubuğu eksenel rijitliği değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 5.10: Güçlendirilmemiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri.

Değişken	Açıklama	Değer
λ_d	Boyutsuz etkileşim katsayısı	0,00281
a_d	Eşdeğer basınç çubuğu genişliği	154,25 mm
k_d	Eşdeğer basınç çubuğu eksenel rijitliği	56227 N/mm

Güçlendirmede iki çeşit kompozit (2 ve 4 katmanlı) kullanıldığı için her iki kompozit çeşidiyle güçlendirilen duvar için eşdeğer basınç çubuğu genişliği ve eşdeğer basınç çubuğu eksenel rijitliği ayrı ayrı bulunmuştur.

Tablo 5.11: Güçlendirilmiş dolgu duvarın analitik parametreleri.

Değişken	Açıklama	Değer
E_c	Çerçeve betonunun elastisite modülü	30600 MPa
f_c	Çerçeve betonunun basınç dayanımı	27,1 MPa
E_d	Dolgu duvarı elastisite modülü	4480 MPa
f_d	Dolgu duvarı basınç dayanımı (%50)	3,30 MPa
t_d	Duvar kalınlığı	100 mm
h_d	Duvar yüksekliği	800 mm
l_d	Duvar uzunluğu	933 mm
t_k	Kompozit yapıştırma harcı kalınlığı (Her iki yüz için ayrı ayrı)	5 mm
l_k	Kompozit yapıştırma harcı uzunluğu	933 mm
f_k	Kompozit yapıştırma harcı basınç dayanımı	41,60 MPa
t_p	Kompozit plaka kalınlığı (mm) (2 ve 4 katman için ayrı ayrı)	4 ve 8 mm
l_p	Kompozit plaka uzunluğu	933 mm
f_p	Kompozit plaka basınç dayanımı	50,70 MPa
E_p	Kompozit plaka harcı elastisite modülü	23298 MPa
ρ_a	Ağın (AR-Glass) plaka içindeki hacimsel oranı	3,13 %
f_a	Ağın (AR-Glass) kopma dayanımı	1303,1 MPa
E_a	Ağın (AR-Glass) elastisite modülü	58760 MPa
E_{trcc}	Ağ ve matrisin oluşturduğu kompozitin (TRCC) elastisite modülü	24408 MPa
θ	Köşegenin yatay ile olan açısı (derece)	40,61°
I_k	Kolon atalet momenti (100x200) (mm^4)	66666666,67 mm^4
h_k	Kolon yüksekliği (mm)	800 mm
r_d	Dolgu duvarı köşegen uzunluğu (mm)	1229 mm

Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için bulunan eşdeğer basınç çubuğu eksenel rijitlikleri değerlerinin güçlendirilmemiş dolgu duvar için bulunan değer ile karşılaştırma yapıldığında 2 katmanlı kompozit için hesaplanan eşdeğer basınç çubuğu eksenel rijitliğinin yaklaşık %246 oranında bir artış olduğu görülmüştür. 4 katmanlı kompozit ile güçlendirilmiş dolgu duvar için hesaplanan eksenel rijitlik değeri için ise yaklaşık %283 oranında bir artış olmuştur. Artış değerlerine bakıldığında güçlendirilme işleminin duvarların rijitliğini önemli oranda arttırdığı net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.27).

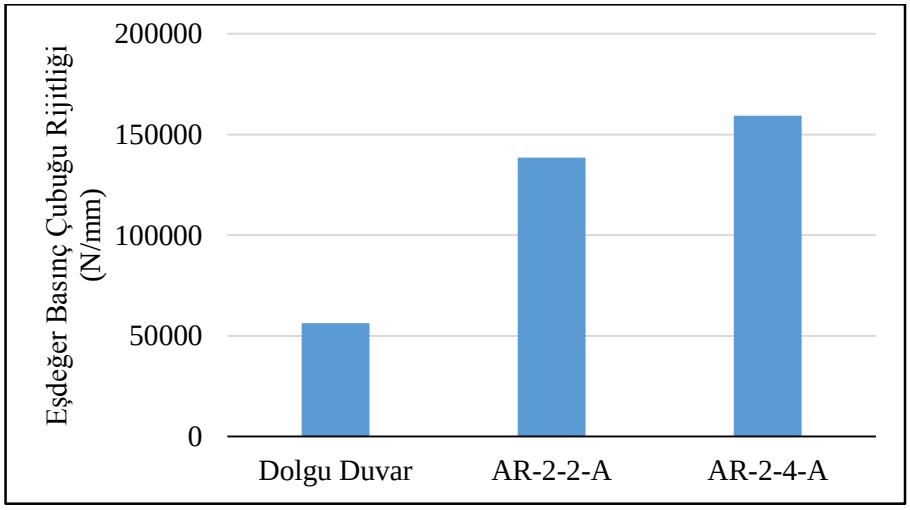
Tablo 5.12: 2 katmanlı kompozit ile güçlendirilmiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri.

Değişken	Açıklama	Değer
λ_d	Boyutsuz etkileşim katsayısı	0,00319
a_d	Eşdeğer basınç çubuğu genişliği	147,87 mm
k_{d2k}	Sadece güçlendirmeden gelen eksenel rijitlik	82229 N/mm
k_{d2kt}	Eşdeğer basınç çubuğu toplam eksenel rijitliği	138456 N/mm

Tablo 5.13: 4 katmanlı kompozit ile güçlendirilmiş dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu değerleri.

Değişken	Açıklama	Değer
λ_d	Boyutsuz etkileşim katsayısı	0,00339
a_d	Eşdeğer basınç çubuğu genişliği	144,20 mm
k_{d4k}	Sadece güçlendirmeden gelen eksenel rijitlik	105723 N/mm
k_{d4kt}	Eşdeğer basınç çubuğu toplam eksenel rijitliği	159398 N/mm

Bu değerler, bir sonraki aşamada bilgisayar modeli için dolgu duvar yerine tanımlanacak eşdeğer basınç çubukları için kullanılacak ve yapısal analiz sonucunda gerçek bir yapıdaki davranışlarına bakılacaktır. Yapısal analizde duvarlar eşdeğer basınç çubukları ile temsil edilecektir.



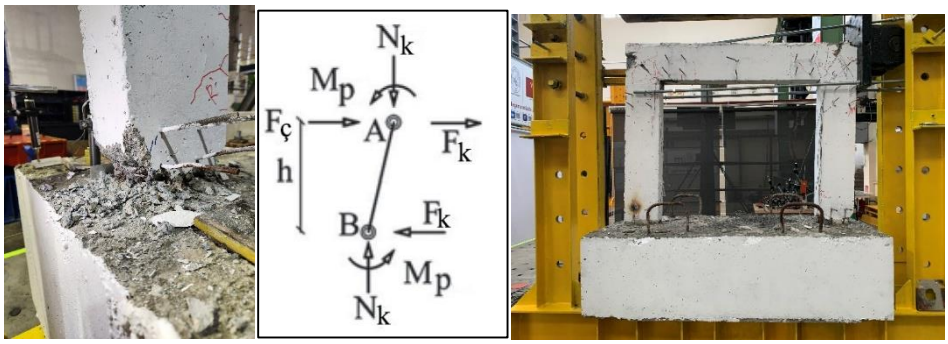
Şekil 5.27: Eşdeğer basınç çubuğu rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.

TBDY-2018'de ilgili bölümde verilen değerlerin yanında, analitik çalışmalar için kullanılan ve doğrusal analiz yöntemine göre analitik yaklaşım sunan Fema 306 (Evaluation Of Earthquake Damaged Concrete And Masonry Wall Buildings) dokümanından da yararlanılmıştır. FEMA (Federal Emergency Management Agency) – Amerika Birleşik Devletleri Federal Acil Durum Yönetim Ajansı – kurumudur. Bu kurum tarafından yayınlanan ve 'Deprem Sonrası Hasar Gören Beton ve Yığma Binaların Değerlendirilmesi' rehberi olarak kullanılan FEMA-306, 2000 yılı haziran ayında son hali verilerek kullanılmaya başlanmıştır.

FEMA 306, rijitlik ve dayanım kaybının modellenmesinde aşağıdaki yöntemleri önermektedir:

- Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modeli
- Yük-deplasman eğrisine dayalı rijitlik azalma katsayıları
- Elastoplastik moment-rotasyon bağıntıları
- Plastik mafsal kesme kuvveti hesabı: $F_{ç} = \frac{4 \cdot M_p}{h}$

Kakaletsis ve Karayannis (2008), FEMA 306'da verilen duvarlardaki hasar durumuna ve analitik yaklaşım yöntemi için verilen bu formülasyonlara bağlı kalarak betonarme çerçeveler için göçme mekanizmaları önermişlerdir. Bu yaklaşımla çerçevelerin maksimum yatay yük taşıma kapasitelerini analitik olarak hesaplayabilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Sonuçların oldukça yakınsak olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada deneysel aşamada anlatılan betonarme çerçeveler için de bu veriler kullanılarak çerçevelerin maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri analitik yaklaşımla hesaplanacaktır. Analitik olarak çerçevelerin maksimum yatay yük taşıma kapasitelerini hesaplayabilmek için çerçevelere uygun davranış modelinin belirlenmesi, bunun için de tersinir tekrarlı yükler altında test edilen çerçevelerin deney sonu göçme durumlarının (mekanizmalarının) incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.28: Çıplak çerçevenin göçme mekanizması.

Çıplak çerçevenin göçme durumu incelendiğinde, kolonların kiriş ve temelle birleştiği düğüm noktalarında yoğun bir şekilde çatlakların oluştuğu ve bu bölgelerde oluşan plastik

mafsallaşmaların gelişimi açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yalın çerçevenin göçme mekanizmasında, kolonların alt ve üst uçlarında plastik mafsallaşma oluştuğu kabulü yapılacaktır (Şekil 5.28).

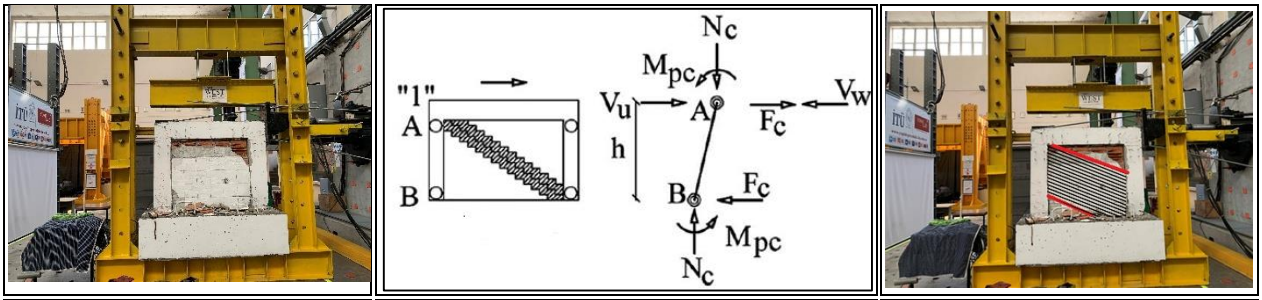
Bu göçme mekanizmasına göre çerçevenin eğilme dayanımı Fema 306'da verilen yaklaşımla ($F_ç$), AB kolonunda A noktasında oluşan moment ve yatay yöndeki denge durumu göz önüne alınarak hesaplanmaktadır (5.8).

$$F_ç = 4 \cdot M_p / h \tag{5.8}$$

Bu bağıntıda M_p, eksenel yük etkisi altında kolonun plastik moment taşıma kapasitesi, h ise moment koludur. Bu değer duvar yüksekliğinden (H), plastik mafsal uzunluğunun (l_p) çıkarılması ile bulunmuştur (5.9). Plastik mafsal uzunluğu, çalışan doğrultudaki kesit boyutunun (kesitin eğilmeye dik olan kenarının) yarısı kadar alınmaktadır (TBDY - 2018).

$$h = H - l_p \tag{5.9}$$

Dolgu duvarlı çerçevesinin göçme durumu, kolonların temelle birleştiği noktalarda plastik mafsallaşma oluşmasıyla birlikte çerçeve içindeki dolgu duvarın da yatay yük taşıma kapasitesinin sonuna ulaşıp göçmesi sonucu gerçekleşmiştir. Göçme mekanizmasında kirişle dolgu duvar arasında önemli bir kesme kuvveti transferi olmadığı varsayılmıştır (Şekil 5.28).



a	b	b

Şekil 5.29: Dolgu Duvarlı çerçevenin a) Deney sonu hasar durumu, b) Göçme mekanizması, c) Benzeşik durum.

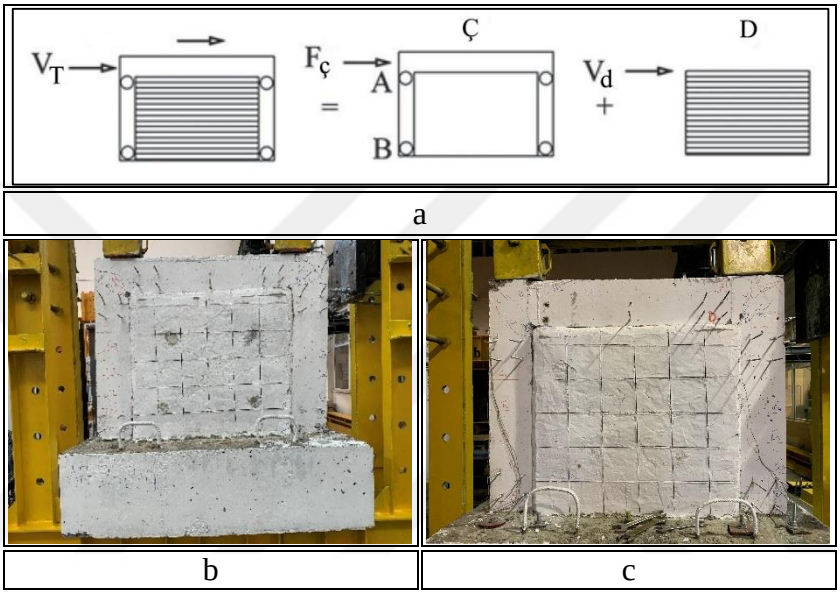
Bu duruma göre AB kolonunun A noktasında oluştuğu varsayılan moment sonucunda, her bir kolondaki kesme kuvveti (F_k) ve eksenel yük etkisi altında kolonlardaki plastik moment taşıma kapasitesi M_p hesaplanmıştır (5.10):

$$F_k \cdot h = 2 \cdot M_p \tag{5.10}$$

Çerçevenin yatay doğrultudaki denge durumunun göz önüne alınmasıyla aşağıdaki bağıntı ortaya çıkmıştır (5.11):

$$V_T = V_d + 2F_k = V_d + 4 \cdot M_p / h \tag{5.11}$$

Bu bağıntıda geçen V_d, köşegen çubuğun eşdeğer basınç dayanımının yatay bileşenidir (TBDY-2018, FEMA 306 - 1999).



Şekil 5.30: Güçlendirilmiş çerçevelerin göçme mekanizması. b) AR-2-2-A çerçevesi deney sonu hasar durumu, c) AR-2-4-A çerçevesi deney sonu hasar durumu.

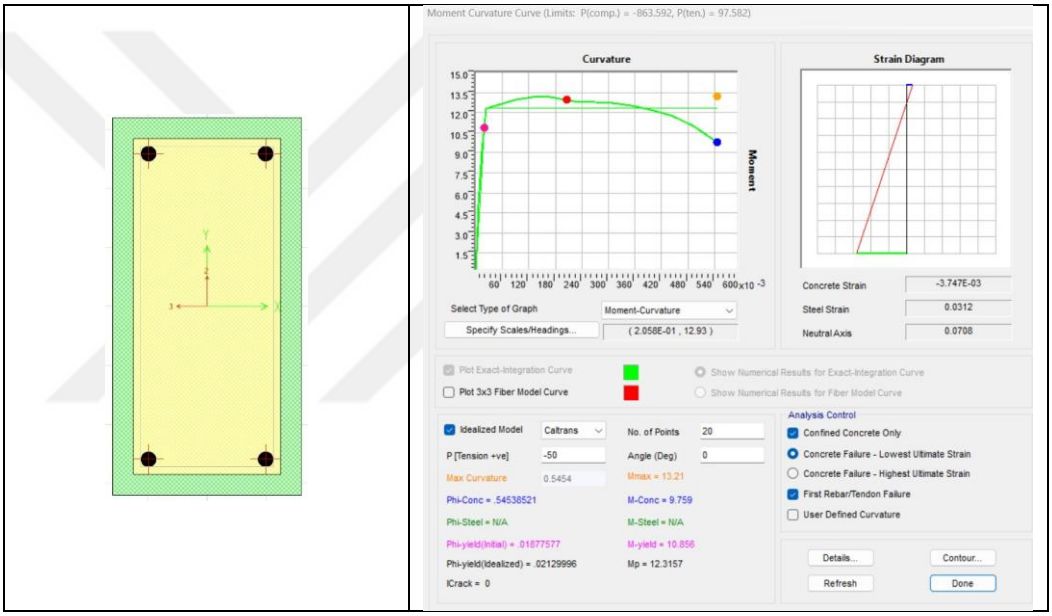
Son olarak çimento esaslı kompozitlerle (TRCC) güçlendirilmiş AR-2-2-A ve AR-2-4-A çerçevelerinin göçme durumları incelenmiş ve göçme mekanizmaları belirlenmiştir. Deneysel sürecin sonunda her iki numunenin aldığı hasar durumu Şekil 5.30' da verilmektedir. Burada da görüldüğü gibi her iki güçlendirilmiş numune de betonarme çerçevenin hasar alması sonucunda göçme oluşmuştur. Her iki numunede de kolon-kiriş birleşimleri ile kolon-temel birleşimlerinde meydana gelen hasarlar görülmüş ve göçme durumu bu alanların akması sonucunda oluşmuştur. Dolayısıyla analitik yaklaşım yönteminde, güçlendirilmiş dolgu duvarlı bu çerçevelerde, betonarme çerçeve ve dolgu duvar, basınç etkisi altında olan köşelerde yer değiştirme uyumluluğu olan birbirine paralel sistemler olarak dikkate alınmıştır (Kakaletsis, 2012).

$$V_T = V_d + F_ç \tag{5.12}$$

Bunun sonucunda yatay etkilere karşı toplam dayanım, yalın çerçevenin eğilme dayanımını ve duvarın kesme kayması dayanımını toplamak suretiyle elde edilebilir (5.12).

Duvarın karşıladığı kesme kayması dayanımı hesaplanırken üzerindeki sıva ve TRCC güçlendirme sistemi de (güçlendirme harcı ve kompozit plaka) hesaba katılmıştır (TBDY – 2018, FEMA 306 – 1999, FEMA 356 – 2000).

Betonarme çerçevede oluşan plastik moment taşıma kapasitesi M_p, SAP 2000 v23.01 bilgisayar programının section designer bölümünde, kolon kesitlerinin, malzeme özelliklerinin ve 50 kN eksenel yükünün tanımlanmasıyla elde edilmiştir (Şekil 5.30). Kolon plastik moment değeri 12.32 kN.m olarak bulunmuştur



Şekil 5.31: Sap 2000 ile hesaplanan M_p değeri.

Tablo 5.10'da deney çerçevelerinin maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri bu bölümde bahsedilen TBDY-2018 ve FEMA 306 bağıntılar kullanılarak ve Kakaletsis (2012) tarafından önerilen hasar mekanizmalar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.14: Deney çerçevelerinin analitik tahmin dayanım tablosu (D. Kakaletsis 2012).

Numune	Çıplak Çerçeve	Dolgu Duvarlı	AR -2-2-A	AR -2-4-A
Kolonun Plastik Momenti, M_p (kN.m))	12.32	12.32	12.32	12.32
Duvar Yüksekliği, H (m)	0.80	0.80	0.80	0.80
Plastik Mafsal Boyu, l_p (m)	0.05	0.05	0.05	0.05
$h = H - l_p$ (m)	0.75	0.75	0.75	0.75
Eşdeğer Basınç Çubuğunun Genişliği, a_d (m)	-	0.154	-	-
Duvar (Tuğla) Kalınlığı, t_d (m)	-	0.1	0.1	0.1
Sıva Harcının Kalınlığı, t_s (m)	-	0.02	-	-
Kompozit Yapıştırma Harcı, t_k (m)	-	-	0.01	0.01
Kompozit Plaka Kalınlığı, t_p (m)	-	-	0.004	0.008
Duvarın Basınç Dayanımı (TBDY), f_d (MPa)	-	3.00	3.00	3.00
Sıva Harcının Basınç Dayanımı, f_s (MPa)	-	6.54	-	-
Kompozit Yapıştırma Ha. Basınç Day., f_k (MPa) (Balcı, 2023)	-	-	41.60	41.60
Kompozit Plaka Basınç Dayanımı, f_p (MPa)	-	-	50.70	50.70
Köşegen Açısı $\Theta = (H/l)^{-1} \rightarrow (\cos\Theta = 0.75)$	-	40.61	-	-
Duvar Uzunluğu, l_d (m)	-	0.993	0.993	0.993
Sıva Harcının Uzunluğu, l_s (m)	-	0.993	-	-
Kompozit Yapıştırma Harcının Uzunluğu, l_k (m)	-	-	0.993	0.993
Kompozit Plaka Uygulanma Uzunluğu, l_p (m)	-	-	0.993	0.993
Duvarın Kompozit Kesit Alanı, A_d (m^2)	-	-	0.119	0.126
Duvarın Kayma Dayanımı (TBDY-2018), τ_d (MPa)	-	-	0.2	0.2
Kompozit Yapıştırma Harcı Kayma Day. $(0{,}167\sqrt{f_k})$, τ_k (MPa)	-	-	1.08	1.08
Kompozit Plaka Kayma Dayanımı, $(0{,}167\sqrt{f_k})$, τ_p (MPa)	-	-	1.19	1.19
AR-Glass Ağın Hacimsel Oranı, ρ_a (%)	-	-	3.13	3.13
AR-Glass Ağın Kopma Dayanımı, f_a (MPa) (Daşkıran, 2018)	-	-	1303.10	1303.10
Çerçeve Dayanımı- $F_ç = 4M_p / hd$ (kN)	65.71	65.71	65.71	65.71
Duvar Dayanımı				
Basınç Göçmesi $V_{d,b} = a_d.t_d.f_d.\cos\Theta$ (kN)	-	34.65	-	-
Sıva Harcının Kesme Göçmesi $V_{s,b} = a_d.t_s.f_s.\cos\Theta$ (kN)	-	15.11	-	-
Duvar Kesme Göçmesi, $V_{d,k} = \tau_d.t_d.l_d$ (kN)	-	-	18.66	18.66
Kompozit Yapıştırma Har. Kesme Göçmesi, $V_{k,\,k} = \tau_k.t_k.l_k$ (kN)	-	-	10.08	10.08
Kompozit Plaka Kesme Göçmesi, $V_{p,k} = \tau_p.t_p.l_p$ (kN)	-	-	4.44	8.88
AR-Glass Ağ. Taşıdığı Kesme Kuvveti, $V_{a,k} = \rho_a.f_a.t_p.l_p$ (kN)	-	-	152.20	304.55
$V_d = V_{d,k} + V_{p,k} + V_{k,k} + V_{a,k} \leq 0.22 A_d f_d$	-	-	185.38 ≥ 78.54	342.17 ≥ 83.16
Dolgu Duvarlı Çerçeve Dayanımı				
$V_T = F_ç + V_{d,b} + V_{s,b}$ veya $V_T = F_ç + V_d$ (kN)	65.71	115.47	144.25	148.87
Deneyde Elde Edilen Dayanım, $V_{deneysel}$ (kN)	73.51	99.54	125.61	124.25
Dayanım Oranları, $V_{deneysel} / V_T$	1.11	0.86	0.87	0.84

5.2.2. Analitik Model

Tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit (TRCC) sistemler, mevcut yapıların deprem güvenliğini artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi güçlendirme çözümlerinden olup hala geliştirilmeye ve üstünde çalışılmaya devam edilen güçlendirme malzemeleridir. TRCC gibi tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitler ile güçlendirilen mimari amaçlı bölme veya dolgu duvarlar, yapının statik sistemine ilave rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi kazandırır. Bu değerlerin deneysel çalışmalar sonucunda yapılan değerlendirmelerle ortaya çıktığı ve neredeyse kesinleştiği bilinmektedir. Bu tür çimento esaslı kompozitler ile ilgili daha önceki deneysel çalışmalardan birkaç örnekle açıklanabilir.

Örneğin Özkan (2012) ön numune olarak 10 adet 755 mm x 755 mm boyutlarındaki bölme duvar numunesi diyagonal kayma etkisi altında denemiş ve CMG (Cam elyaf takviyeli çimento esaslı kompozit) ile farklı şekillerde güçlendirilmiş numunelerin kayma dayanımlarına ve rijitliklerine etkisini incelemiştir. Çıkarılan sonuçlara bakıldığında, CMG ile güçlendirilmiş numunelerin şahit numunelere göre kayma gerilmesi, kayma şekil değiştirmesi ve kayma modüllerinde önemli derecede artışlar olmuştur. İkinci aşamada 6 adet 1/3 ölçekli tek katlı ve tek açıklı betonarme çerçeve numunesi tekrarlı yatay yükler etkisinde denemiştir. Birer adet dolgu duvarsız (yalın/çıplak çerçeve) ve dolgu duvarlı betonarme çerçeve referans numuneleridir. Diğer 4 adet betonarme çerçeve numunesi CMG ile farklı şekillerde güçlendirilmiş ve bu farklı güçlendirme şekilleri ile bağlantı detaylarının etkisi referans numuneleriyle karşılaştırılarak incelemiştir. Betonarme çerçeve numunelerinin deneysel verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yer değiştirmesi eğrileri, zarf eğrileri; başlangıç rijitliği ve yatay yük taşıma kapasiteleri gibi parametrelerde referans numunelere göre oldukça olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ökten (2013) lifli çimento esaslı kompozit (CFRC) ile güçlendirilmiş bölme duvarlı betonarme çerçeveler üzerinde bir dizi deneysel çalışma yürümüş ve iki aşamada deneylerini gerçekleştirmiştir. Birinci aşamada 755mmx755mm boyutlarında özel olarak üretilen 15 adet duvar numunesi, 5 grupta 3'er adet duvar numunesi olacak şekilde sınıflandırmıştır. Bu gruplardan 4'ü karbon lifli çimento esaslı kompozitler (CFRC) ile değişik şekillerde güçlendirilmiş, bir grup ise güçlendirilmeyerek kontrol seti olarak bırakmıştır. Deneyler sonucunda duvarlara ait kayma gerilmesi-kayma açısı grafikleri elde edilmiş ve bu grafiklere bağlı olarak duvar kayma rijitliklerindeki değişim incelenmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, CFRC ile güçlendirilen tüm numunelerin kayma dayanımı değerlerinde güçlendirilmeyen kontrol numunelerine göre belirgin bir artış elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, 8 adet 1/3 ölçekli, tek açıklıklı ve dolgu duvarlı betonarme

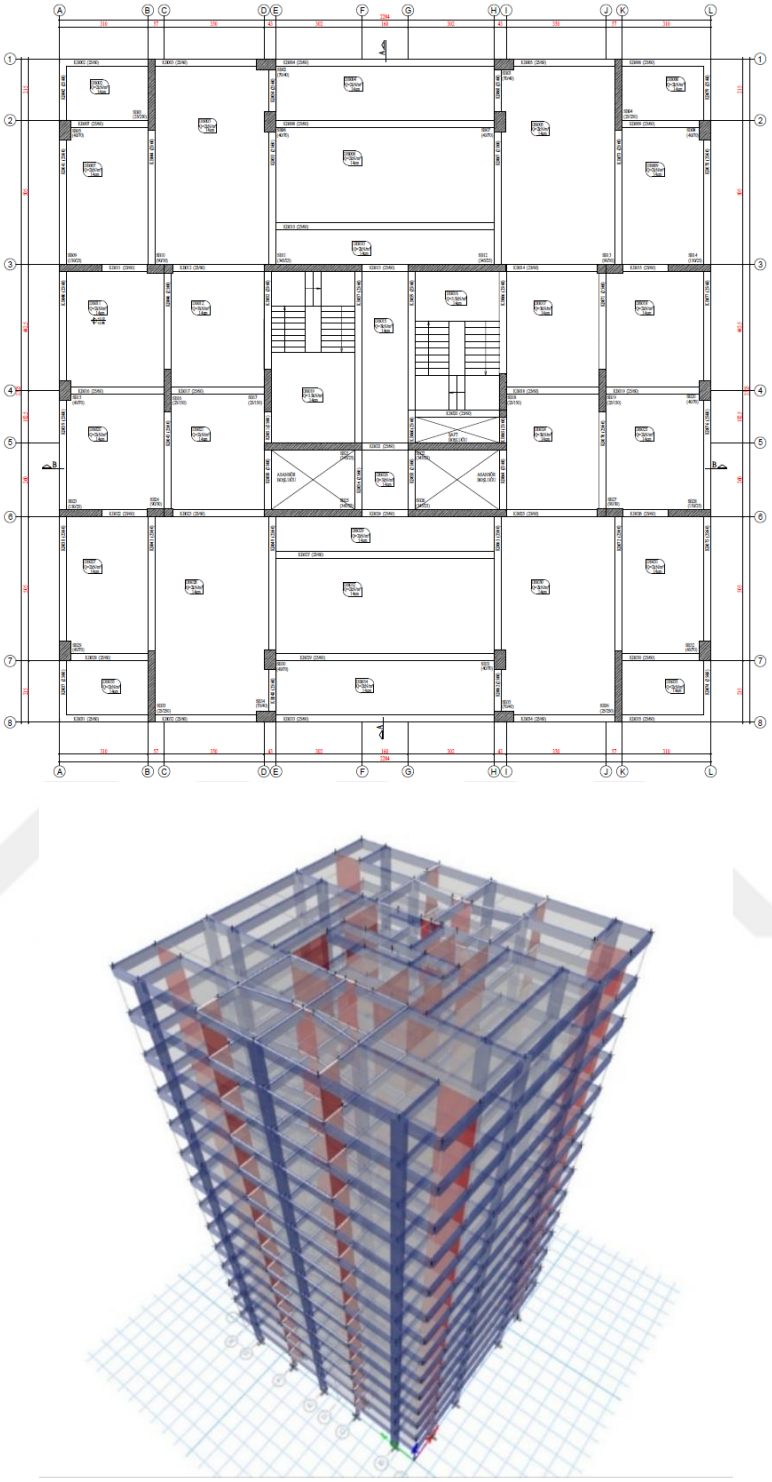
çerçeve tersinir tekrarlı yatay yükler altında test edilmiştir. Çerçevelerden 1 adeti içine dolgu duvar örülmeden kontrol çerçevesi olarak bırakılmış, diğer 7 adet çerçevenin içine ise delikli tuğlalar kullanılarak dolgu duvarlar örülmüştür. Dolgu duvarlı çerçevelerin 6 adeti, dolgu duvarların bir veya iki yüzüne, iki farklı tabakada CFRC güçlendirme malzemesi uygulanarak güçlendirilmiş, 1 adeti ise güçlendirilmemiştir. Bu numuneler, tersinir tekrarlı yükler altında test edilmiş, numunelerin yatay yük taşıma kapasiteleri, rijitliği, hasar seviyeleri ve enerji tüketme kapasiteleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Gür (2017) güçlendirme tekniği olarak çimento esaslı kompozit (TRCC) malzemesi (çimento harcı ve liflerden oluşan kare boşluklu ağ şeklinde özel tekstillerden oluşan kompozit) kullanmıştır. 9 adet 760x760 mm ölçekli bölme duvar numuneleri üretmiştir. Üretilen bu numunelerden bazıları çimento esaslı kompozitlerle (TRCC) güçlendirilmiş ve bu güçlendirme yönteminin dayanıma olan etkisi güçlendirilmeyen şahit numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. İlk aşamada bölme duvarlar üzerine yapıştırılacak kompozit plakalar üretilmiştir. Sonraki aşamada ise boşluklu tuğlalar kullanılarak 760x760 mm boyutundaki duvar numuneleri üretilmiştir. Üretilen TRCC plakalarla farklı şekillerde güçlendirilen bu bölme duvarların şahit numunelere ve birbirlerine göre kayma dayanımlarındaki, kayma şekil değiştirmelerindeki ve kayma modüllerindeki değişmeler (artışlar ve azalışlar) incelenmiştir. Daşkıran (2018) ise 'Çimento Esaslı Kompozitlerden Üretilen Yapı Elemanlarının Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi' adlı doktora tezinde Çalışma kapsamında üç farklı tür tekstil, iki farklı tür matris harcı ile dairesel ve dikdörtgen kesitli içi boş, narin ve üç boyutlu taşıyıcı kompozit elemanlar PPR makinasında üretilmiştir. Üretilen kompozitler ile kalıcı kalıp sistemler oluşturularak 5 adet dairesel, 4 adet dikdörtgen tam ölçekli betonarme kolon imal edilmiştir. Yatay donatı aralığı seyrekleştirilmiş, kompozit kalıcı kalıp numunelerin karşılaştırılacağı ve geleneksel yöntemle üretilen DBYBHY (2007)'e uygun ve uygun olmayan dört adet referans numunesiyle beraber toplamda 13 adet kolon üretilmiştir. Üretilen betonarme kolonlar laboratuvar ortamında sabit eksenel yük ve tersinir tekrarlı yatay yüklemelerle test edilerek betonarme kolonların performansları incelenmiştir. Deneysel sonuçlarla elde edilen dayanım, rijitlik, süneklik, enerji tüketim kapasitesi, yapısal sönüm ve göçme hasarları değerlendirilerek kalıcı kalıp kompozit kolon numunelerin referans numunelere göre performansları belirlenmiştir. Balcı (2023) Tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit olan TRCC kompozit plakalar üretmiş ve bölme duvarlara ilişkin deneylerde denenmek üzere 760 mm x 760 mm boyutlarında 5 adet duvar numunesi ile deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Duvar numunelerinin biri sadece sıvanmış ve şahit numune olarak bırakılmıştır. Bir adedinde 2 kat AR Glass kullanılarak üretilmiş TRCC, diğerinde 4 kat

AR Glass malzeme kullanılarak üretilmiş TRCC, bir diğerinde 6 kat AR Glass malzeme kullanılarak üretilmiş TRCC ve son olarak 8 kat AR Glass malzeme kullanılarak üretilmiş TRCC ile güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Duvar güçlendirme işlemlerinde 15 cm x 15 cm boyutlarında kesilmiş TRCC plakalar kullanmıştır. TRCC plakaları duvar numunelerine yüksek dayanımlı özel harç ile yapıştırmış ve deprem yönetmeliğinin önerdiği ankraj sistemiyle TRCC plakaları duvara ankrajlamıştır. Üretilen numuneler denenerek, taşıdıkları maksimum yükler, hasar düzeyleri, rijitlikleri ve enerji yutma seviyeleri birbiriyle kıyaslanmıştır.

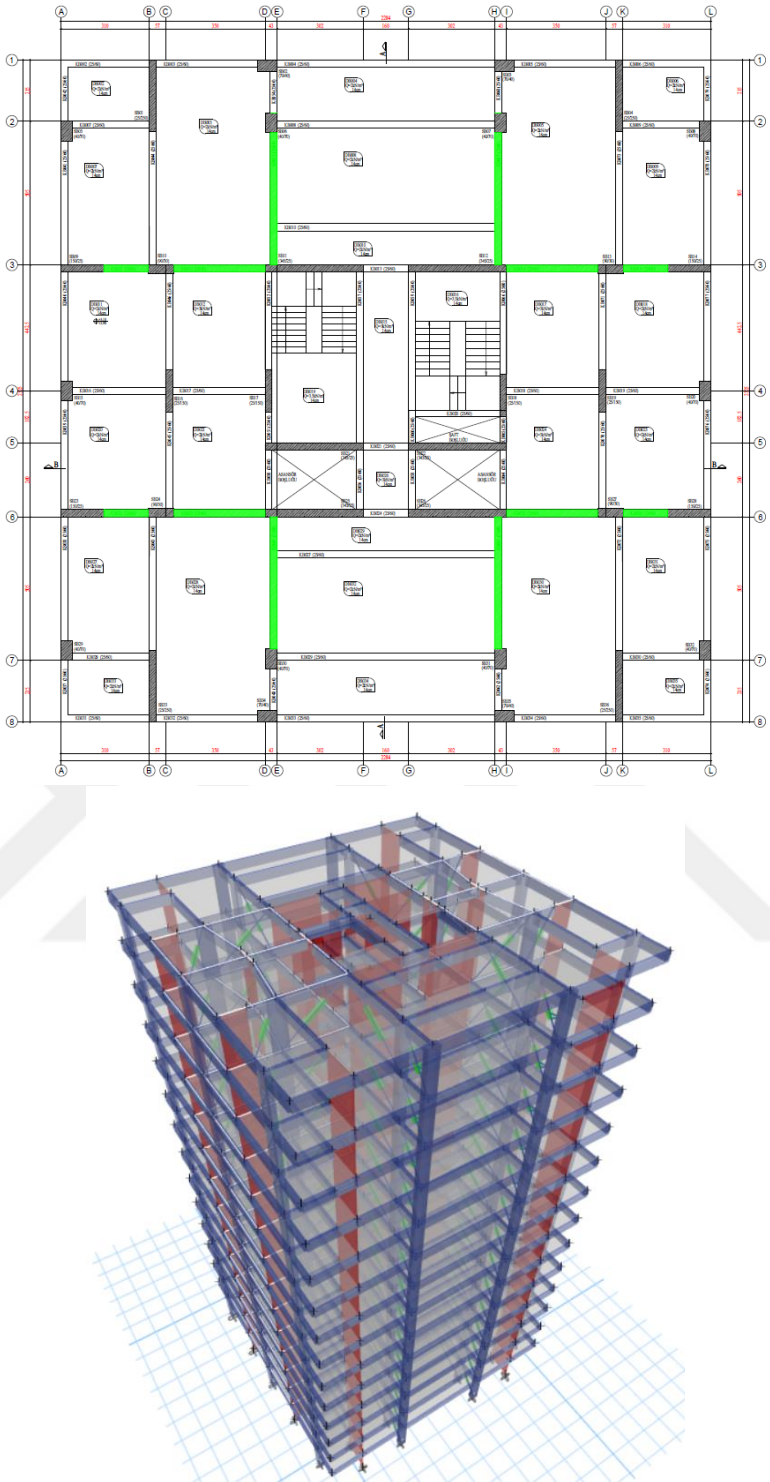
Yukarıdaki bilgiler çerçevesinde, çimento esaslı güçlendirme malzemelerinin tekil ve basite indirgenmiş veya idealize edilmiş duvarlar, çerçeveler ve her ikisinin olduğu durumlarda uygulanmasının olumlu etkisini deneysel olarak ortaya koymaktadır. Ancak bu tür güçlendirme sistemlerinin gerçek ölçülerinde ve mevcut bir yapıya uygulandığı pek yaygın bir çalışma konusu olmamıştır. Elbette bu tür kompozit elemanlarla güçlendirilmiş bir dolgu duvarlı yapı modelinin yapısal analiz programlarında modellenmesi, geleneksel bir yapı modelinin ötesinde bir dikkat gerektirir.

Örneğin 3 boyutlu ve/veya sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapabilen Etabs veya Sap2000 gibi yazılımlarda, bu duvarlar genellikle artırılmış dayanım ve rijitlik özelliklerine sahip eşdeğer basınç çubukları ile temsil edilir. Böylece TRCC gibi güçlendirme uygulamalarının yapı sistemine katkısı sayısal olarak değerlendirilebilir ve farklı deprem senaryoları altında performansları analiz edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma özelinde deneysel aşamada kullanılan TRCC kompozitlerin analitik yöntemle de mevcut yapılara uygulanabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır. İdealize edilmiş dolgu duvar ve güçlendirilmiş dolgu duvarlar dikkate alınarak statik analiz yapabilen bir bilgisayar programına entegre edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için Tekirdağ ili Çorlu ilçesinde çok katlı (14 Kat) mevcut bir bina seçilerek güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Her ne kadar TBDY-2018 EK15C'de 'Eğer binanın güçlendirilmesi esas olarak bölme duvarların güçlendirilmesi ile yapılıyorsa, bu yöntem sadece bodrum hariç en fazla üç katlı binalarda uygulanabilir' uyarısı bulunuyor olsa da bu çalışmada dolgu duvar etkisinin daha net görülmesi ve parametrelerin birbiriyle kıyasının daha kolay olması için hareket edebilme kapasitesi 3 katlı bir yapıya göre daha yüksek olan çok katlı bir bina seçilmiş ve modellenmiştir. Modellenen binaya x ve y yönünde ve her bir durum için (Boş, Dolgu Duvarlı ve Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı) ayrı ayrı itme analizi yapılmıştır.



Şekil 5.32: Mevcut yapının kalıp planı ve Etabs ile modellenmiş 3D görüntüsü.



Şekil 5.33: Mevcut yapı için dikkate alınacak duvar yerleri ve Etabs ile modellenmiş 3D görüntüsü.

Mevcut bina modeli için 3 boyutlu analiz yapabilen Etabs yazılımı kullanılmıştır. Bina kalıp planına uygun olarak programa girilmiş ve mimari projesindeki bilgiler, detaylar ve yükler etkitilmiştir.

Binaya ait kalıp planı ve analiz modeli Şekil 5.32'de verilmektedir. Öncelikle yapı bu plana ve mimari detaylarına uygun olarak modellenmiş ve dolgu duvar durumu dikkate alınmamıştır. Yapı modeli ve dikkat edilen hususlar ileride sunulmuştur.

Mevcut binanın bulunduğu yer, malzeme, kesit ve deprem parametreleri bilgileri aşağıda verilmektedir.

Lokasyon...……: Tekirdağ/Çorlu

Bina Koordinatı (Enlem/Boylam) ……: 41.1641° / 27.8506°

Yerel Zemin Sınıfı.....: ZD

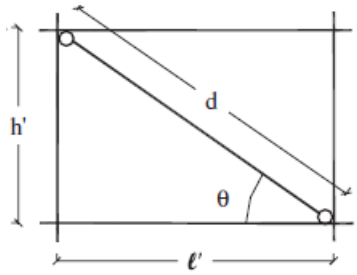
Yerel Spektral İvme Katsayısı.....: S_s/S_1: 0.789 / 0.217

Beton Sınıfı……: 27.1 MPa (Deneysel çerçevelerle aynı beton sınıfı seçildi)

Donatı Sınıfı……...: B420C

Kat Yükseklikleri……..: 310 cm

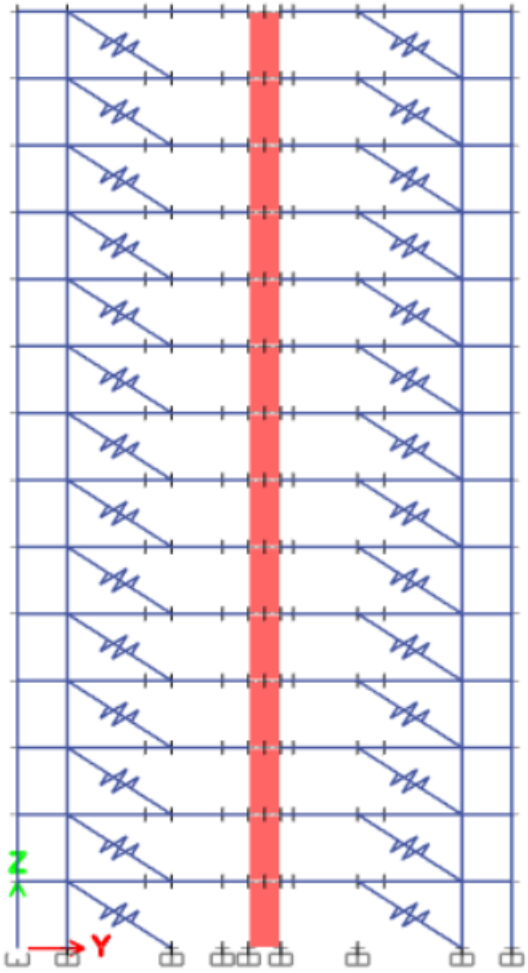
Tüm taşıyıcı elemanlarda minimum donatı oranı dikkate alınmıştır. Taşıyıcı eleman kesitleri için kalıp planından bakılabilir.



Şekil 5.34: Dolgu duvarlar için kullanılan eşdeğer basınç çubuğu modeli.

Bu çalışma kapsamında dört ayrı analiz modeli çalışılmıştır. Analitik yaklaşım bölümünde alt yapısı verilen modelleme durumları deneysel çalışmalarda kullanılan yöntemle paralel bir şekilde seçilmiştir. Bu durumda birinci modelde sadece taşıyıcı elemanlar modellenmiştir. İkinci modelde yapının x ve y yönünde eşit bir şekilde yerleştirilmiş dolgu duvarlar dikkate alınmıştır (Şekil 5.33). Üçüncü modelde duvar yerlerini değiştirmeden duvarlar AR-2-2-A çerçevesinde kullanılan 2 katmanlı TRCC ile güçlendirilmiştir. Son modelde ise yine aynı duvarlar üzerine AR-2-4-A çerçevesinin güçlendirilmesinde kullanılan 4

katmanlı TRCC uygulanmıştır. Bu dört model de x ve y yönünde ayrı ayrı İtme (Pushover) Analizi ile analiz edilmiş ve İtme Eğrileri elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 5.35: Etabs programında dolgu duvarlar için kullanılan eşdeğer basınç çubuğu modeli.

Dolgu duvarların modellenmesinde Eşdeğer Basınç Çubuğu yaklaşımı kullanılmıştır (Şekil 5.34). Güçlendirilmemiş ve 2 farklı şekilde güçlendirilmiş dolgu duvarlar için eşdeğer basınç çubuğu değerleri '5.2.1 Analitik Yaklaşım' bölümünde deneysel çerçeveler için hesaplanmıştır. Mevcut yapıda kullanılan eşdeğer basınç çubukları için mevcut yapının verileri kullanılarak çubuk rijitliği tekrar hesaplanmalıdır. Eşdeğer basınç çubuklarının konulacağı alanlar belirlendikten sonra çubuk rijitlikleri o alanlar için ve o ebatlar için mevcut yapının teknik verileri dikkate alınarak mutlaka hesaplanmalı ve mevcut yapıda o değerler kullanılmalıdır. Ancak burada 2 farklı güçlendirme durumunu aynı veriler üzerinden değerlendirmek için deneysel çerçeveler için hesaplanan eşdeğer basınç çubuğu değerleri kullanılacaktır. Dolgu duvarlar için yapının bilgisayar modelinde eşdeğer basınç çubuğu rijitliği verilebilen link elemanlar tanımlanmıştır. Dolgu duvarlı modellerde kullanılan duvar

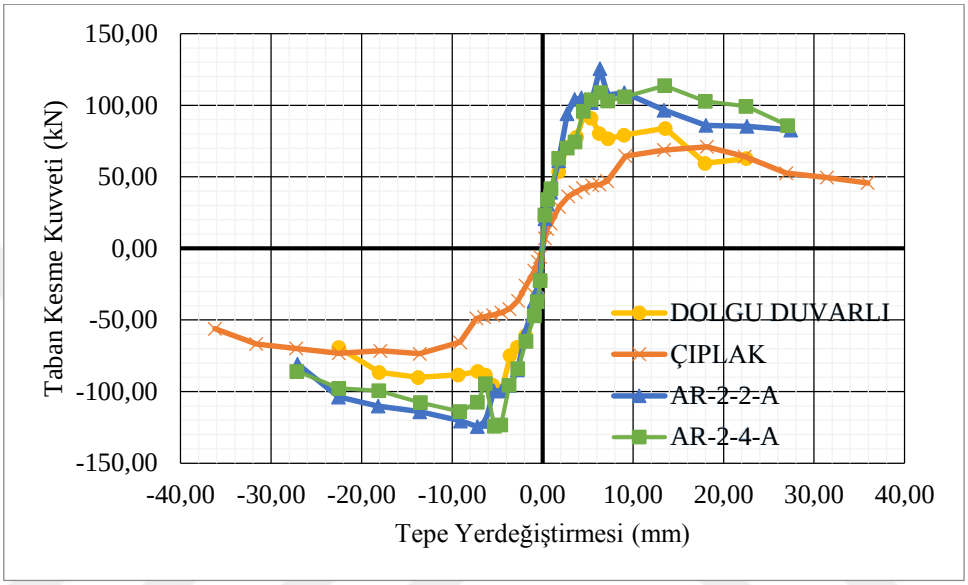
rijitliklerine, güçlendirilmemiş dolgu duvar rijitliği için Tablo 5.10'a, 2 katmanlı kompozit ile güçlendirilen duvar rijitliği için Tablo 5.11'e ve 4 katmanlı kompozit ile güçlendirilen dolgu duvar rijitliği için ise Tablo 5.12'ye bakılacaktır.

Yapılan analiz sonucunda her bir model için x ve y yönü itme eğrileri elde edilmiş ayrıca tüm yapı modelleri için Kat Seviyesi – Kat Ötelenmesi durumlarına bakılmıştır. Elde edilen grafikler ve matematiksel veriler '**6. SONUÇ VE ÖNERİLER**' bölümünde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışma kapsamında dört adet betonarme çerçeve numunesi, detayları yukarıda verilen statik deney prosedürü esas alınarak incelenmiştir. Deneyler, önceden belirlenmiş yük protokolüne uygun olarak ve sabit eksenel yük altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1: Tüm BA çerçeve numunelerinin yatay yük-yer değiştirme ilişkileri.

Numunelerden biri, herhangi bir güçlendirme uygulanmadan yalın (çıplak) betonarme çerçeve olarak hazırlanmıştır. İkinci numune ise dolgu duvarlı ve sıvalı olarak bırakılmıştır; böylece dolgu duvarın yapı davranışına olan etkisi doğrudan gözlemlenebilecektir. Diğer iki numune ise, farklı güçlendirme stratejileriyle TRCC (Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit) plakalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu güçlendirmeler, TRCC plakasının içindeki tekstil katmanına göre çeşitlendirilmiştir.

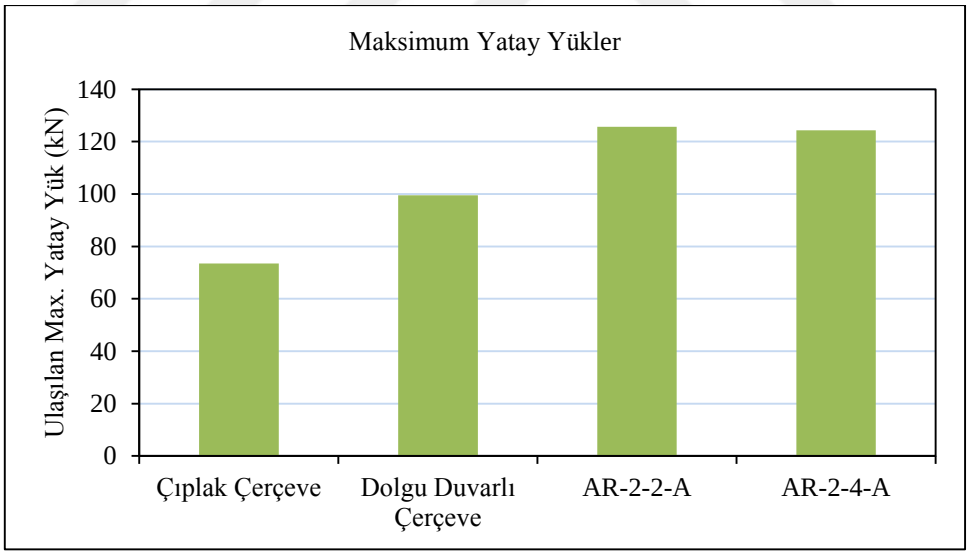
Yapılan deneylerde çıplak ve dolgu duvarlı numuneler, "referans (şahit) numuneler" olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar için temel karşılaştırma noktası olarak kabul edilmiştir. Böylece TRCC ile gerçekleştirilen güçlendirmelerin, yapısal performans üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konması düşünülmektedir.

Deney sonuçları, her bir numunenin yatay yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme davranışı, enerji tüketimi ve çatlak gelişimi gibi mekanik ve deformasyonel parametreler açısından değerlendirilmiştir. Referans numunelerle karşılaştırmalar, güçlendirme tekniklerinin etkinliği, dayanım artışı, rijitlik ve süneklik üzerindeki etkileri hakkında ayrıntılı bilgi

sağlamıştır. Ayrıca, deney boyunca gözlemlenen hasar mekanizmaları ve elde edilen eğriler yardımıyla, güçlendirme uygulamalarının çatlak oluşumundaki rolü ve yapısal bütünlüğe katkısı analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, TRCC ile güçlendirilmiş numunelerin, dolgu duvarlı ve çıplak numunelere kıyasla önemli oranda artan yatay yük taşıma kapasiteleri ve gelişmiş deformasyon kapasiteleri sağladığı; bununla birlikte, enerji tüketiminde ve hasar yayılımında da olumlu etkiler gözlendiği belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler, TRCC güçlendirmelerinin özellikle mevcut betonarme çerçeve yapıların performansını artırmak üzere etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

Öncelikle, deney süresince numunelerin farklı bölgelerine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak, numunelerin yatay yük altında gösterdikleri yer değiştirme tepkileri analiz edilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak, tüm numunelerin yük-yer değiştirme ilişkileri tek bir grafik üzerinde birleştirilmiş ve Şekil 6.1'de sunulmuştur. Böylece, farklı güçlendirme uygulamalarının numunelerin mekanik davranışları üzerindeki etkileri doğrudan karşılaştırılabilmektedir.

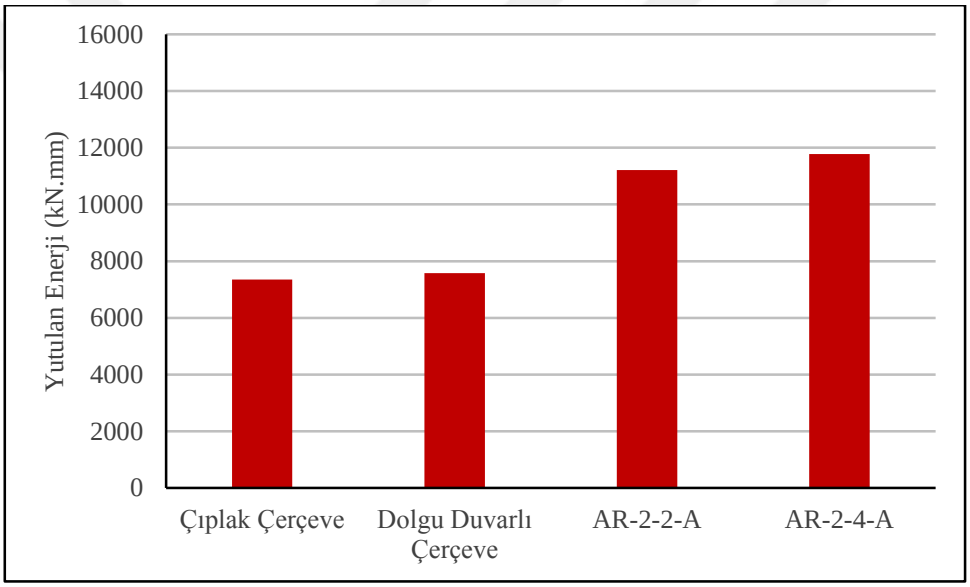


Şekil 6.2: BA çerçeve numunelerinde ulaşılan maksimum yük.

Grafik incelendiğinde, çıplak betonarme çerçeve numunesinin diğer tüm numunelere kıyasla belirgin şekilde daha sünek bir davranış sergilediği ancak yatay yük taşıma kapasitesinin düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çıplak çerçevenin enerji sönümleme kapasitesinin oranla taşıma kapasitesi açısından sınırlı kaldığını göstermektedir.

Buna karşılık, dolgu duvarlı numuneler, özellikle yük taşıma kapasitesi açısından önemli iyileşmeler göstermiştir. Dolgu duvarın çerçeve sistemine sağladığı rijitlik artışı, numunelerin yatay yük taşıma kapasitelerinde kayda değer yükselmeler yaratmıştır. Bu durum, dolgu duvarın yapı sisteminin genel performansını önemli ölçüde geliştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Deneysel sonuçların diğer önemli bir karşılaştırma ölçütü ise, numunelerin ulaştığı maksimum yatay yük değerleri olmuştur. Bu parametre bazında yapılan analiz ve karşılaştırmalar, Şekil 6.2'de yer alan çizelge ile detaylandırılmıştır. Söz konusu çizelge, farklı numunelerin taşıma kapasitelerindeki değişimleri net bir biçimde ortaya koyarak, güçlendirme uygulamalarının etkinliğini göstermektedir.



Şekil 6.3: Çerçeve numunelerinin 14. Çevrimleri sonunda sönümledikleri toplam enerji.

Şekil 6.2'de sunulan verilere göre, çıplak betonarme çerçeve numunesine kıyasla diğer numunelerde ulaşılan maksimum yatay yük taşıma kapasitesinde anlamlı artışlar gözlenmiştir. Çıplak çerçeve numunesinde ulaşılan maksimum yatay yük miktarı 73,51 kN olduğu düşünüldüğünde, Dolgu duvarlı çerçeve numunesinde (99,54 kN) bu artış %35,40 olarak belirlenirken; TRCC ile güçlendirilmiş AR-2-2-A numunesinde (125,61 kN) %70,87 ve AR-2-4-A numunesinde (124,25 kN) %69,02 oranında yükselmiştir. Bu değerler, TRCC plakalar ile yapılan güçlendirmelerin özellikle taşıma kapasitesi üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermekle birlikte, güçlendirme plakaları içindeki katman sayısının bu durumda etkin olmadığını göstermektedir.

Dolgu duvarlı referans numunesi ile kıyaslandığında ise güçlendirilmiş numunelerde maksimum yatay yük değerlerindeki artış daha sınırlı ancak hâlen anlamlı seviyelerde kalmıştır. Her iki güçlendirilmiş numunenin de aynı oranlarda artış gösterdiği görülmüştür. Buna göre, AR-2-2-A numunesinde %26,19 ve AR-2-4-A numunesinde %24,82 oranında artış sağlanmıştır. Bu durum, dolgu duvarın sağladığı rijitliğe ek olarak uygulanan TRCC takviyesinin taşıma kapasitesini daha da artırdığını ortaya koymaktadır.

Bir diğer önemli karşılaştırma parametresi olarak numunelerin deneyler sırasında yuttuğu toplam enerji miktarları incelenmiştir. Şekil 6.3'te sunulan bu veriler, numunelerin sönümleme kapasiteleri hakkında ek bilgiler sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma davranışlarında da benzerlik olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. Kompozit plakalar içindeki tekstile bağlı katman sayısının bu parametrelerde de önemli bir farklılık göstermediği görülmektedir.

Değerlendirmede dikkate alınan önemli bir husus, numunelerin deneylerini farklı çevrim sayılarında tamamlamış olmalarıdır. Bu nedenle, enerji tüketim değerleri karşılaştırılırken en düşük çevrim sayısına (14 tam çevrim) sahip numunenin tamamladığı çevrim sayısı baz alınmıştır. Böylelikle, tüm numunelerin 14 tam çevrim sonunda tükettiği enerji miktarları üzerinden adil bir karşılaştırma yapılmıştır.

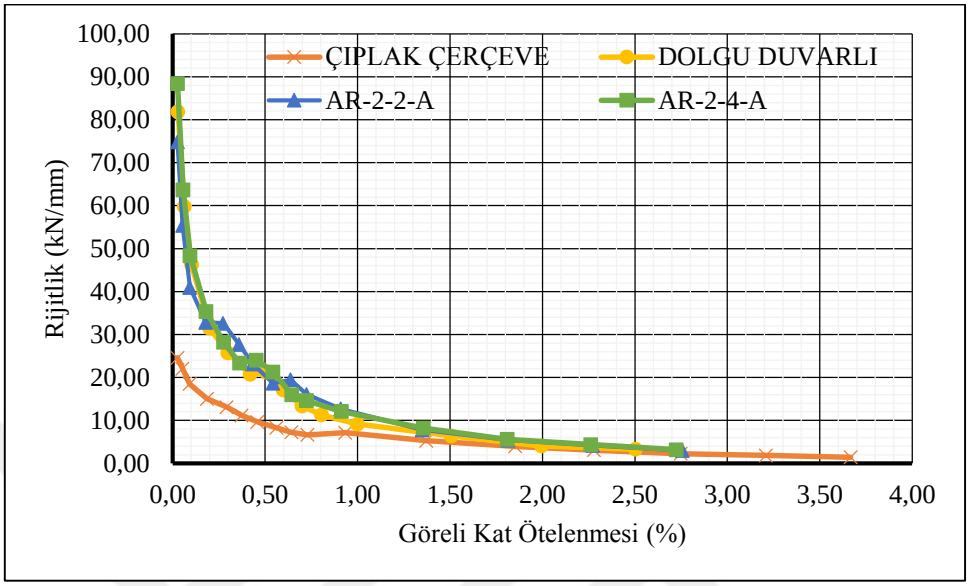
14. çevrim sonunda numunelerin sönümlediği toplam enerji miktarları çıplak çerçeve numunesi için 7350,87 kN.mm, dolgu duvar numunesi için 7580,27 kN.mm, AR-2-2-A numunesi için 11217,83 kN.mm ve AR-2-4-A numunesi için 11776,20 kN.mm olduğu bilinmektedir.

Bu durumda Çıplak Çerçeve numunesi ile kıyas yapıldığında Dolgu Duvar numunesinin %3,12, AR-2-2-A numunesinin %52,61 ve Ar-2-4-A numunesinin %60,20 artış gösterdiği görülmüştür. Dolgu duvardaki enerji sönümleme oranı Çıplak çerçeve ile hemen hemen aynı olduğu ancak güçlendirilmiş numunelerin sönümleme oranlarında büyük artış olduğu görülmektedir.

Öte yandan, dolgu duvarlı çerçeve numunesi ile diğer güçlendirilmiş numuneler arasındaki karşılaştırma yapıldığında, AR-2-2-A numunesinde %47,98, AR-2-4-A numunesinde %55,35 oranlarında enerji tüketiminde artış tespit edilmiştir.

Numunelerin deneysel verilerinin karşılaştırıldığı diğer bir parametre ise çevrimsel bazda rijitlik değişimlerinin izlenmesidir. Bu karşılaştırma parametreleri Şekil 6.4'te

karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir. Bu durumda Çıplak Çerçeve numunesinin hem düşük yatay rijitliğine sahip olduğu hem de hızlı bir şekilde rijitliğini kaybettiği görülmektedir. Diğer 3 numunenin ise başlangıç rijitliğinin oldukça yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.4: Çerçeve numunelerinin yatay rijitlik değişimleri.

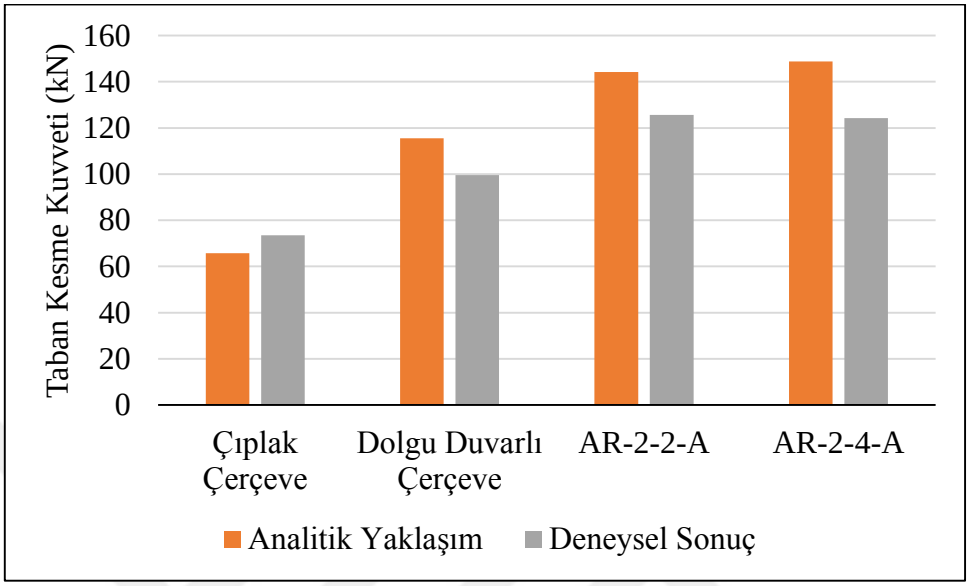
Bu dolgu duvarlı 3 numunenin başlangıç rijitliği aynı değerde olmamakla (oldukça yakın) beraber çevrimsel bazda, paralel bir şekilde ve daha yavaş rijitlik kaybı sergileyerek sistemin çevrimsel dayanımını önemli oranda artırmaktadır. Bu durumda, çerçevelerin içindeki dolgu duvarın güçlendirme durumuna bakılmaksızın başlangıç rijitliği üzerinde ciddi etkiye sahip olduğu açıktır.

6.2. ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

6.2.1. Analitik Yaklaşım Sonuçları

Analitik yaklaşım ile bulunan değerler, deney sonuçları ile kabul edilebilir yakınsaklıkta sonuçlar vermiştir. Yakınsaklık olarak en uzak sonuç AR-2-4-A kodlu numunede görülmüştür. Bu numunede analitik tahmin ile deneysel sonuç arasındaki benzerlik yaklaşık %84 civarında kalmıştır. Bu numunede kullanılan TRCC plakların 4 katmanlı (kompozit plaka içinde 4 kat tekstil bulunmaktadır) olması ve kompozit plaka kalınlığının daha fazla olması deneysel sonuca çok yansımamıştır. Analitik yaklaşıma bakıldığında numunelerin yük taşıma kapasiteleri kendi içinde daha doğru bir görüntü çizmektedir. Deneysel sonuçlara göre matematiksel olarak düşünüldüğünde 4 katmanlı güçlendirilmiş çerçevenin diğerine göre (2 katmanlı) biraz daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olması beklenmektedir. Çünkü numunenin enkesit alanının

kalınlığı arttığından bu durumun yük taşıma kapasitesine olumlu etki edeceği bilinmektir. Anacak yine de kompozit içindeki tekstilin katman sayısı önemli oranda bir etki etmediği görülmekte ve bu durum deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.



Şekil 6.5: Deneysel ve analitik yaklaşım sonuçlarının karşılaştırılması.

6.2.2. Analitik Model Sonuçları

Mevcut bir yapının Etabs bilgisayar programıyla modellenerek dolgu duvarların yapıya etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Modelleme teknikleri ve yapı bilgisi ilgili bölümde bulunmaktadır. Mevcut yapı 4 ayrı durumda modellenmiştir. Bu yapısal modeller şu şekildedir.

Model – 1: Dolgu duvarsız sadece taşıyıcı karkas modeli

Model – 2: Yapının belli yerlerine duvar yerleştirilmiştir (Şekil 5.33). Dolgu duvarlı modeldir.

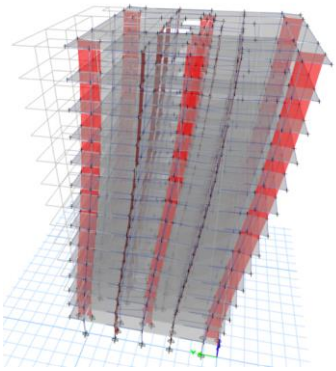
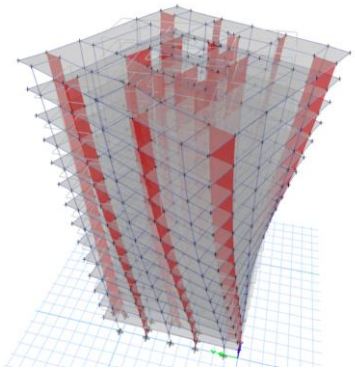
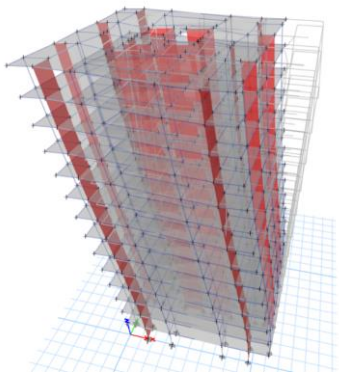
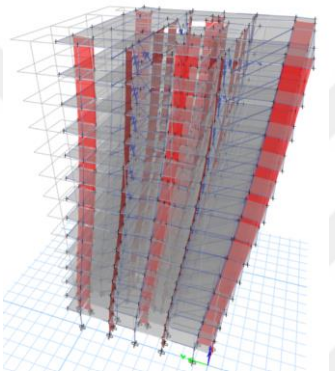
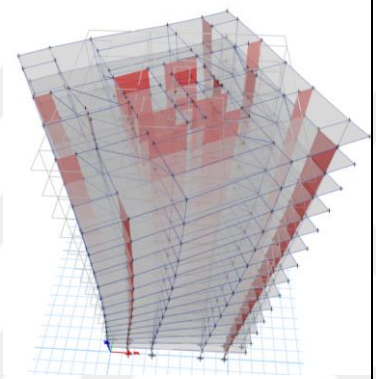
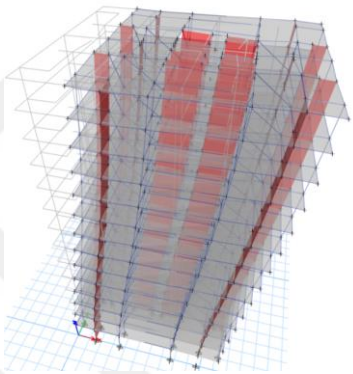
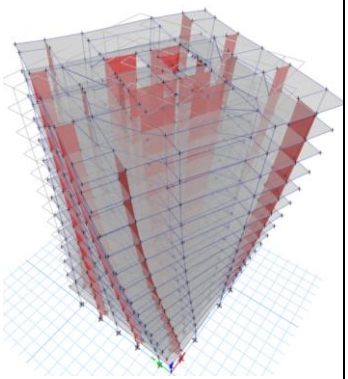
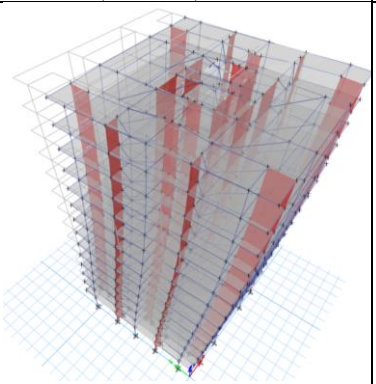
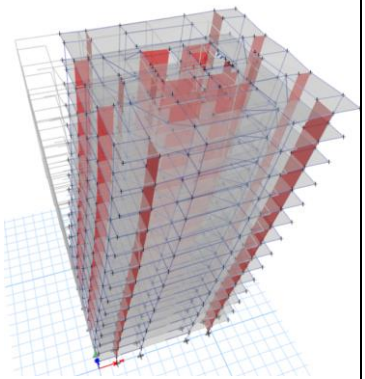
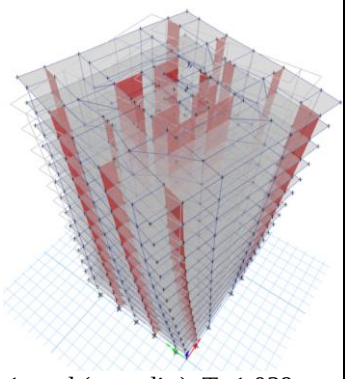
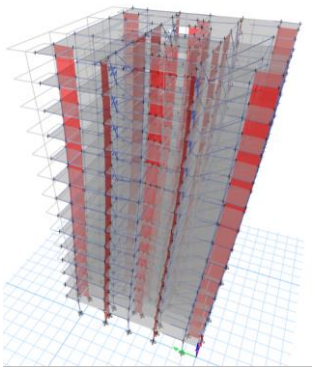
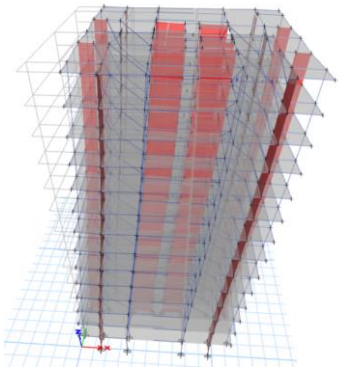
Model – 3: Dolgu duvarlara 2 katmanlı TRCC ile güçlendirme uygulanmıştır.

Model – 4 Dolgu duvarlara 4 katmanlı TRCC ile güçlendirme uygulanmıştır.

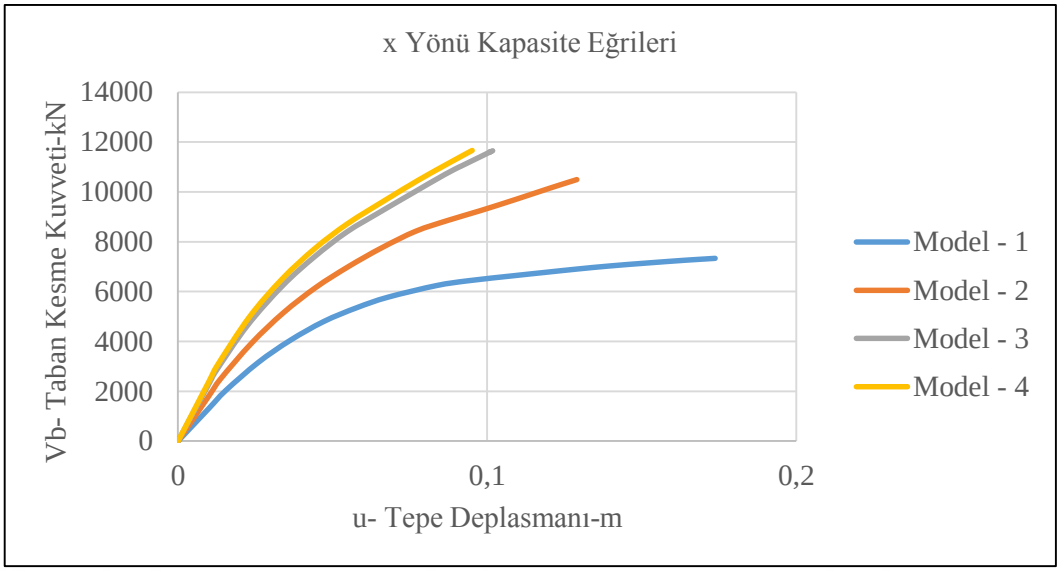
Mevcut yapıyı ve deneysel çalışmaya paralel bir şekilde yapıya uygulanmış güçlendirme durumlarını yansıtan yapısal modeller için x ve y yönünde ayrı ayrı itme analizleri yapılmıştır. Bu pushover analizi için Etabs V22.5.0 bilgisayar programı kullanılmıştır. Yapılan itme analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ve hâkim titreşim periyotları Şekil 6.6'da, kapasite eğrileri ise x yönü Şekil 6.7, y yönü Şekil 6.8'de verilmektedir.

Analiz sonucuna bakıldığında her iki yön için de dolgu duvarın yapısal rijitliğe etkisi oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında güçlendirilmiş dolgu duvarlar da yapının

rijitliğine önemli oranda etki etmiş ve yapının yer değiştirme oranlarını oldukça düşürdüğü görülmektedir.

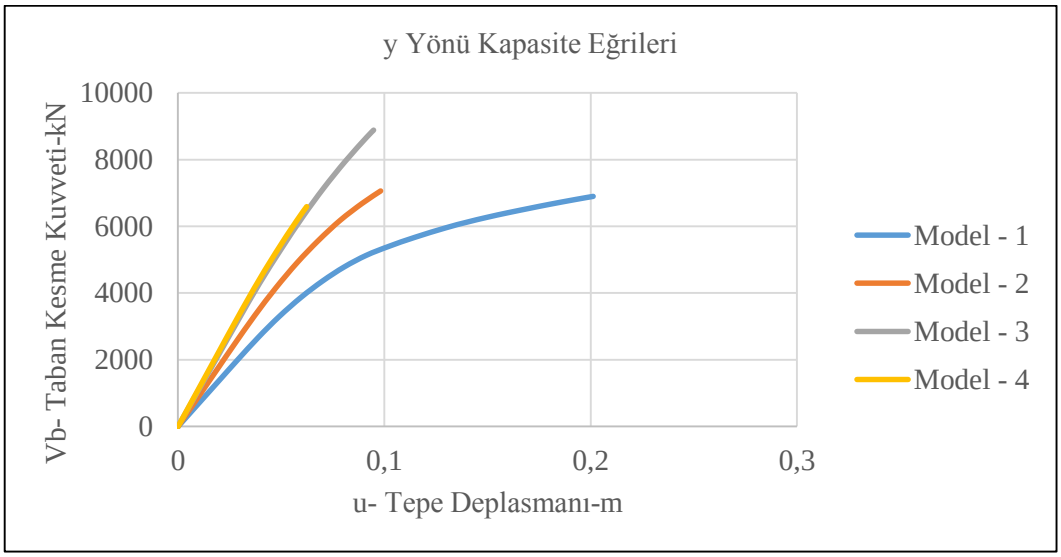
Model -1	 1.mod (y dir.) T=1,263 sn	 2.mod (tors. dir.). T=1,156 sn	 3.mod (x dir.) T=0,890 sn
Model -2	 1.mod (y dir.) T=1,126 sn	 2.mod (tors. dir.). T=1,095 sn	 3.mod (x dir.) T=0,769 sn
Model -3	 1.mod (tors. dir.). T=1,039 sn	 2.mod (y. dir.). T=1,032 sn	 3.mod (x dir.) T=0,687 sn
Model -4	 1.mod (tors. dir.). T=1,039 sn	 2.mod (y. dir.). T=1,016 sn	 3.mod (x dir.) T=0,674 sn

Şekil 6.6: Etabs modellerinin mod şekilleri ve ilk üç hâkim periyot değerleri.



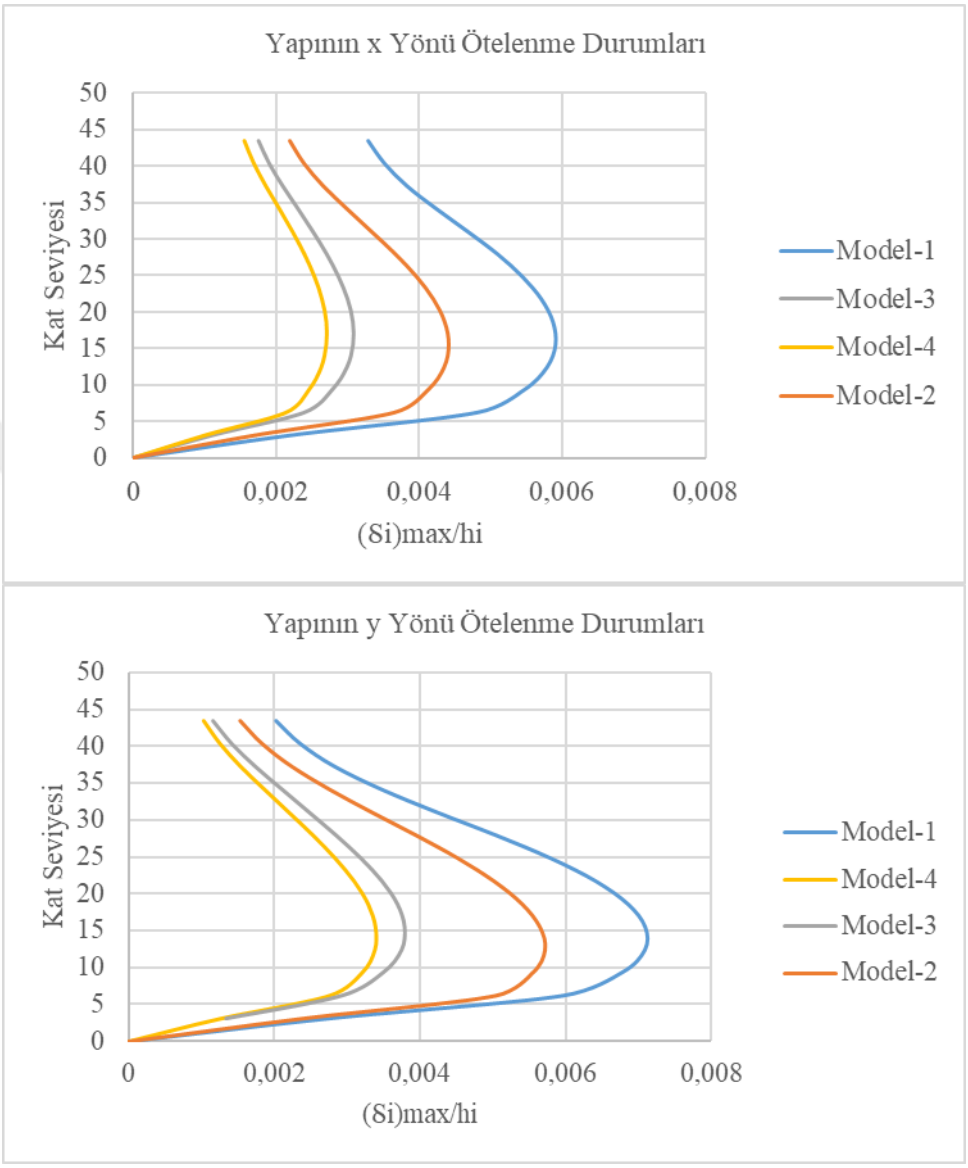
Şekil 6.7: Etabs modellerinin x yönü kapasite eğrilerinin kıyaslanması.

Her iki yöndeki kapasite eğrilerinde bakılması gereken diğer bir konu ise farklı katmanlı TRCC ile güçlendirilmiş yapıların kapasitelerinin durumudur. Hem deneysel çalışmada hem de analitik yaklaşım ile elde edilen çalışma sonucunda TRCC plakaların içindeki katman sayısının dolgu duvar kapasitesine çok etki etmediği görülmüştü. Aynı durum, mevcut bir yapıya ilave edilen duvarların, farklı katmanlı TRCC sistemi ile güçlendirilmesi sonucu yapılan analizlerde de açıkça görülmektedir. 2 ve 4 katmanlı TRCC sistemiyle güçlendirilen dolgu duvarlı yapıların diğer referans yapılara oranla yapının rijitliğini oldukça arttırırken birbiriyle kıyaslandığında paralel düzeyde bir etki yaptıkları açıkça görülebilir.



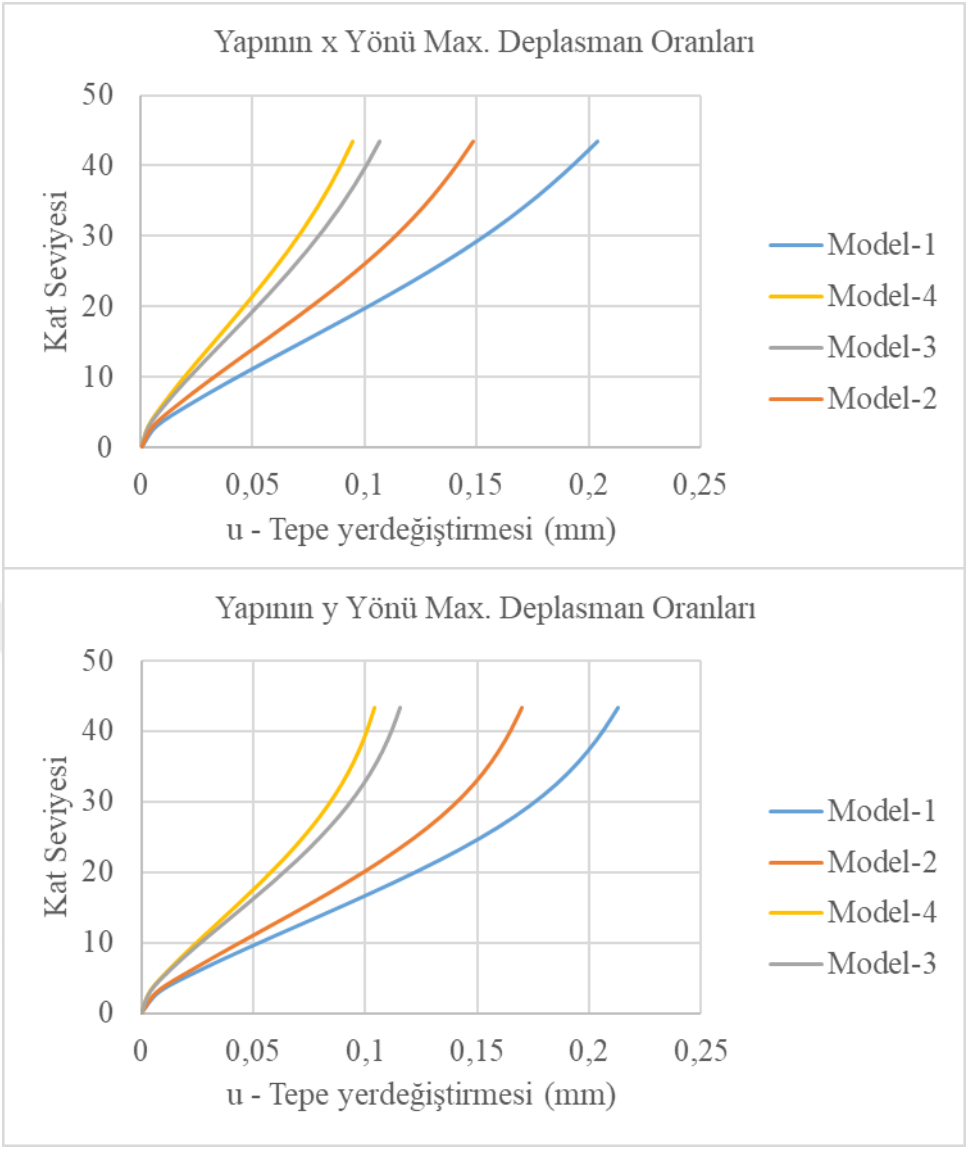
Şekil 6.8: Etabs modellerinin y yönü kapasite eğrilerinin kıyaslanması.

Ayrıca modellenen yapılarda bakılan başka bir parametre ise kat seviyelerine göre yapının ötelenme oranları olmuştur. X ve y yönlerinde elde edilen ötelenme oranları için Şekil 6.9'a bakılabilir.



Şekil 6.9: Etabs modellerinin x ve y yönü ötelenme oranlarının kıyaslanması.

Bu parametre üzerinden kıyaslanma yapıldığında da yine 2 ve 4 katmanlı TRCC sistemiyle güçlendirilen dolgu duvarlı yapıların diğer referans yapılara oranla ötelenme oranlarında oldukça etkili olduğu ancak birbiriyle yine paralel bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.10: Etabs modellerinin x ve y yönünde yaptığı max. deplasman oranlarının kıyaslanması.

6.3. ÖNERİLER

Yapılan deneysel ve analitik bulgular çerçevesinde, alkali dayanımlı cam tekstil (AR-Glass) malzemesi ile çimento esaslı matris ile oluşturulan Tekstil Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit (TRCC) plakları ile gerçekleştirilen güçlendirme konusu araştırılmıştır. Bu çerçevede elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmış ve önemli bulgular elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında deneysel aşama için 4 adet betonarme çerçeve üretilmiş, bu betonarme çerçevelerden biri boş, bir tanesi güçlendirilmemiş ve sıvalı olarak bırakılan dolgu duvarlı, birisi 2 katmanlı TRCC ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı, diğeri ise 4 katmanlı TRCC ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerdir. Bu çerçevelerden elde edilen deneysel sonuçlar

irdelenmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerde diğer referans numunelere göre oldukça olumlu sonuçlar alınmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 2 ve 4 katmanlı güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin her ne kadar referans çerçevelere göre olumlu sonuç alındığı bilinse de yapılan irdelemeler sonucunda katman sayısının bu sonuçlara önemli bir katkı yapmadığı sonucuna varılmıştır. Aynı durum analitik çalışmalarda da karşımıza çıkmaktadır. Hem analitik yaklaşım hem de yapısal analiz çalışmalarında da katman sayısının etkisinin birbiriyle paralel olduğu ancak TRCC ile güçlendirme durumunun yapısal kapasiteye önemli oranda artış sağladığı ortaya çıkmaktadır.

Bu durumda dolgu duvarların TRCC ile güçlendirilmesi, yapısal kapasiteleri oldukça arttırdığı söylenebilmektedir. Aynı zamanda TRCC içindeki katman sayısının etkisi oldukça zayıf kalmaktadır. Bu yaklaşımla düşünüldüğünde, gereksiz malzeme sarfiyatının önüne geçilerek ekonomik açıdan avantaj sağlanması ve uygulamada kolaylık olması bakımından plaka kalınlığının inceliği göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda en uygun güçlendirme şeklinin 2 katmanlı TRCC ile duvarlara ankrajlı (AR-2-2-A numunesi olduğu gibi) yapılan güçlendirme şekli olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Asteris, P. A., Cavaleri, L., Trapani, F. D. Ve Sarhosis, V., 2016, A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads, Structure and Infrastructure Engineering, 12:5, 551-566.

Balcı, E., 2023, Çimento Esaslı Tekstil Takviyeli Kompozit Plakalarla Ankrajlı Olarak Güçlendirilmiş Bölme Duvarlarının Kayma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Basha, S. H., Kaushik, H., B., 2017, Predicting Shear Failure in Columns of Masonry Infilled RC Frames using Macro-Modeling Approach, 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile, Paper No 3168, Registration Code: S-I1464510945

Benedict, T., 2016, Filament spin evloution winds up ligher, stiffer and stronger carbon rims. Available: www.bikerumor.com/2016/11/23/filament-spin-evolution-winds-lighter-stifferstronger-carbon-rims/

Benjamin, J., William, H., 1957, The behavior of one story reinforced concrete shear wallstle. Journal of the Structural Division of the American Society of Civil Engineers, 83 (3), 1–30.

Bhat, Z. M., Singh, Y., Agarwal, P., 2024, Cyclic testing and diagonal strut modelling of different types of masonry infills in reinforced concrete frames designed for modern codes, Engineering Structures, Volume 317, 118695, ISSN 0141-0296

Coza, H., 2009, Dolgu duvarlı çerçevelerin karbon lifli kompozitlerle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Crisafulli, F. J. ve Carr, A. J., 2007, Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 40 (2), 69–77.

Çılı, F., Karadoğan, H. ve Erol, G., 2007, Karbon liflerle güçlendirilmiş bölme duvarlı betonarme çerçeveler (Proje No. 104M562). İstanbul: TÜBİTAK Kurumsal Raporu.

Daşkıran, M., 2018, Çimento Esaslı Kompozitlerden Üretilen Yapı Elemanlarının Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Davidovits, J., 2008, Geopolymer chemistry and applications. pp: 612. 76

Ehsani, M., Saadatmanesh, H. ve Al-Saidy, A., 1997, Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays. Journal of Composites for Construction, 1 (1), 17–25.

Erol, G., 2010, Karbon Liflerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeveler, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Etabs, Structural Analysis Program v.22. Computers and Structures Inc., Berkeley, California. State University of New York at Buffalo.

FEMA 306, 1999, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Applied Technology Council (ATC-43 Project), California, USA.

FEMA 356, 2000, Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings. Applied Technology Council (ATC-43 Project), California, USA.

Gencoglu, M., Daskiran, M., M., Daskiran, E., G. (2022). Seismic performance of PVA textile cementitious composites used as permanent formwork in full-scale circular RC columns, *Structures*, 36, 445-462

Goodship, V., Middleton, B., Cherrington, R., 2016, Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality. pp: 67-68.

Gür, M., 2017, Çimento Esaslı Kompozit Plakalarla Güçlendirilmiş Bölme Duvarların Kayma Dayanımının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Kakaletsis, D. ve Karayannis, C.G., 2008, Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading, Journal of Earthquake Engineering, 12:2, 197-221.

Kakaletsis, D., 2012, Comparison of CFRP and alternative seismic retrofitting techniques for bare and infilled rc frames, Journal of Composites for Construction, 15 (4), 565–577.

Kolsch, H., 1998, Carbon fiber cement matrix (CFCM) overlay system for masonry strengthening, Journal of Composites for Construction, 2, 105–109. Retrieved from http://home.anadolu.edu.tr/~yguney/cemil_historical/ASCE/QCC000105[1].pdf

Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M., Thomann, R., 2005, Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. Composites Science Technology, 65:2259e68.

Koutas, L., Triantafillou, T., and Bousias, S., 2014, Analytical Modeling of Masonry-Infilled RC Frames Retrofitted with Textile-Reinforced Mortar, *Journal of Composites for Construction, 19 (5). 04014082. ISSN 1090-0268*

Koutromanos, I., Stavridis, A., Shing, P.B., Willam, K., 2011, Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads, Computers and Structures, vol. 89, no. 11-12, pp. 1026–1037.

Kuanjin, M., Rejab, M. R. M., Kaige, J., Idris, M. S., Harith, M. N., 2018, Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure, Materials Science and Engineering, 342, 012029.

Lignola, G., Prota, A., ve Manfredi, G., 2009, Nonlinear analyses of tuff masonry walls strengthened with cementitious matrix-grid composites. Journal of Composites for Construction, 13 (4), 243–251.

Minchenkov K., Vedernikov A., Safonov A. ve Akhatov I., 2021, Thermoplastic Pultrusion: A Review. *Polymers*. 13(2):180.

Mohyeddin, A., Goldsworthy, H. M., ve Gad, E. F., 2013, FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading. Engineering Structures, 51, 73–87.

Novo, P.J., Silva, J.F., Nunes, J.P. ve Marques, A.T., 2016, Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials. *Compos. Part B Eng.*

Ökten, M. S., 2014, Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özkan, C., 2012, Çimento Esaslı Kompozitlerle Güçlendirilen Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Tersinir Tekrarlı Yükler Altında Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özkaynak, H., 2010, Dolgu duvarlı lifli polimerler ile sargılanmış betonarme çerçeve sistemlerin deprem davranışı ve yapısal sönüm özellikleri, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Pohoryles, D. A. Ve Bournas, D. A., 2020, A unified macro-modelling approach for masonry-infilled RC frames strengthened with composite materials, Engineering Structures, Volume 223, 111161, ISSN 0141-0296.

Prota, A., Marcari, G., Fabrocino, G., Manfredi, G. ve Aldea, C., 2006, Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix–grid composites, Journal Of Composıtes For Constructıon © Asce / May/June 2006 / 223.

Pujol, S. ve Fick, D., 2010, The test of a full-scale three-story RC structure with masonry infill walls. Engineering Structures, 32(10), 3112-3121.

RILEM Technical Committee 232-TDT, 2016, Test methods and design of textile reinforced concrete**.**

Ritchie, P., Thomas, D., Lu, L., Connelly, G., 1991, External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. Structural Engineering, 88, 490–500.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M., Jin, L., 1996, Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composites. ACI Structural Journal, 93.

SAP 2000. Structural Analysis Program v.14.02. Computers and Structures Inc., Berkeley, California. State University of New York at Buffalo.

Sapanci, E., Günay, G. E., Aydoğmuş, A., Roketsan, A. S., 2017, Composite canister profile manufacturing by pultrusion process. In Proceedings of the International SAMPE Technical Conference, Seattle, CA, USA.

Soranakom, C., Mobasher, B., 2009, Flexural analysis and design of textile reinforced concrete, Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), 3-5, 273-288, June, Germany.

Sreekumar, P. A., Joseph, K., Unnikrishnan, G., Thomas, S. A., 2007, Comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. Compos Sci. Technol.;67:453e61.

TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Vedernikov, A., Tucci, F., Safonov, A., Carlone, P., Gusev, S., Akhatov, I., 2020, Investigation on the Shape Distortions of Pultruded Profiles at Different Pulling Speed. *Procedia Manuf*, *47*, 1–5.

Yüksel, E., Ozkaynak, H., Buyukozturk, O., Yalcin, C., Dindar, A.A., Surmeli, M., 2009, Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames, Construction and building metarials 24, 596–609.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

BETONARME BINALARDA ÇIMENTO ESASLI KOMPOZITLERLE GÜÇLENDİRİLEN BÖLME DUVARLARIN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

ORİJİNALLİK RAPORU

%19	%19	%2	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	%9
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%7
3	www.statikproje.gen.tr İnternet Kaynağı	%1
4	www.fitozoglu.com İnternet Kaynağı	%1
5	hdl.handle.net İnternet Kaynağı	<%1
6	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
7	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	pmc.gov.pk İnternet Kaynağı	<%1
9	www.kanalmaras.com İnternet Kaynağı	<%1
10	www.slideshare.net İnternet Kaynağı	<%1
11	docs.neu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
12	silo.tips İnternet Kaynağı	

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Cemil ÖZKAN