İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞLUKLU TUĞLA İLE ÖRÜLMÜŞ YIĞMA DUVARLARIN LP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE DAVRANIŞTA BOYUT ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emre YILMAZ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞLUKLU TUĞLA İLE ÖRÜLMÜŞ YIĞMA DUVARLARIN LP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE DAVRANIŞTA BOYUT ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emre Yılmaz
501081028

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2010

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ercan YÜKSEL (İTÜ)
Doç. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)

OCAK 2010

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan sayın hocam Doç. Dr. Alper İlki ve Yrd. Doç. Dr. Ercan Yüksel'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecindeki değerli katkıları için; Yük. İnş. Müh. Medine İspir'e, Yük. İnş. Müh. Hasan Özkaynak'a, İnş. Müh. Berk Özsayın'a, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuarı personeline teşekkür ederim.

Çalışmayı destekleyen BASF ve Art-Yol firmasına, teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme, tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ocak 2010 Emre Yılmaz

İÇİNDEKİLER

sayfa

ÖNSÖZ ... **iii**
İÇİNDEKİLER ... **v**
KISALTMALAR ... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xi**
ÖZET ... **xv**
SUMMARY ... **xvii**
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI ... **1**
1.1 Giriş ... 1
1.2 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar ... 2
1.3 Çalışmanın Amacı ... 4
2. NUMUNE İMALATI ... **5**
2.1 Genel ... 5
2.2 Numunelerin Genel Özellikleri ... 6
2.3 Duvar Numunelerinin Yapımı ... 6
2.4 Duvar Numunelerine Başlık Yapımı ... 9
2.5 Numunelerin Güçlendirilmesi ... 10
2.6 Yerdeğiştirmeölçerlerin Yerleştirilmesi ... 14
2.7 Şekildeğiştirmeölçerlerin Yerleştirilmesi ... 15
2.8 Numune Boyutlarının Hesaplanması ... 15
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ ... **19**
3.1 Çimento–Kireç Harcı ... 19
3.1.1 Çimento-Kireç Harcı Standart Silindir Basınç Deneyleri ... 19
3.1.1.1 Deney Yöntemi ... 19
3.1.1.2 Deney Sonuçları ... 20
3.1.2 Çimento-Kireç Harcı Silindir Yarma Deneyleri ... 24
3.1.3 Çimento-Kireç Harcı Küp Basınç Deneyleri ... 25
3.1.4 Sonuçların Değerlendirilmesi ... 26
3.2 Tuğla Özellikleri ... 27
3.2.1 Tuğla Delik Yönünde Basınç Deneyleri ... 28
3.2.2 Tuğla Delik Dik Yönünde Basınç Deneyleri ... 31
3.3 CFRP Malzeme Özellikleri ... 35
4. DUVAR DENEYLERİ ... **39**
4.1 Deney Düzeneği ... 39
4.1.1 Yükleme Düzeneği ... 39
4.1.2 Ölçüm Düzeneği ... 41
4.2 Duvar Deneyleri ... 42
4.2.1 Basınç Deneyleri ... 42
4.2.2 Güçlendirilmemiş Duvar Basınç Deneyleri ... 44
4.2.2.1 A1 Numuneleri Basınç Deneyleri ... 44
4.2.2.2 A2 Numuneleri Basınç Deneyleri ... 48

4.2.2.3 C-1 Numuneleri Basınç Deneyleri……..51
4.2.2.4 A1 ve C1 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……56
4.2.2.5 C2 Numuneleri Basınç Deneyleri……...58
4.2.2.6 A2 ve C2 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……61
4.2.3 Güçlendirilmiş Duvar Basınç Deneyi 63
4.2.3.1 A4 Numuneleri Basınç Deneyi……...63
4.2.3.2 A1 ve A4 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…..... 66
4.2.3.3 A5 Numuneleri Basınç Deneyi……...68
4.2.3.4 A2 ve A5 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…… 71
4.2.4 Kayma Deneyleri 72
4.2.5 Güçlendirilmemiş Duvar Kayma Deneyi 74
4.2.5.1 A3 Numuneleri Kayma Deneyleri……..74
4.2.5.2 C3 Numuneleri Kayma Deneyleri…….. 77
4.2.5.3 A3 ve C3 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……79
4.2.6 Güçlendirilmiş Duvar Kayma Deneyleri..... 80
4.2.6.1 A6 Numuneleri Kayma Deneyleri……..80
4.2.6.2 A3 ve A6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…… 83
4.2.6.3 A7 Numuneleri Kayma Deneyleri……..84
4.2.6.4 A3 ve A7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…… 87
4.2.6.5 C6 Numunesi Kayma Deneyi……89
4.2.6.6 C3 ve C6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……91
4.2.6.7 A6 ve C6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……92
4.2.6.8 C7 Numuneleri Kayma Deneyleri…….. 93
4.2.6.9 C3 ve C7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……96
4.2.6.10 A7 ve C7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması……...97
4.2.6.11 A6 ve A7 Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…. 98
4.2.6.12 C6 ve C7 Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması…100
5. ANALİTİK ÇALIŞMA 103
5.1 Giriş..... 103
5.2 Malzeme Numuneleri Deneysel ve Ampirik Sonuçları 103
5.3 Duvar Numuneleri Deneysel ve Analitik Sonuçları 104
5.3.1 Duvar Numuneleri Basınç Dayanımı..... 104
5.3.2 Duvar Numuneleri Kayma Dayanımı 105
6. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 111
KAYNAKLAR..... 115
EKLER 117
ÖZGEÇMİŞ..... 129

KISALTMALAR

CFRP : Karbon Lif Takviyeli Polimer
FRP : Lif Takviyeli Polimer
D.H : Deney Hatası
Y.D.Ö : Yerdeğiştirmeölçer
INS : Instron

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Basınç numuneleri boyutları.....17
Çizelge 2.2 : Kayma numuneleri boyutları.....17
Çizelge 3.1 : Standart silindir basınç deneyi dayanım sonuçları. 21
Çizelge 3.2 : Standart silindir basınç deneyi istatistiksel değerleri.....21
Çizelge 3.3 : Standart silindir yarılma deneyi dayanım sonuçları. 25
Çizelge 3.4 : Standart silindir yarılma deneyi istatistiksel değerleri.....25
Çizelge 3.5 : Küp basınç deneyi dayanım sonuçları. 26
Çizelge 3.6 : Küp deneyi istatistiksel değerleri.....26
Çizelge 3.7 : Harç numuneleri basınç dayanımı ve elastisite modülü oranları.....27
Çizelge 3.8 : Tuğla delik yönü basınç deneyi dayanım sonuçları.....29
Çizelge 3.9 : Tuğla delik yönü basınç deneyi istatistiksel değerleri. 29
Çizelge 3.10 : Tuğla delik dik yönü basınç deneyi dayanım sonuçları. 32
Çizelge 3.11 : Tuğla delik dik yönü basınç deneyi istatistiksel değerleri. 32
Çizelge 3.12 : CFRP malzeme özellikleri.....35
Çizelge 3.13 : Astarın mekanik özellikleri**.** 36
Çizelge 3.14 : Epoksi esaslı yapıştırıcının mekanik özellikleri. 37
Çizelge 4.1 : A1 numuneleri deney sonuçları. 45
Çizelge 4.2 : A1 numuneleri istatistiksel değerleri. 45
Çizelge 4.3 : A2 numuneleri deney sonuçları. 49
Çizelge 4.4 : A2 numuneleri istatistiksel değerleri. 49
Çizelge 4.5 : C1 numuneleri deney sonuçları. 52
Çizelge 4.6 : C1 numuneleri istatistiksel değerleri. 53
Çizelge 4.7 : A1 ve C1 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. .57
Çizelge 4.8 : C2 numuneleri deney sonuçları. 59
Çizelge 4.9 : C2 numuneleri istatistiksel değerleri. 59
Çizelge 4.10 : A2 ve C2 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 62
Çizelge 4.11 : A4 numuneleri deney sonuçları. 64
Çizelge 4.12 : A4 numuneleri istatistiksel değerleri. 64
Çizelge 4.13 : A1 ve A4 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 67
Çizelge 4.14 : A5 numuneleri deney sonuçları. 69
Çizelge 4.15 : A5 numuneleri istatistiksel değerleri. 69
Çizelge 4.16 : A2 ve A5 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 72
Çizelge 4.17 : A3 numuneleri deney sonuçları. 75
Çizelge 4.18 : A3 numuneleri istatistiksel değerleri. 75
Çizelge 4.19 : C3 numuneleri deney sonuçları. 77
Çizelge 4.20 : C3 numuneleri istatistiksel değerleri.....77
Çizelge 4.21 : A3 ve C3 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 80

Çizelge 4.22 : A6 numuneleri deney sonuçları. 81
Çizelge 4.23 : A6 numuneleri istatistiksel değerleri. 81
Çizelge 4.24 : A3 ve A6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 84
Çizelge 4.25 : A7 numuneleri deney sonuçları. 85
Çizelge 4.26 : A7 numuneleri istatistiksel değerleri. 85
Çizelge 4.27 : A3 ve A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 88
Çizelge 4.28 : C6 numuneleri deney sonuçları. 89
Çizelge 4.29 : C3 ve C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 91
Çizelge 4.30 : A6 ve C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 93
Çizelge 4.31 : C7 numuneleri deney sonuçları. 94
Çizelge 4.32 : C7 numuneleri istatistiksel değerleri. 94
Çizelge 4.33 : C3 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 96
Çizelge 4.34 : A7 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 98
Çizelge 4.35 : A6 ve A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 99
Çizelge 4.36 : C6 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması. 101
Çizelge 5.1 : Eurocode-6 ve TDY Minimum Sınır Değerleri. 103
Çizelge 5.2 : Malzeme numuneleri deneysel sonuçları ve analitik minimum sınır değerleri. 104
Çizelge 5.3 : Basınç numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerler. 105
Çizelge 5.4 : Kayma numuneleri için şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen en büyük yatay şekildeğiştirme değerleri. 107
Çizelge 5.5 : Kayma numuneleri için Denklem (5.7) ile hesaplanan etkin şekildeğiştirme değerleri. 108
Çizelge 5.6 : Kayma numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerler. 108
Çizelge 5.7 : Kayma numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerleri. 109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Wei deney numunesi. 3
Şekil 1.2 : Elgawady deney düzeneği. 4
Şekil 2.1: Deney listesi. 7
Şekil 2.2 : A ve C tipi duvar numuneleri. 9
Şekil 2.3 : A ve C deney numuneleri imalatı. 9
Şekil 2.4 : Yüzeye uygulanan harç kesim yerleri. 9
Şekil 2.5 : Numunelere başlık yapımı. 10
Şekil 2.6 : Kayma numunesi başlık yapımı. 10
Şekil 2.7 : Numunelerin güçlendirilmesi. 11
Şekil 2.8 : A tipi numune güçlendirilmesi (A4, A5 numuneleri). 11
Şekil 2.9 : A tipi kayma deneyi numuneleri güçlendirilmesi (A7, A6). 12
Şekil 2.10 : C tipi kayma numuneleri güçlendirilmesi (C7, C6). 12
Şekil 2.11 : Basınç numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri. 13
Şekil 2.12 : Tam olarak güçlendirilmiş kayma numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri. 13
Şekil 2.13 : Şeritler halinde güçlendirlen kayma numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri. 14
Şekil 2.14 : Basınç ve kayma numuneleri için yerdeğiştirmeölçer yerleşimi. 14
Şekil 2.15 : Numune üzerine yerdeğiştirmeölçer yerleşimi. 15
Şekil 2.16 : Numune üzerine şekildeğiştirmeölçer yerleşimi. 15
Şekil 2.17 : TS 772-16'da belirtilen ölçme yerleri [13]. 16
Şekil 2.18 : Basınç numuneleri için boyutlar ve ölçüm yerleri. 16
Şekil 2.19 : Kayma numuneleri için boyutlar ve ölçüm yerleri. 16
Şekil 3.1 : Standart silindir numunesi Instron basınç deney düzeneği. 20
Şekil 3.2 : Standart silindir numunesi Amsler basınç deney düzeneği. 20
Şekil 3.3 : ÇK-08-4 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 22
Şekil 3.4 : ÇK-08-5 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 22
Şekil 3.5 : ÇK-08-6 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 23
Şekil 3.6 : ÇK-08-8 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 23
Şekil 3.7 : Standart silindir gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 24
Şekil 3.8 : Standart silindir yarılma deneyi. 24
Şekil 3.9 : 1/3 ölçekli özel üretim fabrika tuğlası. 28
Şekil 3.10 : Tuğla delik yönü Instron (solda) ve Amsler (sağda) basınç deney düzenekleri. 29
Şekil 3.11 : DY-01 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 30
Şekil 3.12 : DY-02 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 30
Şekil 3.13 : DY-03 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 31
Şekil 3.14 : Tuğla delik yönü gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 31
Şekil 3.15 : Tuğla delik dik Instron (solda) ve Amsler (sağda) basınç deney düzenekleri. 32

Şekil 3.16 : DD-01 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 33
Şekil 3.17 : DD-02 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 33
Şekil 3.18 : DD-03 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 34
Şekil 3.19 : Tuğla delik dik yönü gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 34
Şekil 4.1 : Instron deney aleti genel görünüşü. 39
Şekil 4.2 : Instron deney aleti. 40
Şekil 4.3 : Bluehill 2 yükleme cihazına ait kontrol yazılımı. 40
Şekil 4.4 : Duvar numuneleri yerdeğiştirmeölçer yerleşimi. 41
Şekil 4.5 : Güçlendirilmiş duvar numuneleri şekildeğiştirmeölçer yerleşimi. 42
Şekil 4.6 : Süneklik tanımı. 43
Şekil 4.7 : A1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 44
Şekil 4.8 : A1-1 numunesi deney sonrası hasar durumu. 46
Şekil 4.9 : A1-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 47
Şekil 4.10 : A2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 48
Şekil 4.11 : A2-1 numunesi deney sonrası hasar durumu. 51
Şekil 4.12 : A2-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 51
Şekil 4.13 : C1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 52
Şekil 4.14 : C1-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 54
Şekil 4.15 : C1-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 56
Şekil 4.16 : A1 ve C1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 57
Şekil 4.17 : C2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 58
Şekil 4.18 : C2-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 60
Şekil 4.19 : C2-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 61
Şekil 4.20 : A2 ve C2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 62
Şekil 4.21 : A4 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 63
Şekil 4.22 : A4-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 65
Şekil 4.23 : A4-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 66
Şekil 4.24 : A1 ve A4 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 67
Şekil 4.25 : A5 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 68
Şekil 4.26 : A5-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası surumu. 70
Şekil 4.27 : A5-2 Numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 70
Şekil 4.28 : A2 ve A5 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri. 71
Şekil 4.29 : Alan hesabında kullanılan numune ölçüm yerleri. 73
Şekil 4.30 : A3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 74
Şekil 4.31 : A3-1 numunesi deney sonrası hasar durumu. 76
Şekil 4.32 : A3-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 76
Şekil 4.33 : C3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 77
Şekil 4.34 : C3-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 78
Şekil 4.35 : C3-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri. 79
Şekil 4.36 : A3 ve C3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 79
Şekil 4.37 : A6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 81
Şekil 4.38 : A6-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 82
Şekil 4.39 : A6-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 83
Şekil 4.40 : A3 ve A6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 83
Şekil 4.41 : A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 85
Şekil 4.42 : A7-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 86
Şekil 4.43 : A7-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 87

Şekil 4.44 : A3 ve A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkilerileri. 88
Şekil 4.45 : C6 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. 89
Şekil 4.46 : C6-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 90
Şekil 4.47 : C6-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 90
Şekil 4.48 : C3 ve C6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 91
Şekil 4.49 : A6 ve C6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 92
Şekil 4.50 : C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 94
Şekil 4.51 : C7-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 95
Şekil 4.52 : C7-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu. 95
Şekil 4.53 : C3 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 96
Şekil 4.54 : A7 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 97
Şekil 4.55 : A6 ve A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 99
Şekil 4.56 : C6 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri. 100
Şekil 5.1 : LP Kompozit ile Güçlendirilmiş Duvar Numunesi. 107
Şekil A.1 : A1-1 numunesi hasar gelişimi. 118
Şekil A.2 : A1-2 numunesi hasar gelişimi. 118
Şekil A.3 : A2-1 numunesi hasar gelişimi 119
Şekil A.4 : A2-2 numunesi hasar gelişimi 119
Şekil A.5 : C1-1 numunesi hasar gelişimi. 120
Şekil A.6 : C1-2 numunesi hasar gelişimi. 120
Şekil A.7 : C2-1 numunesi hasar gelişimi. 121
Şekil A.8 : C2-2 numunesi hasar gelişimi. 121
Şekil A.9 : A4-1 numunesi hasar gelişimi. 122
Şekil A.10 : A4-2 numunesi hasar gelişimi. 122
Şekil A.11 : A5-1 numunesi hasar gelişimi. 123
Şekil A.12 : A5-2 numunesi hasar gelişimi. 123
Şekil A.13 : A3-1 numunesi hasar gelişimi. 124
Şekil A.14 : A3-2 numunesi hasar gelişimi. 124
Şekil A.15 : C3-1 numunesi hasar gelişimi. 125
Şekil A.16 : C3-2 numunesi hasar gelişimi. 125
Şekil A.17 : A6-2 numunesi hasar gelişimi 126
Şekil A.18 : A7-1 numunesi hasar gelişimi 126
Şekil A.19 : A7-2 numunesi hasar gelişimi. 127
Şekil A.20 : C6-1 numunesi hasar gelişimi. 127
Şekil A.21 : C7-1 numunesi hasar gelişimi. 128
Şekil A.22 : C7-2 numunesi hasar gelişimi. 128

BOŞLUKLU TUĞLA İLE ÖRÜLMÜŞ YIĞMA DUVARLARIN LP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE DAVRANIŞTA BOYUT ETKİSİ

ÖZET

İki ayrı tez çalışması olarak yürütülen bu çalışmada boşluklu tuğlalarla imal edilmiş yığma duvarların karbon lifli polimer (CFRP) malzemesi ile güçlendirme sonrası ve öncesi mekanik özellikleri incelenmiştir. 1/3 ölçekli özel üretim fabrika tuğlaları ile hazırlanan toplam 36 adet duvar numunesi 3 farklı grup oluşturacak şekilde imal edilmiştir. Birinci tez çalışmasında aynı boyutlara sahip numunelerde harç tipinin etkisi incelenirken, ikinci tez çalışması olan çalışmanın ana konusu ise aynı harç tipiyle hazırlanmış duvar numunelerinde boyut etkisidir. Boyut etkisinin yanı sıra numuneler CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş ve güçlendirme etkisi de araştırılmıştır.

Boyut etkisinin ve güçlendirme etkisinin numune dayanım, başlangıç rijitliği, deformasyon yeteneği ve enerji yutma özelliği üzerindeki etkisini bulmak için numuneler yük delik yönünde, deliğe dik olacak şekilde ve diyagonal çekme etkileri oluşturacak şekilde verilerek deneye tabi tutulmuştur. Tüm deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan 5000 kN kapasiteli Instron deney cihazında 0.2 mm/dakika yükleme hızıyla yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda; boyut artışı ile numunelerin basınç ile kayma dayanımının ve deformasyon yeteneğinin azaldığı, güçlendirmenin ise numune basınç dayanımı, kayma dayanımı, enerji yutma özelliği ve özellikle şekil değiştirme yeteneğini arttırdığı görülmüştür. Bunun yanı sıra daha önce önerilmiş olan analitik yaklaşımlar ve bazı yönetmelikteki kurallar ile numune kapasiteleri hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar ve deney sonuçlarının birbirinden çok farklı olmadığı görülmüştür.

FRP STRENGTHENING OF MASONARY WALLS CONSTRUCTED WITH HOLLOW CLAY BRICKS AND SIZE EFFECTS ON THE OBSERVED BEHAVIOR

SUMMARY

Two parallel studies were conducted as two theses for obtaining the mechanical properties of the masonry walls before and after strengthening with FRP sheets. 36 masonry wall specimens were made with 1/3 scale hollow clay bricks. In the first theses, the effect of mortar type was investigated on the same size specimens. In the second theses which is the current study, the size effect was investigated on the wall specimens made with same mortar. Furthermore the specimens were strengthened with carbon FRP sheets and the effect of strengthening was also investigated.

In order to determine the size and strengthening effect on strength, initial stiffness, deformation capability and energy dissipation , specimens were tested under different loading conditions such as parallel to the holes, perpendicular to the holes, and in diagonal direction. All the test carried out by 0.2 mm/minute loading rate by Instron test device with 5000 kN load capacity.

Test results show that, material compressive strength, shear strength and also deformation capability decreased due to increase in specimen dimensions. Strengthening with carbon FRP sheets provided a remarkable increase on compressive strength, shear strength, deformation capability and energy dissipation capacity. In addition to this test results were compared with empirical values are given in standards. Besides, the wall specimen capacities were calculated with the previously proposed analytical approaches and some code regulations. The calculated results and experimental results are not different from each other.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

1.1 Giriş

Yığma yapılar düşey taşıyıcıları duvarlar olan, düşey ve yatay yüklerin genelde basınç gerilmeleri ile yapı temeline aktarıldığı yapılardır, [1]. Yığma yapılar süneklikleri az, gevrek malzeme ile inşa edilen, yapımlarında işçiliğin önemli rol oynadığı, yangın dayanımı yüksek, yatay deprem yüklerine dayanımı; duvar geometrisine ve kullanılan malzeme dayanımına bağlı olan yapılar olarak da tanımlanabilir, [2]. Bu açıdan taşıyıcı duvarların sadece düşey yükler altındaki davranışı ve hem düşey hem yatay yüklerin birlikte etkidiği durumdaki davranışının belirlenmesi önemli olmaktadır.

Taşıyıcı duvarların yapımında genelde tuğla kullanılmaktadır. Tuğla, kil veya killi topraktan, kum veya diğer toz katkı maddeleri katılarak veya katılmaksızın seramik bağ elde etmeye yeterli yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilir, [3]. Yapımda kullanılan malzeme türüne, dayanımına, geometrik şekline ve boşluk türüne göre çok çeşitli tuğla türleri vardır. Günümüzde özellikle ağırlığı az, dayanımı yüksek boşluklu fabrika tuğlaları taşıyıcı duvar yapımında tercih edilmektedir. Bu açıdan bina ağırlığını azaltan boşluklu tuğlaların ve bu tuğlalar ile yapılan duvarların incelenmesi önemlidir.

Güçlendirme, hasar olsun veya olmasın, taşıyıcı sistemin tümünün ya da bazı elemanların dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerinin iyileştirilmesidir, [4]. Sünekliği ve çekme dayanımı az olan yığma yapıların özellikle deprem etkisinde enerji tüketme kapasitelerinin ve çekme ile kesme dayanımlarının arttırılması için güçlendirme önemli olmaktadır. Yığma yapıların güçlendirilmesi konusunda ülkemizde yeterince çalışmanın gerçekleştirilmediği düşünülmektedir.

Yığma yapıların güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Donatı ağı üzerine püskürtme beton uygulaması ya da çelik elemanlar kullanma ile yapılan güçlendirme bunlara örnek verilebilir. Bunlara ek olarak, FRP (fiber takviyeli polimer) malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirme de son yıllarda yaygınlaşmaya

başlamıştır. Bu güçlendirme tekniğinin önemli üstünlükleri, yatay yüklere karşı etkinliğinin fazla olması, uygulama kolaylığı, uygulama süresinin az olması ve güçlendirmenin binaya ilave bir yük getirmemesi olduğu söylenebilir. FRP sistemlerin en önemli zayıflıkları ise ısıya karşı düşük dayanım ve yangında yüksek ısıya maruz kalan FRP sistemlerin dayanımlarını tamamen yitirmesidir, [5].

1.2 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

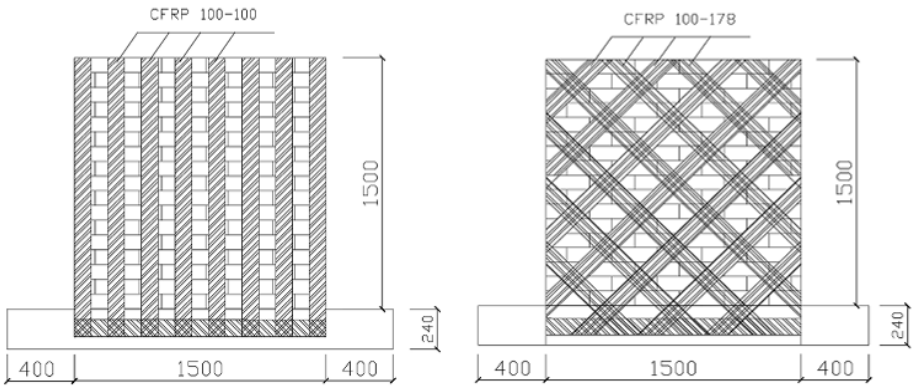
El-Dakhakhni ve diğ. [6], güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş yığma duvar elemanların ve dolgu duvarlı çelik çerçevelerin davranışını belirlemek üzere çeşitli doğrultularda bir takım deneyler gerçekleştirmişlerdir. İlk aşamada gerçekleştirilen deneyler yaklaşık 24 adet olup basınç ve kayma etkileri altında denenmişlerdir. İkinci aşamada beş adet güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş dolgu duvarlı çerçeve test edilmiştir. Güçlendirme için kompozit laminat elemanlar kullanılmıştır. Kompozit laminatlarla yapılan güçlendirmenin rijitlik ve dayanım bakımından, en büyük dayanıma ulaşılmasından sonraki davranışı açısından önemli iyileşmeler sağladığı, düzlem dışı hareketin numune düzlemi içerisinde sınırladığı gözlemlenmiştir. Yığma duvarların deformasyon yeteneğini artırması ve yapı genelinde kullanıldığında oluşabilecek birtakım ileri hasarları sınırlandırması açısından kompozit laminatların çok etkin olduğu söylenebilir.

Farooq ve diğ. [7], farklı konfigürasyonlarda çelik levhalar ile güçlendirilen yığma duvarları iki farklı grup olarak basınç ve kayma etkileri altında test etmişlerdir. Çelik levhaların düzenlenme aralıkları da araştırma konusunun diğer bir parametresini teşkil etmiştir. Yığma duvar yüzeyine ankre edilen çelik levhalar ile basınç ve kayma dayanımında önemli artışlar sağlanabileceği belirtilmiştir.

Alcaino ve diğ. [8], 16 adet 1/1 ölçekli yığma duvarları kayma etkileri altında test etmişlerdir. Yığma duvarlar CFRP kompozitleri ile farklı biçimlerde güçlendirilmiş olup test sonuçları dayanım, rijitlik, düktilite ve enerji tüketimi kavramları kapsamında değerlendirilmişlerdir. Test sonuçları güçlendirme sayesinde dayanımın 13-84% oranında artırılabildiği, yerdeğiştirme kabiliyetinin 51-146% oranında artabildiğini göstermiştir. CFRP uygulamasının yığma duvar içerisinde harcanan enerjiyi artırdığı da deney sonuçlarından belirlenmiştir. Eşdeğer sönüm oranının da belirlendiği bu deneysel çalışmada, tepe öteleme oranının 0.29% olduğu seviyede

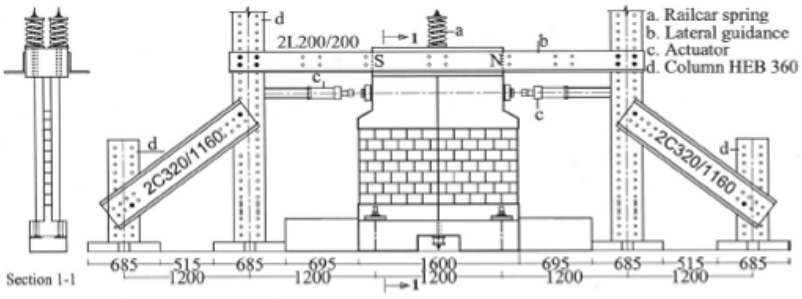
güçlendirilmiş numunelerde eş değer sönüm oranının ortalama 8% olarak alınabileceği önerilmiştir. Yapılan çalışmada en büyük kayma dayanımının tahmin edilebilmesi için birtakım bağıntılar da geliştirilmiştir.

Wei ve diğ. [9], yığma duvarların düktilitesi ve yatay yük taşıma kapasitesini belirlemek amaçlı olarak 1 adet güçlendirilmemiş 2 adet CFRP ile güçlendirilmiş olmak üzere toplam 3 adet 1.5mX1.5m boyutlarında yığma duvar eleman imal etmiş ve sabit düşey yükler altında iken tersinir statik yükler etkisinde denemişlerdir. Bu deneysel çalışmada sadece 2 farklı güçlendirme tekniği üzerinde çalışılmıştır. Güçlendirme tekniği güçlendirmenin etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Genel anlamda uygulanmış olan güçlendirme teknikleri duvar elemanların düktilitesini, yatay yük taşıma kapasitesini ve enerji tüketme kabiliyetini önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 1.1 : Wei deney numunesi.

Elgawady ve diğ. [10], yedi adet ½ ölçekli yığma duvarın davranışını FRP ile güçlendirme öncesi ve sonrası, sabit düşey yükler, artan yatay yerdeğiştirmeler etkisinde statik tersinir tekrarlı olarak incelemiştir. Duvar elemanların yatay yük taşıma kapasitesi, rijitliği ve enerji tüketme kabiliyetinde lifli polimer malzemelerin eksenel rijitliği ve miktarı önemli bir parametre olmaktadır. Çok fazla miktarda FRP kullanımı duvarın çok gevrek davranış göstermesine sebep olmaktadır. Duvar elemanlara ait sönüm oranlarının tartışıldığı bu çalışmada güçlendirilmiş numunelerin sönüm oranlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1.2 : Elgawady deney düzeneği.

1.3 Çalışmanın Amacı

Paralel iki adet yüksek lisans tezi olarak yürütülen bu deneysel çalışmada boşluklu yığma duvarların CFRP ile güçlendirilmesi sonrası ve öncesinde mekanik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna yönelik olarak 36 adet deney numunesi hazırlanmış ve denenmiştir. Birinci çalışma grubunda özdeş boyutlardaki numunelerde harç türünün değişiminin davranışa etkisi incelenmiştir. İkinci çalışma ve bu tezin ana konusu olarak ise özdeş harç malzemesi kullanılarak hazırlanan numunelerde boyut etkisi araştırılmıştır.

Her iki çalışma grubunda da boyut etkisi ve harç türünün etkisi dışında kendi içinde ortak olarak incelediği bir takım parametreler vardır. Kullanılan tuğlanın delikli olması nedeniyle yüklemenin yönüne bağlı olarak tuğlanın mekanik özelliklerinin değişeceği düşünülmüş ve tuğla deliklerinin yükleme doğrultusunda/yükleme doğrultusuna dik olması durumları ve yüklemenin diyagonal doğrultuda çekme gerilmeleri oluşturacak şekilde yapılması durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Diğer bir parametre ise bir karbon lif takviyeli polimerlerin (CFRP) ve bunların uygulama detaylarının etkisidir.

Yapılan deneylerle boyut ve güçlendirme etkisinin numunelerin mekanik özelliklerinden olan basınç dayanımı, başlangıç rijitliği, deformasyon yeteneği, enerji yutma özelliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra daha önce önerilmiş olan analitik yaklaşımlar ve bazı yönetmelikteki kurallar ile numune kapasiteleri hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar ve deney sonuçlarının birbirinden çok farklı olmadığı görülmüştür.

2. NUMUNE İMALATI

2.1 Genel

İki adet yüksek lisans tezi çalışması olarak yürütülmüş olan bu çalışmada, toplam 36 adet 1/3 ölçekli özel üretim boşluklu fabrika tuğlaları ile imal edilmiş duvar numuneleri deneye tabi tutulmuştur.

Deney numuneleri üç ana gruptan oluşmaktadır. Bu gruplar A, B ve C olarak isimlendirilmiştir. A grubu duvar numuneleri çimento-kireç harcından oluşan ve 350×350×70 mm boyutlarındaki duvarların oluşturduğu 7 adet deney grubundan ve toplam 14 adet deney numunesinden oluşmaktadır. B grubu duvar numuneleri çimento harcından oluşan ve 500×500×70 mm boyutlarındaki duvarların oluşturduğu 7 adet deney grubundan ve toplam 12 adet deney numunesinden oluşmaktadır. C grubu duvar numuneleri ise çimento-kireç harcından oluşan 500×500×70 mm boyutlarındaki duvarların oluşturduğu 5 adet deney grubundan ve toplam 10 adet deney numunesinden oluşmaktadır.

Birinci çalışma grubu, B ve C gruplarından oluşmaktadır. Bu gruplar "Boşluklu Tuğla Duvarların Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesi ve Davranışta Harç Etkisi" adlı yüksek lisans tezinde [11] incelenmiştir. Bu çalışma grubunda özdeş boyutlarda hazırlanan deney numunelerinde harç türünün değişiminin davranışa etkisi irdelenmiştir.

İkinci çalışma grubu A ve C gruplarından oluşmaktadır ve bu yüksek lisans tezinin ana konusudur. Bu çalışma grubunda ise özdeş harç türünden oluşan numunelerin davranışı irdelenmiştir. Temel deney değişenleri; numune boyutları, yükleme doğrultusu, CFRP güçlendirmenin detaylarıdır. Deney numunelerine ait genel bilgi Bölüm 2.2 de ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.2 Numunelerin Genel Özellikleri

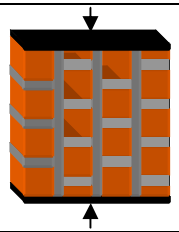
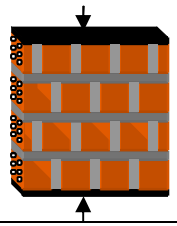
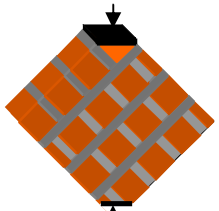
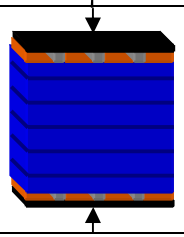
Farklı boyutlara sahip iki tip duvar numunesi hazırlanmıştır. Bunlardan birincisi olan A tipi 350 x 350 x 70 mm boyutundaki duvar numuneleridir. Diğer tip duvar numuneleri ise C tipi 500 x 500 x 70 mm boyutlarındaki duvar numuneleridir. Duvar numuneleri boyut, deney sınıfı ve güçlendirme durumuna göre sınıflandırılmışlardır. Şekil 2.1 duvar numunelerinin sınıflandırılmasını ve sembollerini göstermektedir. Her deney sınıfında 2 adet numune olmak üzere toplam 24 adet deney numunesi hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur.

2.3 Duvar Numunelerinin Yapımı

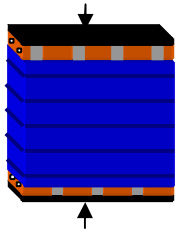
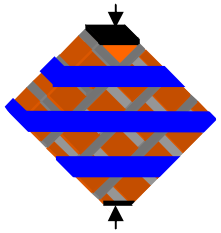
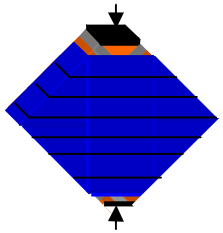
Duvar numunelerinin yapımında 1/3 ölçekli özel üretim boşluklu fabrika tuğlaları ve çimento-kireç harcı kullanılmıştır. Duvar örme işlemine başlamadan önce tüm tuğlalar ıslatılmıştır. Dört sıra tuğla ile oluşturulan A tipi duvar numunelerinin her sırasında 4 adet tuğla kullanılmıştır. C tipi duvar numuneleri ise 5.5 sıra tuğla ile örülmüş ve her sırada 5.5 adet tuğla kullanılmıştır, Şekil 2.2, Şekil 2.3. Su terazisi yardımıyla numunelerin imalatının düzgün olması sağlanmıştır.

Bir üst sıraya geçerken tuğla üzerine dışarıya taşmayacak şekilde harç serilmiş ve düşey derzler bir birinin üstüne gelmeyecek şekilde bir üst sıranın tuğlaları şaşırtılarak yerleştirilmiştir. Tuğlalar harcın üzerine iyice bastırılarak oturtulmuştur. Yatay derz kalınlığı yaklaşık olarak 10 mm, düşey derz kalınlığı ise yaklaşık olarak 5 mm dir. Duvar numunelerinin örme işleminde tuğlalar delikler yatay olacak şekilde yerleştirilmiştir. Örme işlemi bittikten sonra duvar yüzeyi kalınlığı 10 mm olacak şekilde çimento-kireç harcı ile sıvanmıştır.

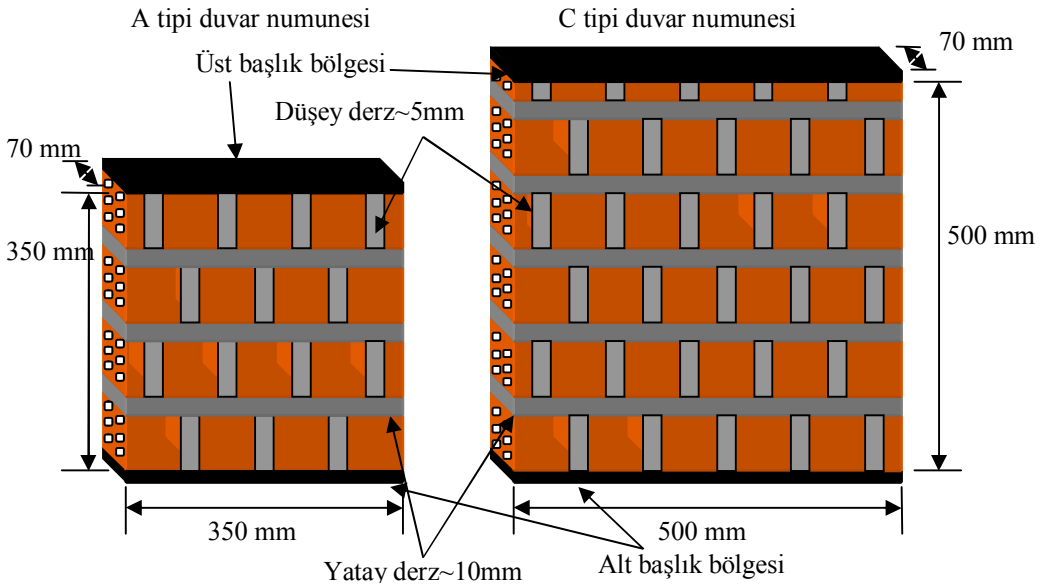
Duvar numunelerinde, yükleme başlığının doğrudan yüzeye uygulanan harca temasını önlemek amacı ile numune en alt ve en üst kısımlarda harç kesilerek başlık bölgelerinden ayrılması sağlanmıştır. Kesilen kısımların neresi olduğu Şekil 2.4 de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Hazırlanan tüm duvar numuneleri laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir.

Deney tipi		Sembol	Mevcut/güçlendirilmiş	ρ_{frp}	
	Özellik			A	C
	Mevcut duvar delik yönünde basınç deneyi	A1, C1	Mevcut	-	-
	Mevcut duvar deliğe dik yönünde basınç deneyi	A2, C2	Mevcut	-	-
	Mevcut duvar diyagonal kayma deneyi	A3, C3	Mevcut	-	-
	Tam olarak güçlendirilmiş duvar delik yönünde basınç deneyi	A4	Tam güçlendirilmiş	0.00416	0.00437

Şekil 2.1: Deney listesi.

	Tam olarak güçlendirilmiş duvar deliğe dik yönde basınç deneyi	A5	Tam güçlendirilmiş	0.00416	0.00437
	Şerit olarak güçlendirilmiş duvar diyagonal kayma deneyi	A6, C6	Şeritler halinde güçlendirilmiş	0.00182	0.00182
	Tam olarak güçlendirilmiş duvar diyagonal kayma deneyi	A7,C7	Tam güçlendirilmiş	0.00364	0.00486

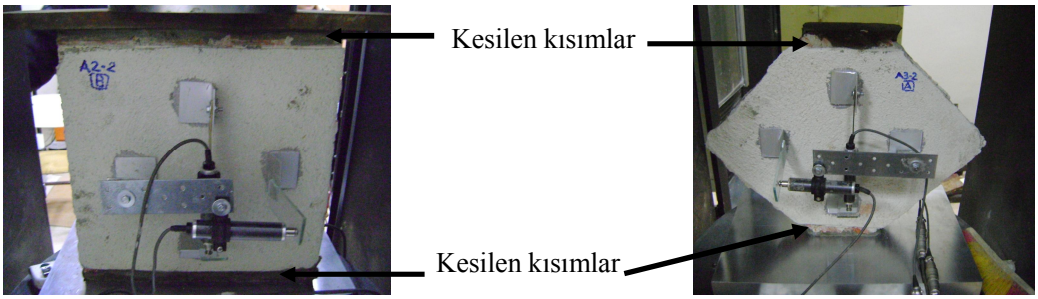
Şekil 2.1: Deney listesi (Devam).



Şekil 2.2 : A ve C tipi duvar numuneleri.



Şekil 2.3 : A ve C deney numuneleri imalatı.



Şekil 2.4 : Yüzeye uygulanan harç kesim yerleri.

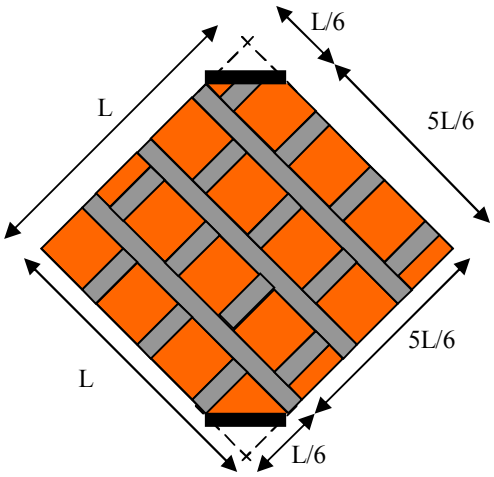
2.4 Duvar Numunelerine Başlık Yapımı

Tüm numunelere düzgün yükleme yapılabilmesi için başlık yapılmıştır, Şekil 2.5. Numuneler 3 tip deneye maruz kaldığı için deney türüne göre numunelerin başlıkları değişmiştir. Başlık yapımında çimento kum harcı kullanılmıştır. Başlık yapımı esnasında TS EN 772-1'de [12] belirtilen kurallar uygulanmıştır. Delik yönünde

basınç deneyi numunelerinde numune 90 derece çevrilerek yatay derze dik doğrultuda delikler kapanmayacak şekilde alt ve üst kısma başlık yapılmıştır. Deliğe dik basınç deneyi numunelerinde ise yatay derze paralel doğrultuda alt ve üst kısma başlık yapılmıştır. Kayma numunelerinde ise 45 derece çevrilen numunelerin alt ve üst kısmına başlık yapılmıştır. Kayma numunelerinde başlık yapabilmek için numuneler Şekil 2.6 da gösterildiği gibi kesilmiştir. Başlık yapımında; başlığın ince olması, çatlamaması ve başlığın basınç dayanımının yeterli olması gibi konulara dikkat edilmiştir.



Şekil 2.5 : Numunelere başlık yapımı.



Şekil 2.6 : Kayma numunesi başlık yapımı.

2.5 Numunelerin Güçlendirilmesi

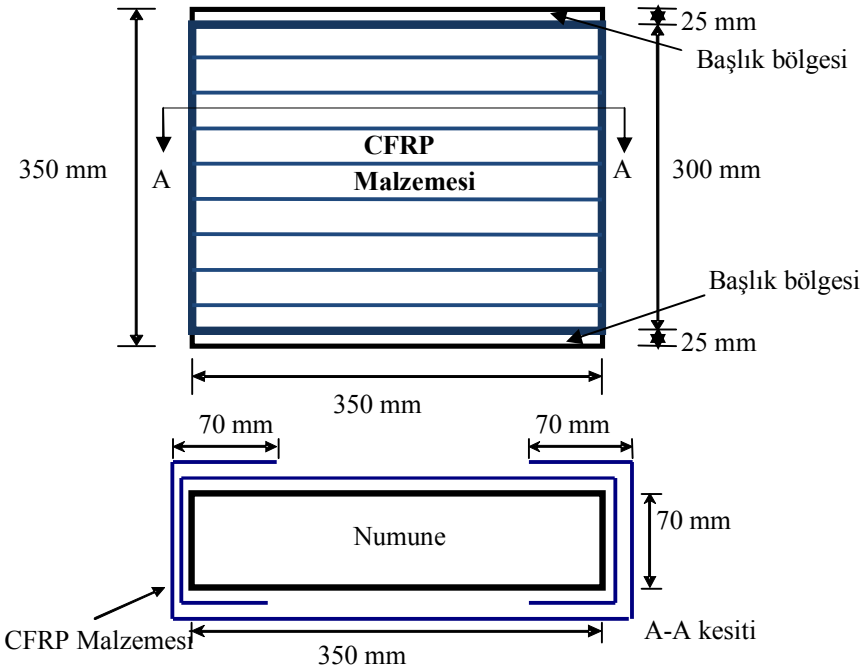
Güçlendirme basınç ve kayma numuneleri için farklı şekilde yapılmıştır. Basınç numunelerinde numunelerin tamamı sarılmışken, kayma numunelerinde ise numunenin tamamının sarıldığı ve şeritler halinde sarıldığı iki tip uygulama vardır. Tam sarma işleminde numune tüm boyu sarılmış olup hiç boşluk bırakılmamıştır. İlk olarak numune yüzeylerine daha iyi yapışma sağlanması için astar malzemesi

sürülmüş ve kuruması için iki gün beklenmiştir. Kuruyan numunelere kesilen CFRP (Karbon esaslı lifli polimer) malzemesi epoksi esaslı yapıştırıcı malzemesi ile yapıştırılmıştır, Şekil 2.7.



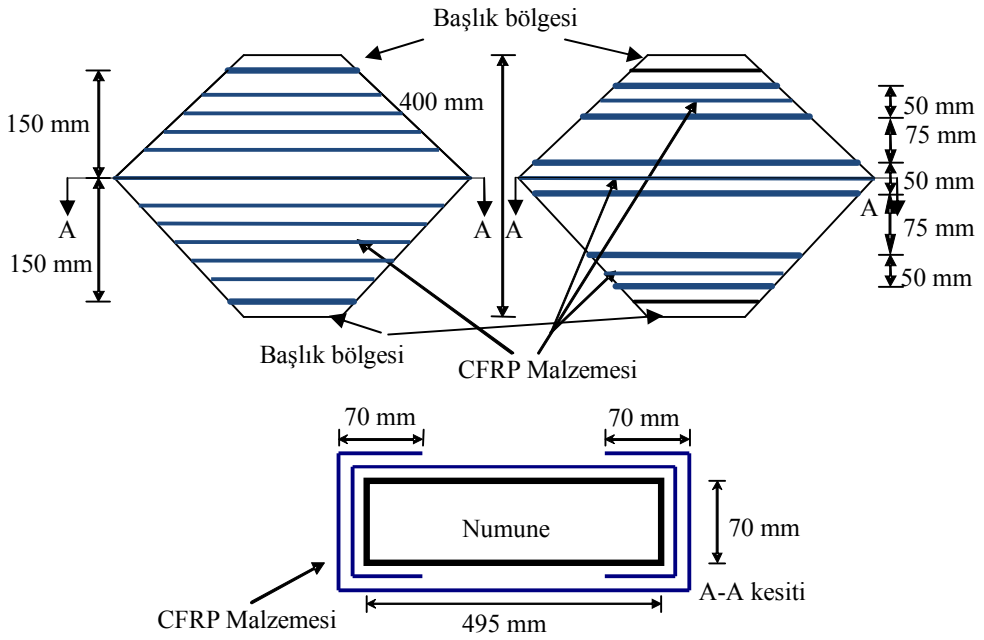
Şekil 2.7 : Numunelerin güçlendirilmesi.

Basınç numunelerinin tam sarıldığı uygulamalar A numuneleri için, Şekil 2.8 de gösterilmiştir. Tüm basınç numunelerinde başlık bölgeleri daha fazla güçlendirilmiş ve 4 kat daha sarılmıştır.

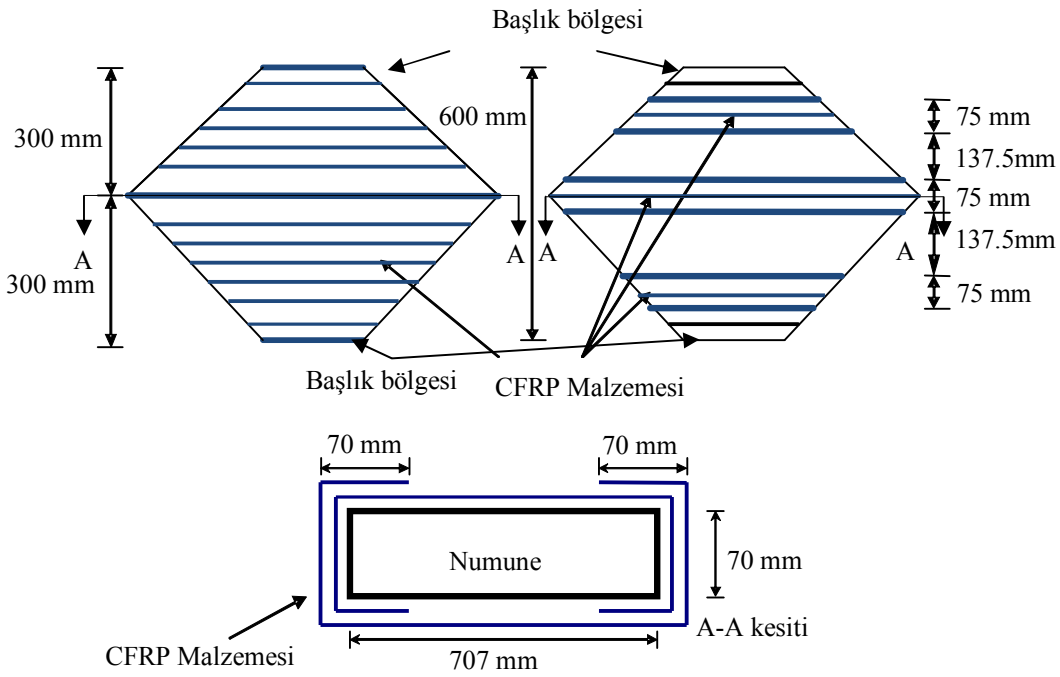


Şekil 2.8 : A tipi numune güçlendirilmesi (A4, A5 numuneleri).

Kayma deneyi numunelerinin sarım işlemi de basınç numuneleriyle benzer şekilde yapılmıştır, Şekil 2.9, Şekil 2.10. Tam ve şerit olarak sarılacak parçalar bindirme boylarına dikkat edilerek sarılmış ve kurumaya bırakılmıştır. Bu numunelerde de başlık bölgeleri daha fazla güçlendirilmiş ve 4 kat daha sarılmıştır.



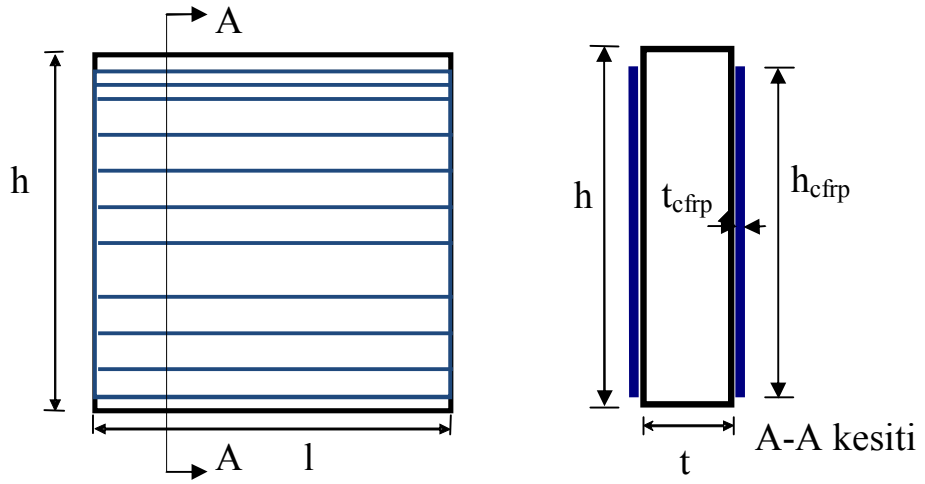
Şekil 2.9 : A tipi kayma deneyi numuneleri güçlendirilmesi (A7, A6).



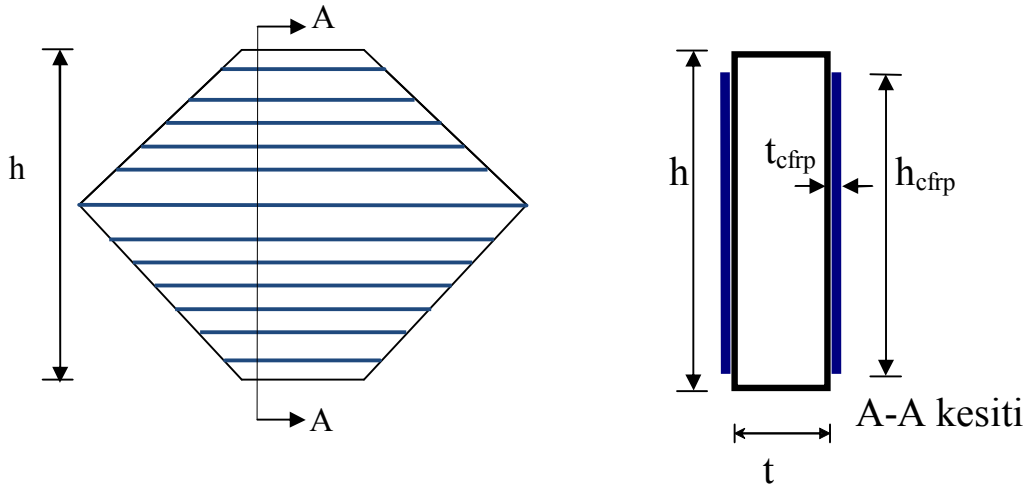
Şekil 2.10 : C tipi kayma numuneleri güçlendirilmesi (C7, C6).

Tüm numuneler için hacimsel fiber oranı ρ_{frp}'nin hesap yöntemi aşağıda verilen Denklem **(2.1)** göre hesaplanmıştır. ρ_{frp} toplam CFRP enkesit alanının numune enkesit alanına oranı olarak tanımlanmıştır. Denklemde verilen t_{cfrp}: CFRP malzemesi kalınlığı; h_{cfrp}: CFRP malzemesi yüksekliği; t: numune enkesit genişliği; h: numune yüksekliğini göstermektedir. Basınç ve kayma numuneleri için ρ_{frp} hesabında kullanılan enkesitler ve ölçüm yerleri Şekil 2.11, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13 de gösterilmiştir.

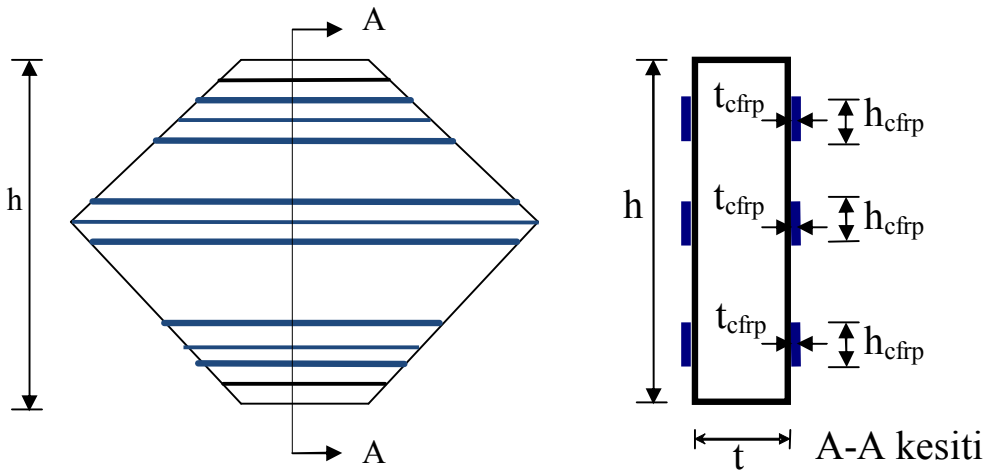
$$\rho_{frp} = \frac{\sum (t_{cfrp} \times h_{cfrp})}{t \times h} \qquad \textbf{(2.1)}$$



Şekil 2.11 : Basınç numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri.



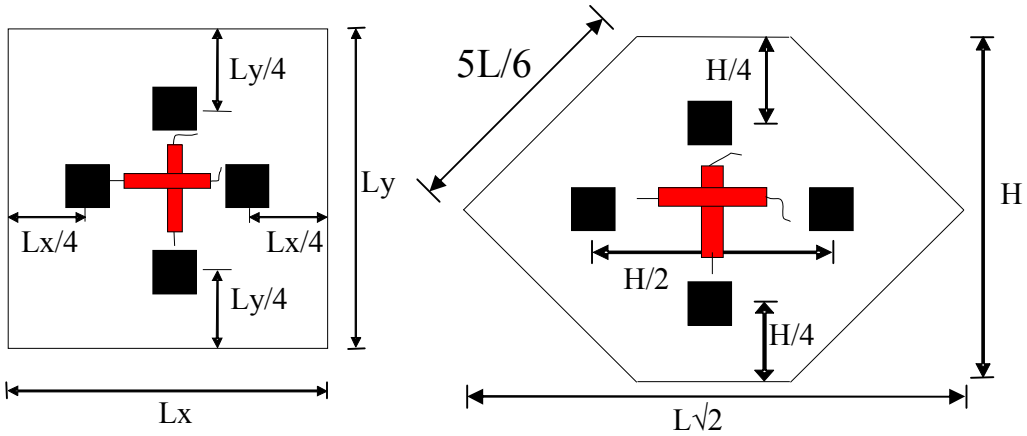
Şekil 2.12 : Tam olarak güçlendirilmiş kayma numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri.



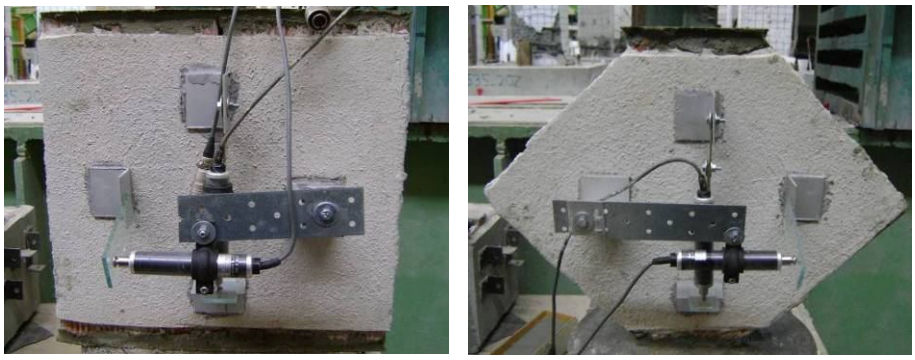
Şekil 2.13 : Şeritler halinde güçlendirlen kayma numunelerinde ρ_{frp} hesabı için ölçüm yerleri.

2.6 Yerdeğiştirmeölçerlerin Yerleştirilmesi

Deneyler sırasında meydana gelen uzama ve kısalmaları ölçmek üzere kapasitesi 10 mm olan 4 adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-10) kullanılmıştır, Şekil 2.14 ve 2.15. Bu yerdeğiştirmeölçerler numune üzerine ön ve arka yüzeye, düşey ve yatay doğrultuda olmak üzere yardımcı elemanlar kullanılarak (korniyer vs.) yerleştirilmişlerdir. Öncelikle numune üzerine epoksi esaslı tamir harcı yardımıyla korniyerler yerleştirilmiş, yerdeğiştirmeölçerin boyları yeterli olmadığı için ölçüm boyunu uzatmak üzere rijitliği yüksek ek parçalar kullanılmıştır. Yerdeğiştirmeölçer numune üzerine Şekil 2.14 deki gibi yerleştirilmiştir.



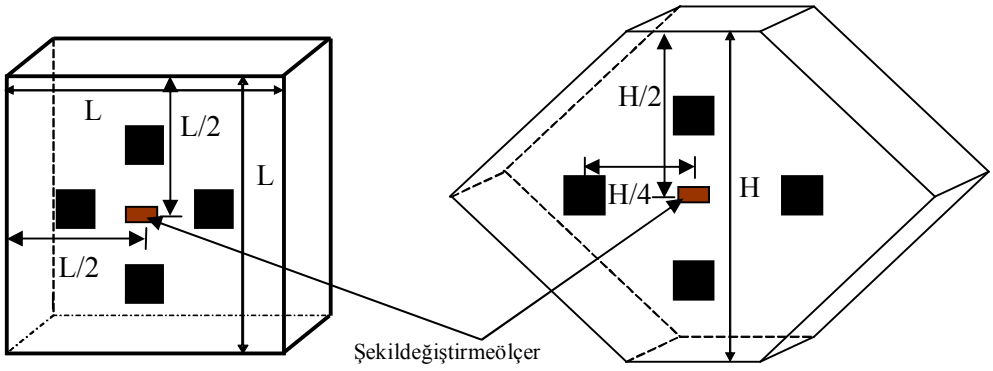
Şekil 2.14 : Basınç ve kayma numuneleri için yerdeğiştirmeölçer yerleşimi.



Şekil 2.15 : Numune üzerine yerdeğiştirmeölçer yerleşimi.

2.7 Şekildeğiştirmeölçerlerin Yerleştirilmesi

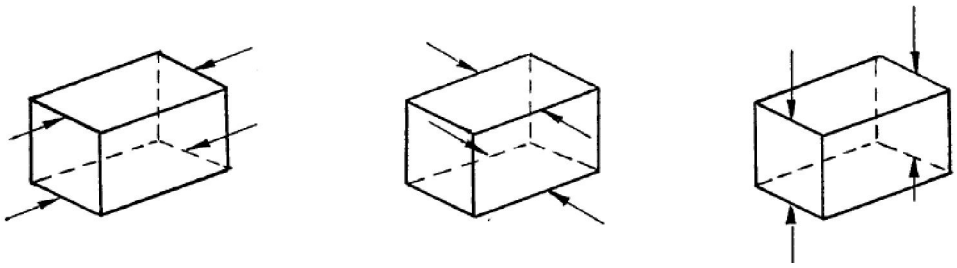
Orta bölgedeki yatay şekildeğiştirmeleri ölçmek ve bu okumaları ilgili yerdeğiştirmeölçer okumalarıyla karşılaştırmak üzere şekildeğiştirmeölçerler (FLA-6-11) kullanılmıştır, Şekil 2.16. Şekildeğiştirmeölçerler sadece güçlendirilmiş numunelere yerleştirilmiştir. Şekildeğiştirmeölçerlerin sağlıklı ölçüm alabilmesi için CFRP yüzeyi zımpara kâğıdı ile düzeltilmiş ve şekildeğiştirmeölçerler epoksi esaslı yapıştırıcı ile numune üzerine yapıştırılmıştır.



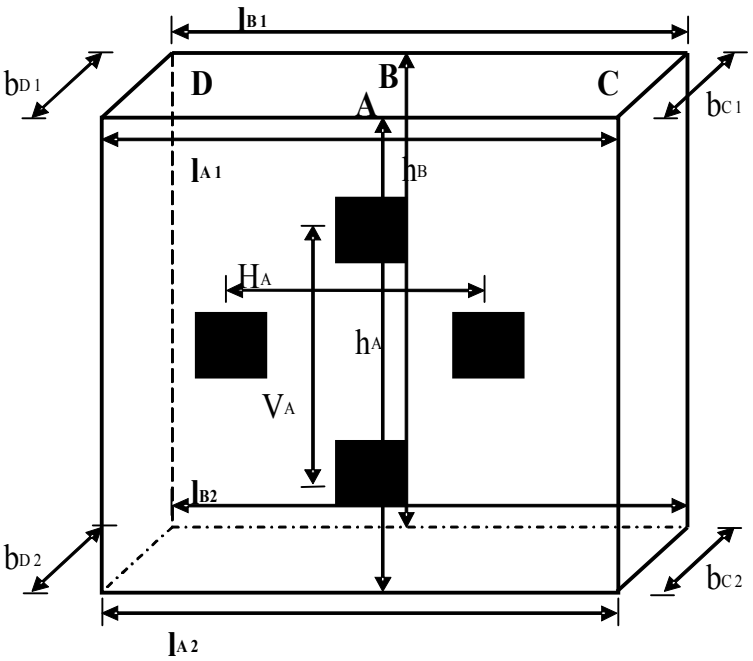
Şekil 2.16 : Numune üzerine şekildeğiştirmeölçer yerleşimi.

2.8 Numune Boyutlarının Hesaplanması

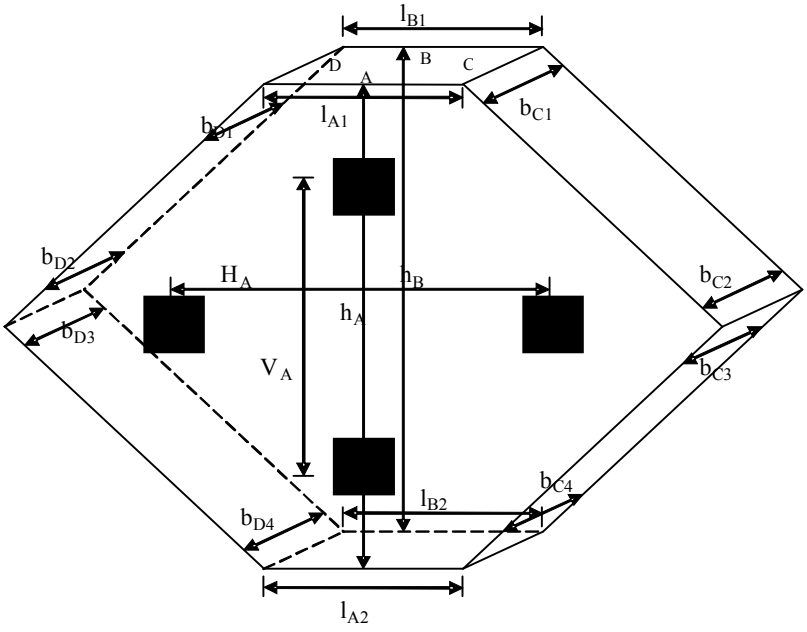
Sayısal hesaplamalarda kullanılan numune boyutları TS 772-16'da [13] kagir birimler için belirtilen ölçüm yöntemine (Şekil 2.17) benzer bir şekilde basınç ve kayma numuneleri için ölçülmüştür, Şekil 2.18, Şekil 2.19. Her boyut için numunenin alt ve üst kısmından alınan değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Bunların dışında yerdeğiştirmeölçerlerin ölçüm boyları da alınmıştır. Bulunan tüm ölçümler tüm numuneler için verilmiştir, Çizelge 2.1, Çizelge 2.2.



Şekil 2.17 : TS 772-16'da belirtilen ölçme yerleri [13].



Şekil 2.18 : Basınç numuneleri için boyutlar ve ölçüm yerleri.



Şekil 2.19 : Kayma numuneleri için boyutlar ve ölçüm yerleri.

Çizelge 2.1 : Basınç numuneleri boyutları.

Numune	l (mm)					b (mm)					h (mm)			(mm)		(mm)	
	l_{A1}	l_{A2}	l_{B1}	l_{B2}	l_{ORT}	b_{C1}	b_{C2}	b_{D1}	b_{D2}	b_{ORT}	h_A	h_B	h_{ORT}	V_A	H_A	V_B	H_B
A1-1	350	355	350	350	350	75	70	78	74	74	358	360	359	200	195	197	197
A1-2	350	350	350	350	350	75	73	72	70	73	360	360	360	194	196	198	193
A2-1	350	347	355	350	351	70	75	70	73	72	360	365	363	204	199	205	190
A2-2	350	350	350	350	350	75	71	75	70	73	360	360	360	199	197	194	193
A4-1	358	360	361	358	359	73	71	66	65	69	362	366	364	206	203	203	201
A4-2	360	360	360	365	361	72	70	70	75	72	365	362	364	199	204	200	202
A5-1	365	365	365	363	365	70	75	70	71	72	360	360	360	209	200	194	195
A5-2	363	369	365	367	366	67	74	70	72	71	370	368	369	199	205	203	194
C1-1	495	498	495	500	497	75	78	70	75	75	517	519	518	279	267	277	264
C1-2	500	498	500	493	498	70	74	80	78	76	520	519	520	270	258	281	269
C2-1	503	500	500	500	501	74	71	72	72	72	508	507	508	274	268	272	264
C2-2	500	500	500	504	501	72	78	78	78	75	510	510	510	269	272	269	276

Çizelge 2.2 : Kayma numuneleri boyutları.

Numune	b (mm)									h (mm)			(mm)		(mm)	
	b_{C1}	b_{C2}	b_{C1}	b_{C2}	b_{D1}	b_{D2}	b_{D1}	b_{D2}	b_{ORT}	h_A	h_B	h_{ORT}	V_A	H_A	V_B	H_B
A3-1	75	75	75	70	75	67	75	75	73	389	388	389	219	223	221	217
A3-2	74	68	70	74	77	77	76	73	74	392	394	393	213	214	204	219
A6-1	70	73	72	72	70	70	70	70	71	421	420	421	223	236	221	223
A6-2	75	73	77	70	75	72	75	74	74	418	418	418	223	240	216	235
A7-1	74	75	70	70	69	76	73	73	73	412	411	412	228	231	228	220
A7-2	73	76	70	74	75	75	75	73	74	413	413	413	225	236	221	225
C3-1	74	69	70	71	70	70	74	75	72	590	591	591	317	312	318	313
C3-2	76	80	76	73	78	74	70	72	75	592	592	592	314	320	322	318
C6-1	75	74	74	74	70	73	73	70	73	590	585	588	310	300	311	297
C6-2	75	75	75	76	73	76	79	79	76	598	597	598	319	318	318	313
C7-1	82	82	78	78	82	82	78	78	80	588	589	589	308	310	308	299
C7-2	80	80	80	80	73	73	74	74	77	584	582	583	300	295	303	295

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

3.1 Çimento–Kireç Harcı

Deney numunelerinin yapımında, derzlerde ve numune yüzeyini sıvamada çimento-kireç harcı kullanılmıştır. Çimento-kireç harcının hacimsel olarak karışım oranları 1.2:1:2 (çimento: kireç: kum) dir. Çimento-kireç harcının basınç ve çekme dayanımlarının belirlenmesi amacı ile 16 adet standart silindir (150x300 mm) ve 3 adet standart küp numunesi (70x70 mm) alınmıştır. 5000 kN kapasiteli Amsler marka pres kullanılarak 9 adet standart silindir basınç deneyi, 3 adet standart silindir yarma deneyi ve 3 adet standart küp basınç deneyi yapılmıştır. Bu deneylerde yalnızca malzemelerin dayanımları elde edilmiştir. Bunların dışında gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin elde edilmesi amacı ile 4 adet standart silindir basınç deneyi, 5000 kN kapasiteli Instron marka preste yapılmıştır. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin elde edilmesi amacı ile TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) kullanılmıştır. Standart silindirin ölçüm boyundaki (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) kısalmaları ölçmek üzere ölçüm çerçevesine bağlı olarak iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML-CDP-5) kullanılmıştır. Ayrıca, orta bölgedeki yatay uzamaları ölçmek için 2 adet 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Deney boyunca meydana gelen yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme okumaları, elektronik veri toplayıcısı yardımıyla (TML-TDS-303) bilgisayar ortamına aktarılarak değerlendirmesi yapılmıştır.

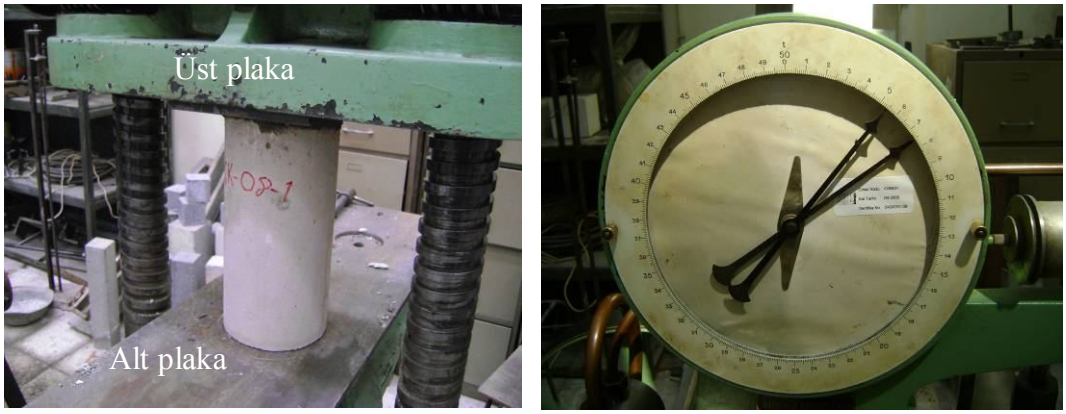
3.1.1 Çimento-Kireç Harcı Standart Silindir Basınç Deneyleri

3.1.1.1 Deney Yöntemi

Standart silindir deneyinde çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan standart silindirler Amsler ve Instron deney cihazlarında eksenel basınç altında denenmişlerdir, Şekil 3.1, Şekil 3.2.



Şekil 3.1 : Standart silindir numunesi Instron basınç deney düzeneği.



Şekil 3.2 : Standart silindir numunesi Amsler basınç deney düzeneği.

3.1.1.2 Deney Sonuçları

Numunelerden 9 adedi Amsler, 4 adedi Instron deney cihazında denenmiştir. Harcın standart silindir basınç dayanımı (f_{cym}) uygulanan maksimum yükün kesit alanına bölünmesi ile bulunmuştur. Instron deney cihazında yapılan deneyler 0.2 mm/dakika yükleme hızıyla yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Instron deney cihazında denenen numunelerin elastisite modülleri de bulunmuştur. Harç numunelerinin elastisite modulü değeri basınç dayanımlarının %5'i ile %33'ü arasındaki eğim olarak hesaplanmıştır. Tüm deney sonuçları Çizelge 3.1 de verilmiştir. Çizelgede hesaplanamayan değerler "-" ile gösterilmiştir. Harç numunelerinin istatistiksel değerleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

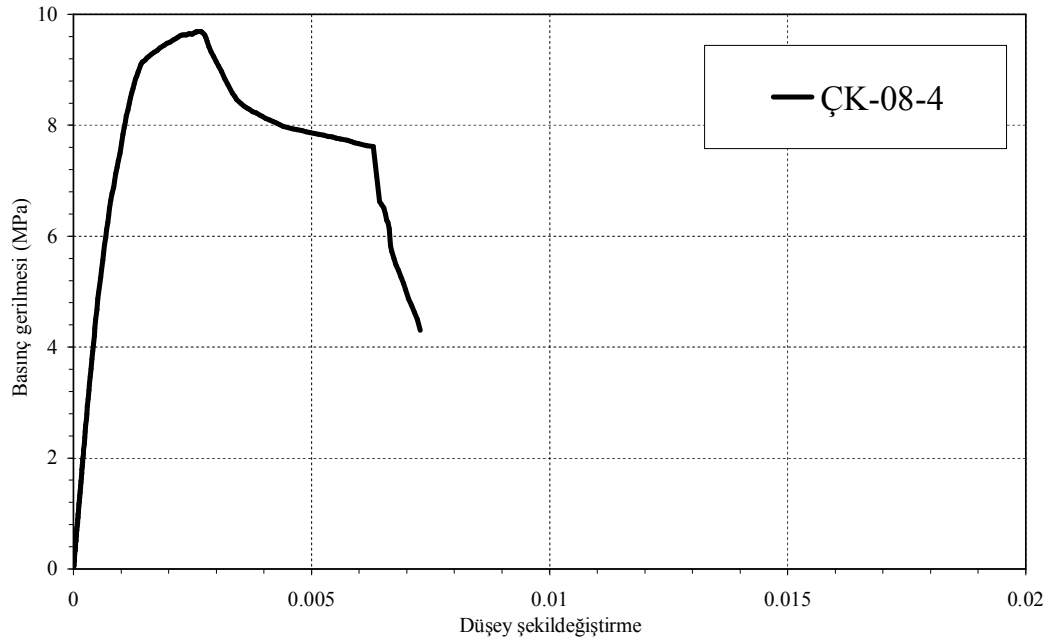
Çizelge 3.1 : Standart silindir basınç deneyi dayanım sonuçları.

Numune	P max (ton)	f_{cym} (MPa)	E_{cym} (MPa)
ÇK-08-1	16.5	9.34	-
ÇK-08-2	14.6	8.27	-
ÇK-08-3	14.8	8.38	-
ÇK-08-4	17.1	9.69	9966
ÇK-08-5	9.7	5.46	5679
ÇK-08-6	8.6	4.87	4442
ÇK-08-7	9.3	5.27	-
ÇK-08-8	16.1	9.11	7698
ÇK-08-9	10.4	5.89	-
ÇK-08-10	11.9	6.74	-
ÇK-08-11	10.0	5.66	-
ÇK-08-12	10.9	6.14	-
ÇK-08-13	12.8	7.22	-

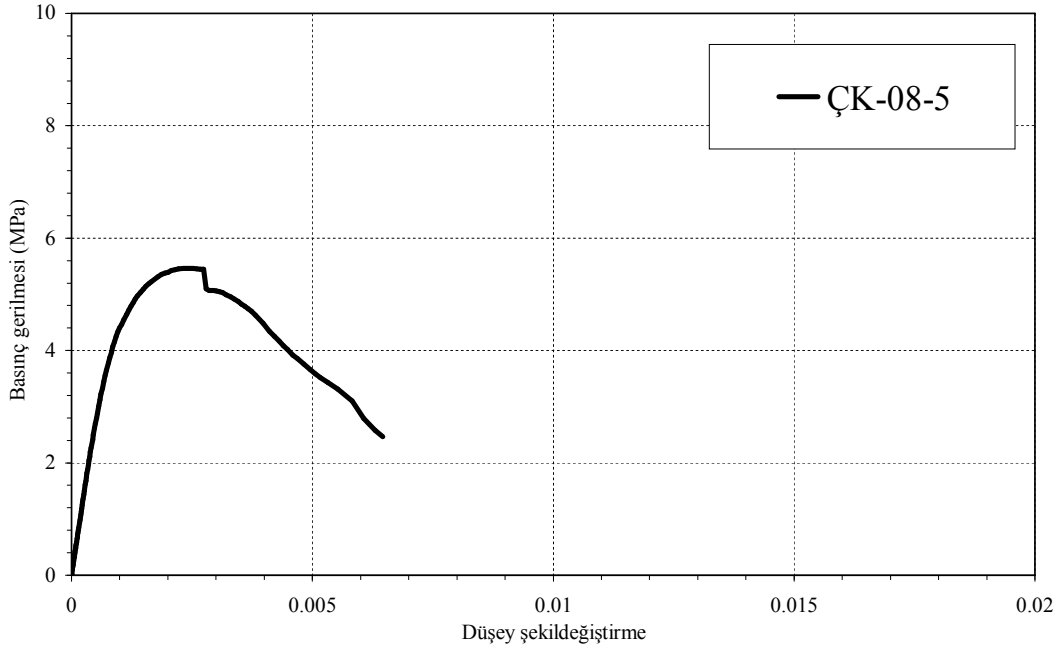
Çizelge 3.2 : Standart silindir basınç deneyi istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	f_{cym} (MPa)	E_{cym} (MPa)
Minimum	4.87	4442
Maksimum	9.69	9966
Ortalama	7.08	6946
Standard sapma	1.69	2419
Varyasyon katsayısı	0.24	0.35

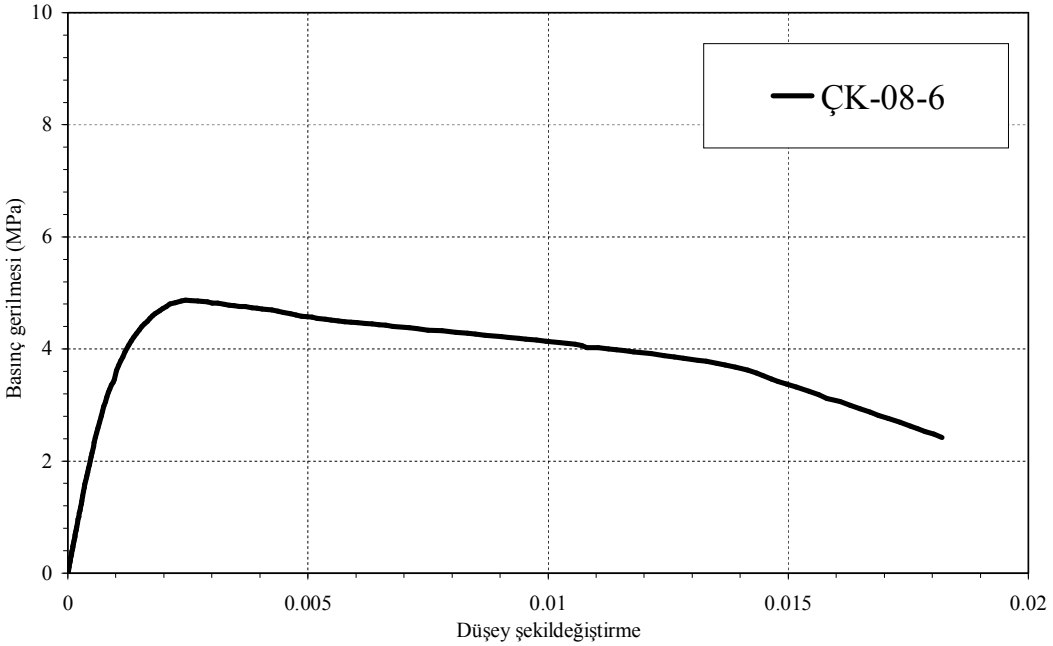
ÇK-08-4, ÇK-08-5, ÇK-08-6 ve ÇK-08-8 numunelerine ait basınç dayanımı ve şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da verilmiştir. Bu ilişkileri karşılaştırmak maksadıyla, bu grafikler bir arada verilmiştir, Şekil 3.7.



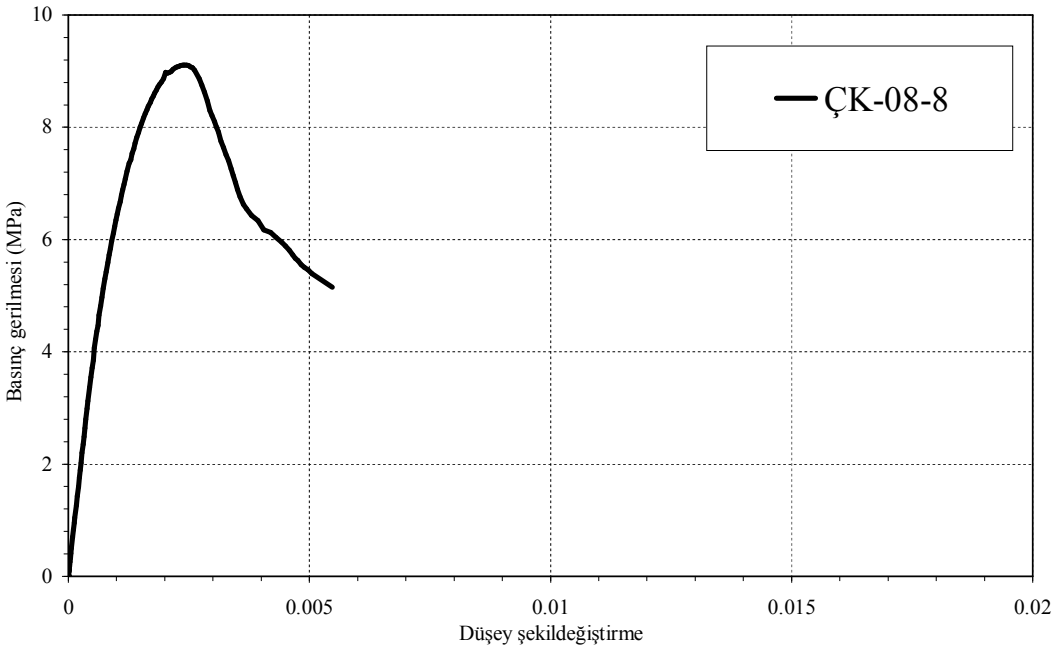
Şekil 3.3 : ÇK-08-4 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



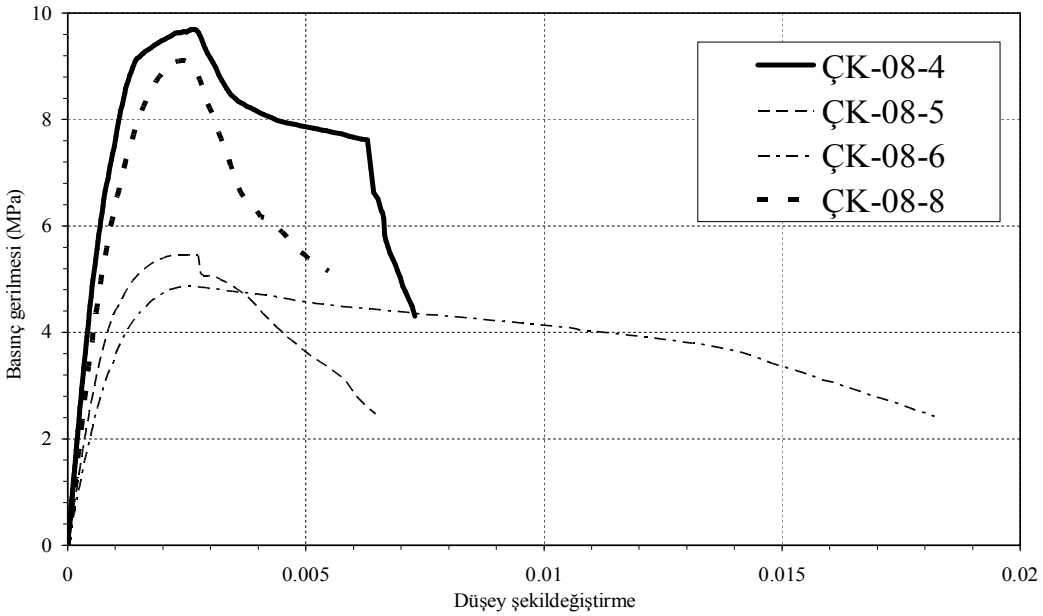
Şekil 3.4 : ÇK-08-5 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.5 : ÇK-08-6 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.6 : ÇK-08-8 gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



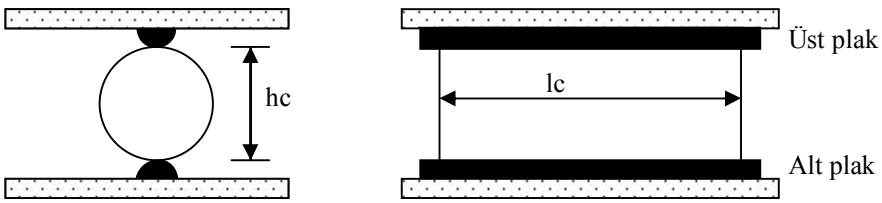
Şekil 3.7 : Standart silindir gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Eurocode 8'e [14] göre donatısız yığma duvarlarda kullanılacak harcın minimum basınç dayanımı olarak f_m = 5 N/mm^2 önerilmiştir. Deneyler sonucu bulunan ortalama harç dayanımı bu standartta verilen minimum harç dayanımından yüksek bulunmuştur.

Deney sonuçlarına bakıldığında çok farklı dayanım ve şekildeğiştirme değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bunun hem harç numunesi karışımının homojen olarak yapılamamasından hem de silindir numunelerinin kalıplara alınmasında işçilikten kaynaklanan kusurlardan meydana geldiği düşünülmektedir.

3.1.2 Çimento-Kireç Harcı Silindir Yarma Deneyleri

Harç numunelerinin çekme dayanımını belirlemek için silindir yarma deneyleri, Amsler test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney, iki adet çelik çubuk silindirin arasına yerleştirilen numuneye Şekil 3.8 de gösterildiği gibi basınç yüklemesi yapılması ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 : Standart silindir yarılma deneyi.

Deneylerden elde edilen maksimum yükler kaydedilerek, silindir yarmada çekme dayanımları aşağıda verilen Denklem **(3.1)** ile hesaplanmıştır. Elde edilen ilgili dayanımlar, Çizelge 3.3 de verilmiştir.

$$f_{cst,m} = \frac{2P_s}{\pi h_c l_c} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada P_s uygulanan maksimum yükü, h_c silindir numunenin yüksekliği, l_c ise silindir numunenin uzunluğudur. Harç numunelerinin standart silindir yarılma deneyi sonuçlarının istatistiksel değerleri Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Standart silindir yarılma deneyi dayanım sonuçları.

Numune	P_s (ton)	$f_{cst,m}$ (MPa)
ÇK-08-15	6.25	0.88
ÇK-08-16	7.65	1.08
ÇK-08-18	6.00	0.85

Çizelge 3.4 : Standart silindir yarılma deneyi istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	$f_{cst,m}$ (MPa)
Minimum	0.85
Maksimum	1.08
Ortalama	0.94
Standart sapma	0.13
Varyasyon katsayısı	0.13

3.1.3 Çimento-Kireç Harcı Küp Basınç Deneyleri

Standart 70x70 mm boyutlarında 3 adet küp numune, Amsler deney cihazı kullanılarak standart basınç deneyine tabi tutulmuştur. Harcın küp basınç dayanımı (f_{cm}) uygulanan maksimum yükün küpün kesit alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.5 de verilmiştir. Harç numuneleri standart küp basınç deneyi dayanım sonuçlarının istatistiksel değerleri verilmiştir, Çizelge 3.6.

Çizelge 3.5 : Küp basınç deneyi dayanım sonuçları.

Numune	P max (ton)	f_{cm} (MPa)
ÇK-08-1	2.9	5.9
ÇK-08-2	3.5	7.1
ÇK-08-3	2.9	6.0

Çizelge 3.6 : Küp deneyi istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	f_{cm} (MPa)
Minimum	5.9
Maksimum	7.1
Ortalama	6.4
Standart sapma	0.7
Varyasyon katsayısı	0.1

3.1.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde çimento-kireç harcı standart küp basınç dayanımı ve standart silindir basınç dayanım değerleri, harç basınç dayanımı ve çekme dayanımı arasındaki ilişki, harç basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişkilere değinilmiştir.

İlk olarak küp basınç dayanımı ve standart silindir basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için şekil faktörü hesaplanmıştır. Şekil faktörü aşağıda verilen Denklem **(3.2)** ile hesaplanmıştır.

$$şekilfaktörü = \frac{f_{cm}}{f_{cym}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Şekil faktörü küp basınç dayanımının silindir basınç dayanımına oranı olarak $\frac{f_{cm}}{f_{cym}} = \frac{6.40}{7.08} = 0.90$ hesaplanmıştır.

Harç deneylerinde, küp basınç deneylerinin varyasyon katsayısı 0.11 iken silindir basınç deneylerinde varyasyon katsayısı 0.24 çıkmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında küp basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar silindir basınç deneylerinden elde edilen sonuçlara göre daha sağlıklı sonuçlar vermiştir. Bunun nedeninin küçük

boyutlara sahip küp numunelerinin kalıplara alınmasında meydana gelen kusurların boyutları fazla olan silindir numunelerinkinden daha az olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Çimento-kireç harcı çekme ve basınç dayanımları arasındaki bağıntıyı ortaya koymak için, TS 500'de [15] verilen Denklem **(3.3)** ile silindir yarmada çekme deneyinden elde edilen ortalama yarmada çekme dayanımın değerinden numune çekme dayanımına geçilmiştir. Standartta verilen bağıntı ile elde harç numunesi çekme dayanımı 0.63 MPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre harç numunelerinin çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u çıkmıştır.

$$f_{tm} = \frac{f_{cst,m}}{1.5} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Harç numunelerinin basınç dayanımı ve elastisite modülleri arasında bir bağıntı vermek için deney sayısı yeterli değildir. Bu nedenle sadece silindir basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasındaki oranlar verilmiştir, Çizelge 3.7. Çizelgede görüldüğü üzere harç numunelerinin elastisite modülünün silindir basınç dayanımına oranı 845-1040 arasında değiştiği görülmüştür.

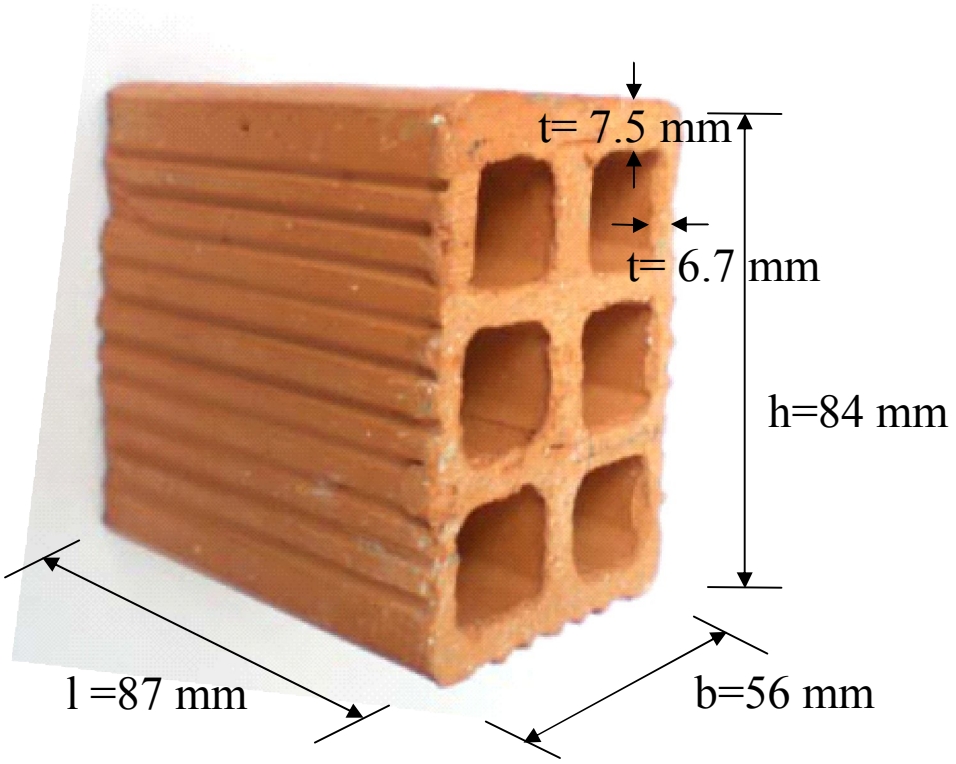
Çizelge 3.7 : Harç numuneleri basınç dayanımı ve elastisite modülü oranları.

Numune	f_{cym} (MPa)	E_{cym} (MPa)	$\frac{E_{cym}}{f_{cym}}$
ÇK-08-6	4.87	4442	912
ÇK-08-5	5.46	5679	1040
ÇK-08-8	9.11	7698	845
ÇK-08-4	9.69	9966	1028

3.2 Tuğla Özellikleri

Deney numunelerinin hazırlanmasında çalışma için özel olarak üretilmiş 1/3 ölçekli boşluklu tuğlalar kullanılmıştır, Şekil 3.9. Tuğla boyutları 56x84x87 mm dir. Tuğla boşluk oranı 0.41 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan tuğlanın delikli olması nedeniyle yükleme yönüne bağlı olarak tuğla farklı malzeme özellikleri gösterebilir. Bu nedenle tuğlaların basınç yüklemesi, deliğe dik ve delik yönünde olmak üzere iki doğrultuda ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir yönde 6 adet olmak üzere toplam 12 adet

tuğlanın basınç deneyleri Amsler ve Instron test cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Instron test cihazında deneyler 0.2 mm/dakika yükleme hızıyla yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Deliğe dik yönde test edilen numuneler "DD" ile delik yönünde test edilen numuneler ise "DY" ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : 1/3 ölçekli özel üretim fabrika tuğlası.

3.2.1 Tuğla Delik Yönünde Basınç Deneyleri

Yükün deliğe paralel olacak şekilde uygulandığı 6 adet numunenin basınç deneylerinden 3 adedi Amsler, 3 adedi Instron deney cihazlarında yapılmıştır, Şekil 3.10. İki farklı yükleme cihazı ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilen basınç dayanımlarında kayda değer bir farklılık görülmemiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.8 de verilmiştir. Tuğla delik yönü basınç deneylerinin dayanım sonuçlarının istatistiksel değerleri verilmiştir, Çizelge 3.9. Taşıyıcı duvarlarda kullanılacak tuğlalar için TDY'de [16] minimum basınç dayanımı 5 MPa olarak verilmiştir. Kullanılan tuğlalar bu standartta verilen minimum dayanım değerlerinden daha büyük dayanıma sahiptir.



Şekil 3.10 : Tuğla delik yönü Instron (solda) ve Amsler (sağda) basınç deney düzenekleri.

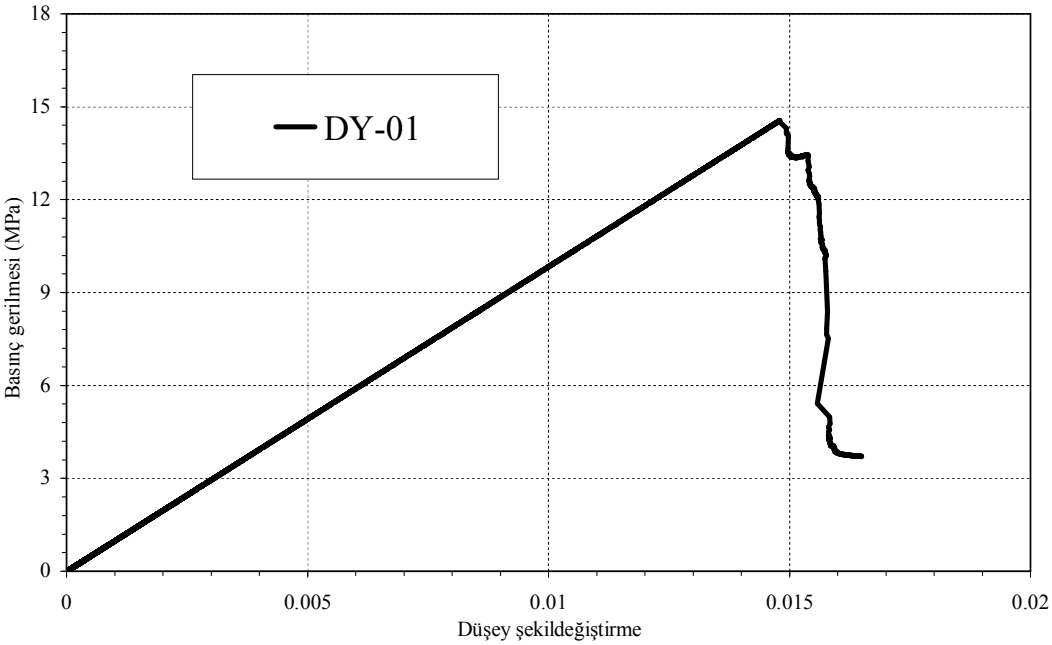
Çizelge 3.8 : Tuğla delik yönü basınç deneyi dayanım sonuçları.

Numune	P max (ton)	f_b (MPa)	E_b(MPa)
DY-01	7.0	13.80	984
DY-02	6.8	13.25	1211
DY-03	8.1	15.94	988
DY-04	5.9	11.57	-
DY-05	6.1	11.96	-
DY-06	5.8	11.37	-

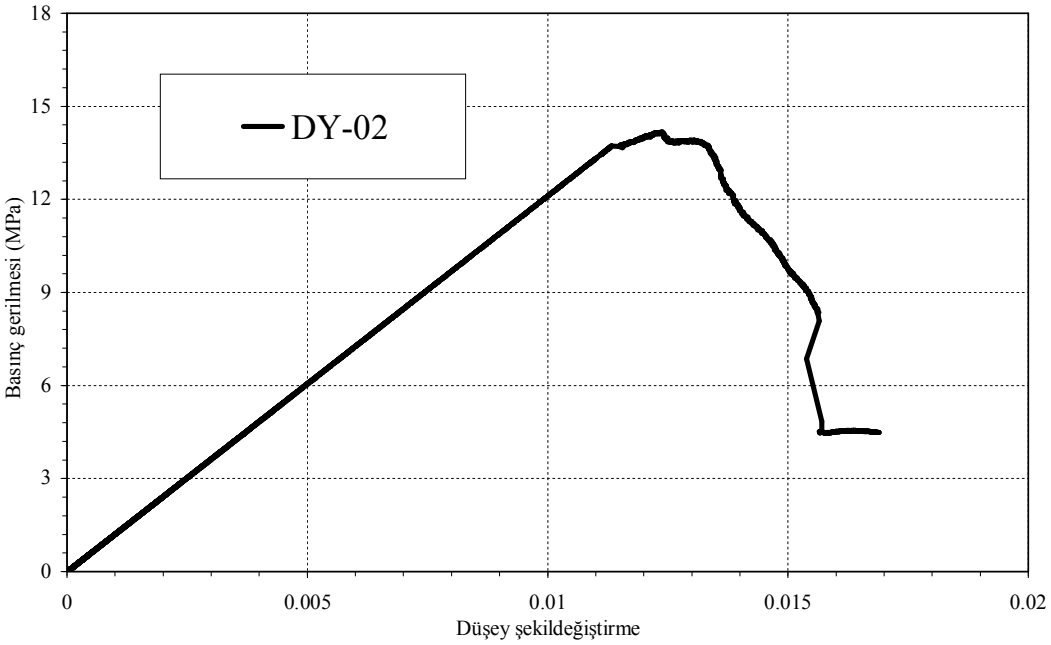
Çizelge 3.9 : Tuğla delik yönü basınç deneyi istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	f_b (MPa)	E_b(MPa)
Minimum	11.37	984
Maksimum	15.94	1211
Ortalama	12.98	1061
Standart sapma	1.74	130
Varyasyon katsayısı	0.13	0.12

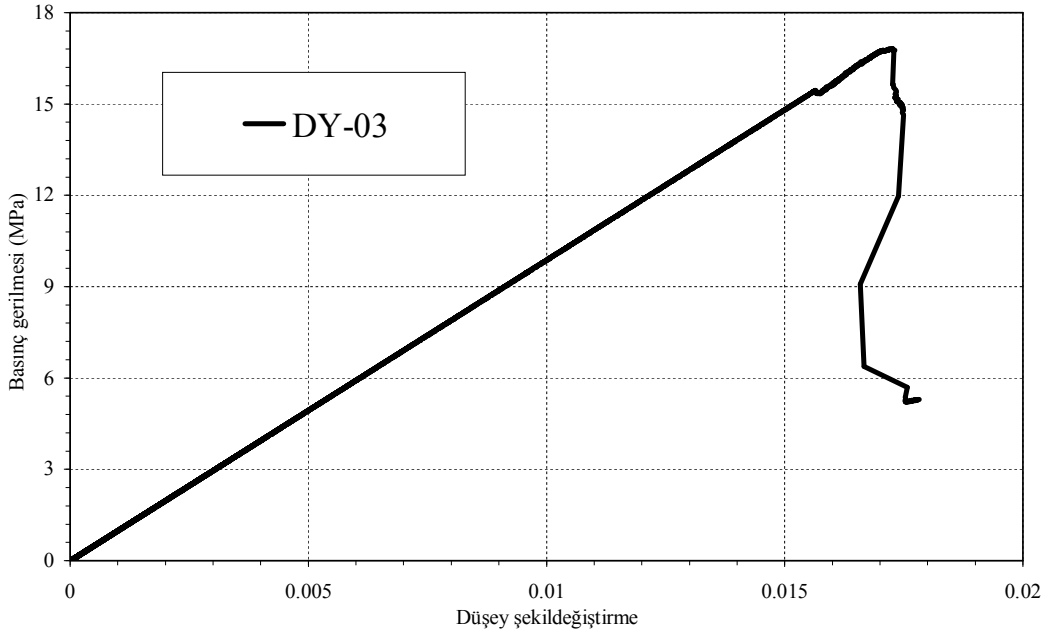
DY-01, DY-02, DY-03'e ait basınç gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 de verilmiştir. Bu deney sonuçlarının karşılaştırma grafikleri ise Şekil 3.14 de yer verilmiştir. Bu grafikler Instron tarafından sağlanan Bluehill 2 yazılımından alınmıştır. Dolayısı ile şekildeğiştirmeler numunenin tüm boyunda gerçekleşen kısalmadan yararlanılarak elde edilmiştir.



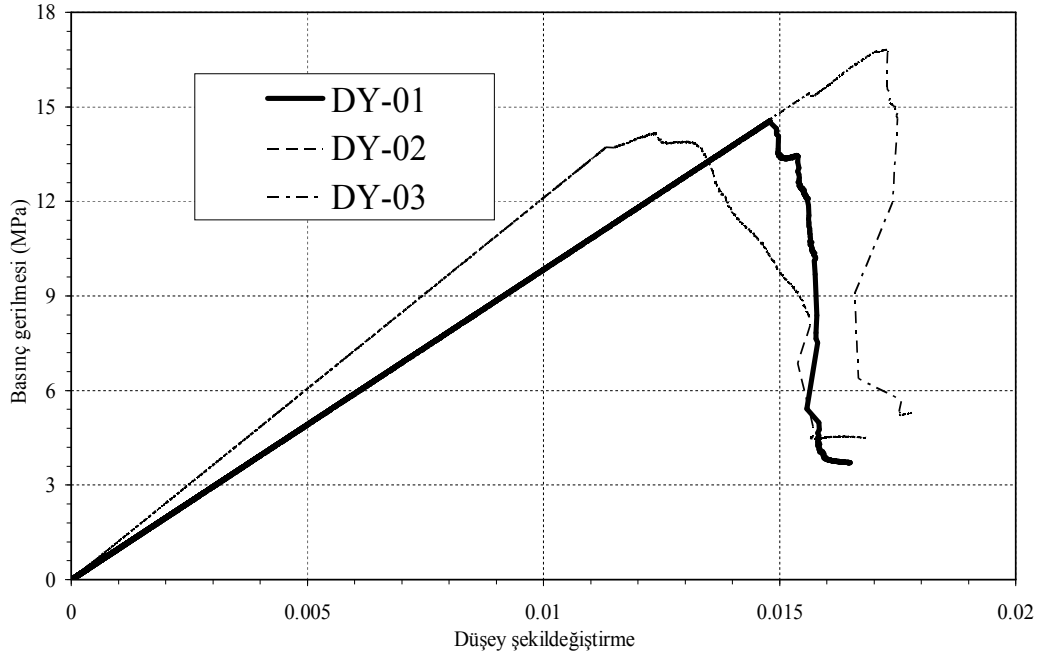
Şekil 3.11 : DY-01 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.12 : DY-02 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



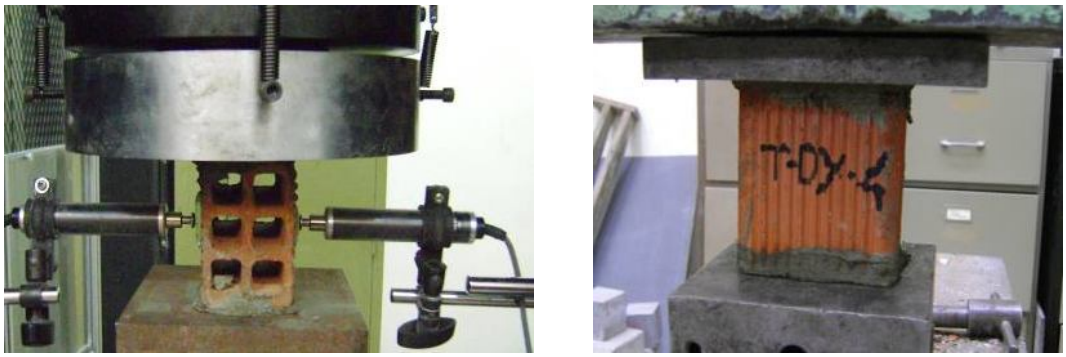
Şekil 3.13 : DY-03 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.14 : Tuğla delik yönü gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

3.2.2 Tuğla Delik Dik Yönünde Basınç Deneyleri

Yükün deliğe dik olacak şekilde uygulandığı 6 adet numunenin basınç deneylerinden 3 adedi Amsler, 3 adedi Instron deney cihazında yapılmıştır, Şekil 3.15. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10 da verilmiştir.



Şekil 3.15 : Tuğla delik dik Instron (solda) ve Amsler (sağda) basınç deney düzenekleri.

Çizelge 3.10 : Tuğla delik dik yönü basınç deneyi dayanım sonuçları.

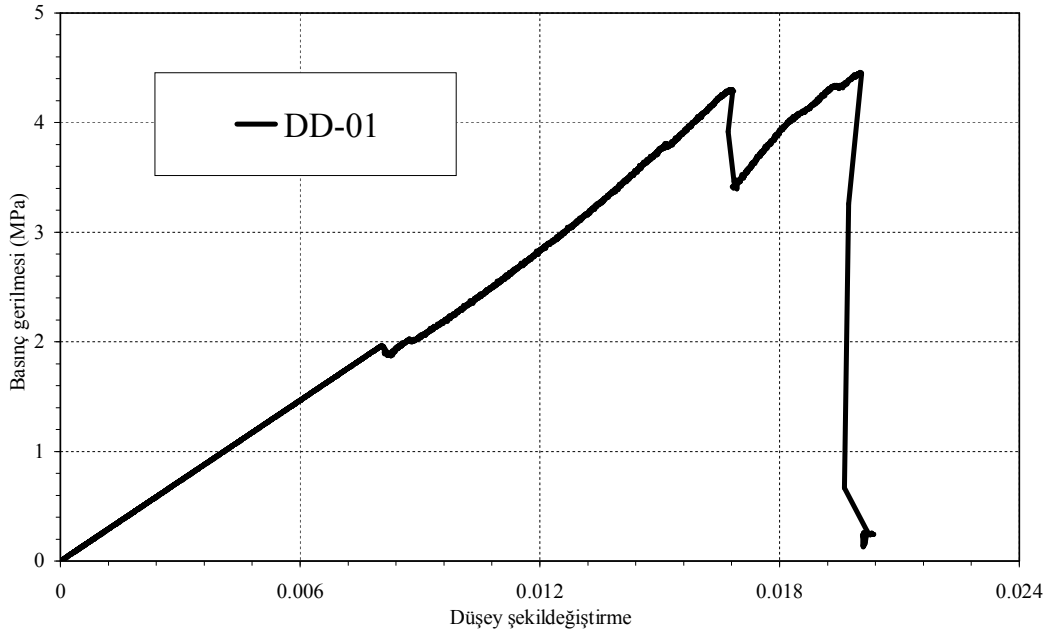
Numune	P max (ton)	f_b (MPa)	E_b(MPa)
DD-01	2.2	4.14	245
DD-02	1.6	3.20	263
DD-03	2.0	4.96	265
DD-04	2.0	4.42	-
DD-05	2.0	3.92	-
DD-06	1.6	3.14	-

Tuğla delik dik yönünde basınç deneyleri dayanım sonuçlarının istatistiksel değerleri verilmiştir, Çizelge 3.11. Taşıyıcı duvarlarda kullanılacak tuğlalar için standartta [16] minimum basınç dayanımı 5 MPa olarak verilmiştir. Kullanılan tuğlalar bu standartta verilen minimum dayanım değerlerinden daha küçük dayanıma sahiptir.

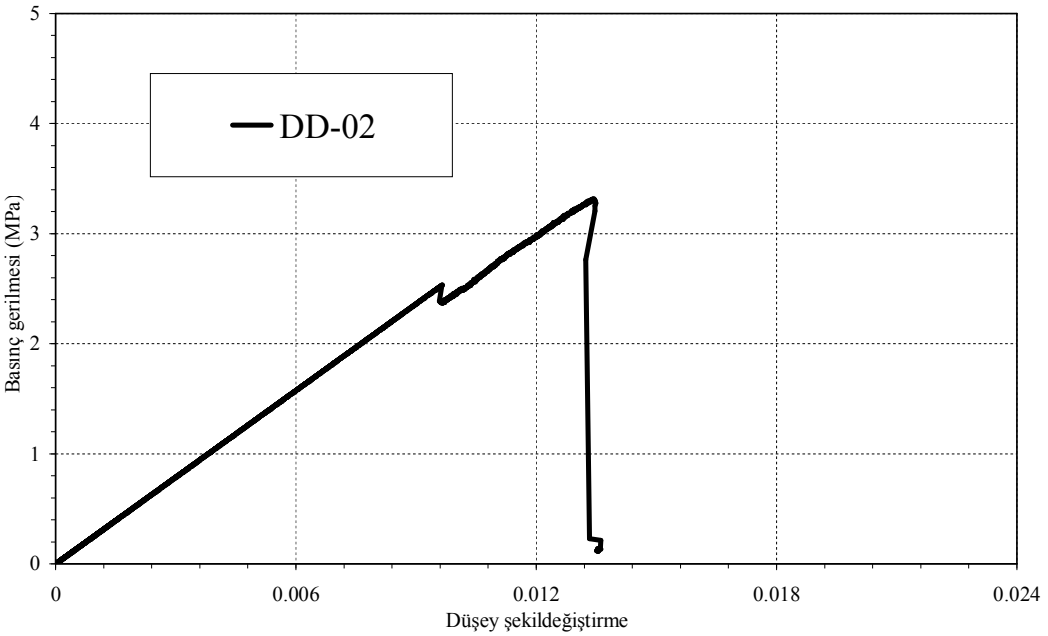
Çizelge 3.11 : Tuğla delik dik yönü basınç deneyi istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	f_m (MPa)	E_b(MPa)
Minimum	3.14	245
Maksimum	4.96	265
Ortalama	3.80	258
Standart sapma	0.52	11
Varyasyon katsayısı	0.14	0.04

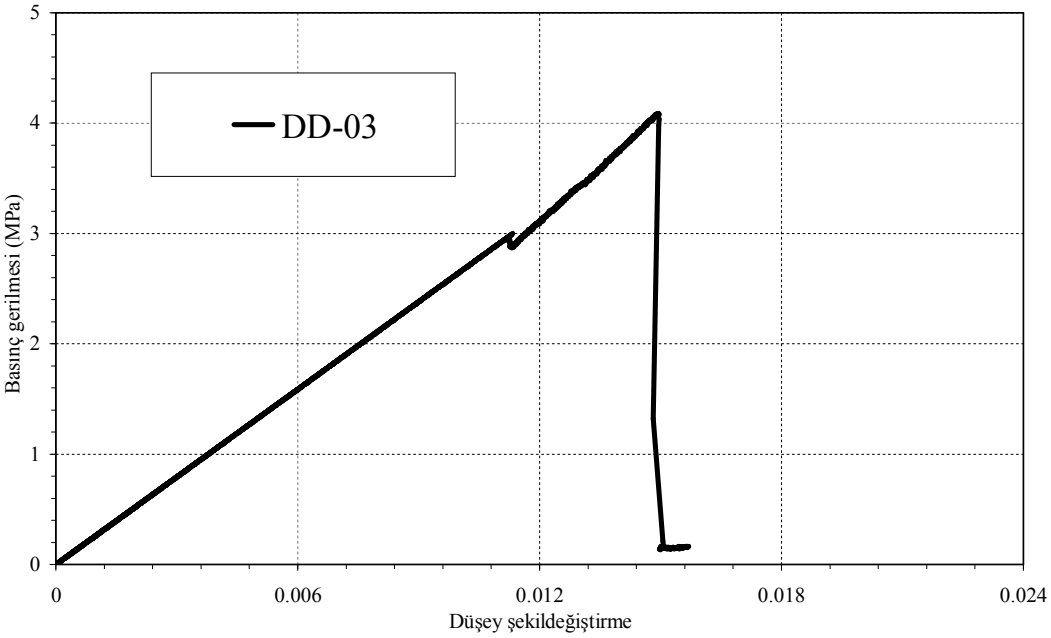
DD-01, DD-02, DD-03 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 de verilmiştir. Bu deney sonuçlarının karşılaştırma grafikleri ise Şekil 3.19 da verilmiştir.



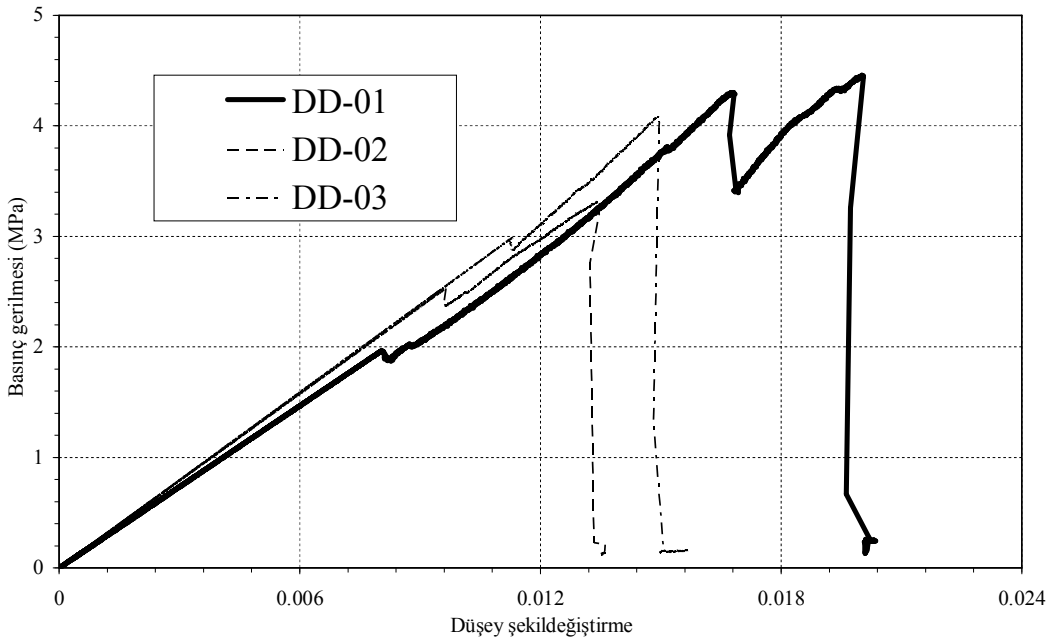
Şekil 3.16 : DD-01 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.17 : DD-02 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.18 : DD-03 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 3.19 : Tuğla delik dik yönü gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

3.3 CFRP Malzeme Özellikleri

Numune güçlendirilmesinde kullanılan karbon lifli polimerin (CFRP) malzemeye ait teknik bilgi ve karakteristik dayanımlar ayrıntılı olarak verilmiştir, Çizelge 3.12.

Çizelge 3.12 : CFRP malzeme özellikleri.

Lif tipi	Orta dayanımlı karbon fiber
Elyafın Yapısı	Lif doğrultusu:0º (tek doğrultu). Çözgü dokuması: Siyah karbon fiberler (toplam ağırlığın %99'u). Atkı dokuması: Beyaz termoplastik ısıl işleme tabi tutulmuş fiberler (toplam ağırlığın % 1'i).
Boyutları	Uzunluk kalınlık 1 Rulo ≥ 50m 300mm
Birim Ağırlık	300 g/m^2 = 15 g/m^2
Dokuma Tasarım Kalınlığı	0.17 mm (Karbon fiberlerin toplam alanına göre).
Lif Yoğunluğu	1.80 g/m^3
Kuru Fiber Özellikleri	Çekme dayanımı:3900 MPa Çekme elastisite modülü:230000 MPa Kopma uzaması: % 1.5

Numuneler lifli polimer malzemesi ile sarılmadan önce numune yüzeylerine aderans artırıcı astar malzemesi olarak kullanılan BASF-YKS Astar kullanılmıştır. BASF-YKS Astar, iki bileşenli, düşük viskoziteli, kolay uygulanabilen ve mekanik dayanımları yüksek bir malzemedir. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler Çizelge 3.13 de verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Astarın mekanik özellikleri**.**

Renk	Şeffaf
Ağırlıkça Karışım Oranları	A:%69 (Epoksi reçine) B:%31 (Epoksi sertleştirici)
Karışım Yoğunluğu (kg/lt)	1.08 ± 0.024
Katkı Madde Oranı (%)	100
Eğilme Dayanımı (7 gün) (MPa)	24
Çekme Elastisite Modülü (7 gün) (MPa)	700
Eğilme Elastisite Modülü (7 gün) (MPa)	580
Maksimum Uzama (%)	3
Uygulama Kalınlığı (mm)	0.1-0.2
Tam Kürlenme Süresi	7 gün

Güçlendirme aşamasında astar uygulamasından sonra, lifli polimer tabakaların eleman yüzeyine ve birbirlerine yapışmasını sağlamak için BASF-YKS epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır. BASF-YKS epoksi esaslı yapıştırıcı, iki bileşenli, yüksek dayanımlı bir yapıştırıcıdır. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler Çizelge 3.14 de verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Epoksi esaslı yapıştırıcının mekanik özellikleri.

Renk	Mavi
Ağırlıkça Karışım Oranları	A:%74.6 (Epoksi reçine) B:%25.4 (Epoksi sertleştirici)
Karışım Yoğunluğu (kg/lt)	1.02 ± 0.024
Viskozite (mPa.s)	1600
Basınç Dayanımı (7 gün) (MPa)	70
Eğilme Dayanımı (7 gün) (MPa)	70
Çekme Elastisite Modülü (7 gün) (MPa)	3000
Eğilme Elastisite Modülü (7 gün) (MPa)	3500
Maksimum Uzama (%)	2.5
Uygulama Kalınlığı (mm)	0.1-0.2
Tam kürlenme Süresi	7 gün

4. DUVAR DENEYLERİ

4.1 Deney Düzeneği

4.1.1 Yükleme Düzeneği

Hazırlanan duvar numuneleri İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan Satec 1000RD basınç cihazı kullanılarak denenmiştir. Satec 1000RD, yük veya yerdeğiştirme kontrollü olarak, kapalı çevrim yükleme yapabilen 5000 kN kapasiteli bir cihazdır, Şekil 4.1.



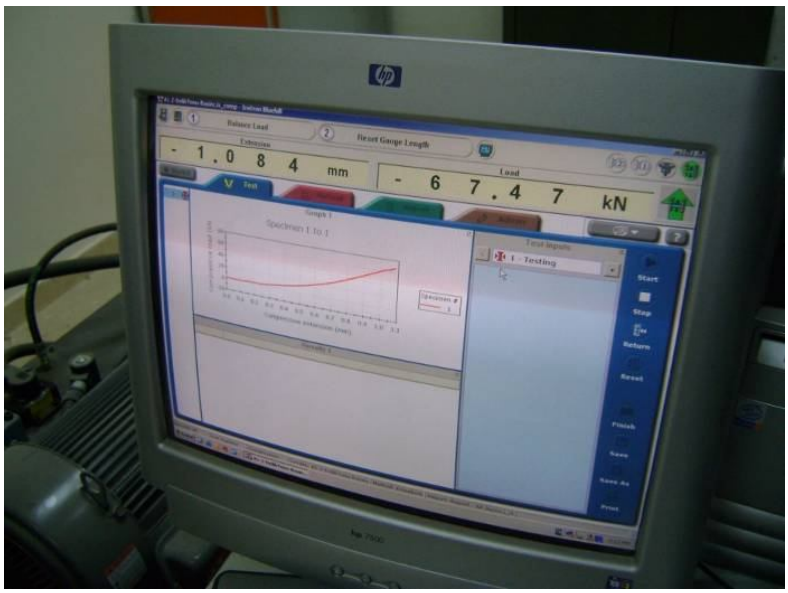
Şekil 4.1 : Instron deney aleti genel görünüşü.

Deney düzeneğinde bir alt plaka ve bir üst plaka vardır. Üst plaka mafsallıdır ve rahat bir şekilde hareket edebilmektedir. Yükleme alt plakanın altında bulunan piston ile yapılır, Şekil 4.2.



Şekil 4.2 : Instron deney aleti.

Deneylerde cihazının izleyeceği yükleme adımları ve hızı Bluehill 2 (Şekil 4.3) yardımı ile düzenlenmiştir. Tüm duvar numuneleri 0.2 mm/dakika yükleme hızıyla yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır.



Şekil 4.3 : Bluehill 2 yükleme cihazına ait kontrol yazılımı.

4.1.2 Ölçüm Düzeneği

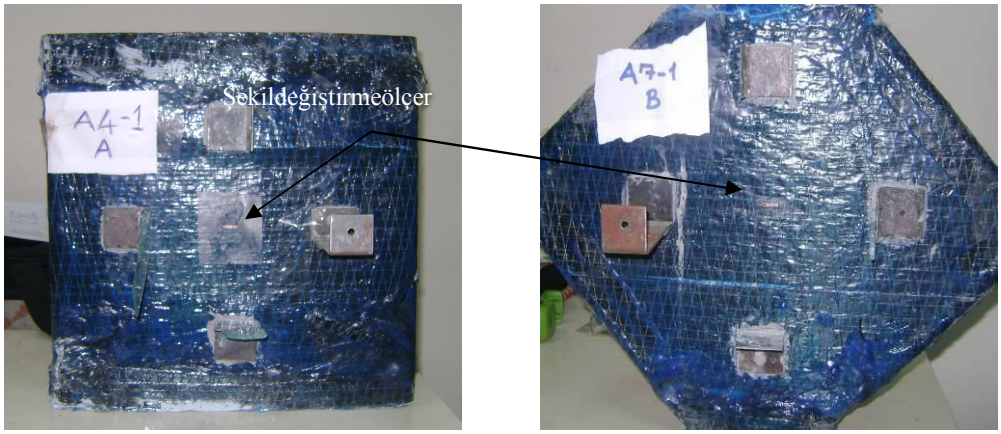
Duvar numunelerinde meydana gelen yatay ve düşey yerdeğiştirmeleri ölçmek için numune üzerine 4 adet CDP-5 yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Yerdeğiştirmeölçerler numune üzerine Şekil 4.4 deki gibi ön ve arka yüze düşey ve yatay doğrultularda yerleştirilmiştir. Yerdeğiştirmeölçerlerden alınan ölçümlerle elde edilen grafikler Instron deney cihazından alınan ölçümlerle elde edilen grafiklerle karşılaştırılmış ve elde edilen grafikler yorumlanmıştır.



Şekil 4.4 : Duvar numuneleri yerdeğiştirmeölçer yerleşimi.

Şekildeğiştirmeölçerler ise güçlendirilmiş duvar numunelerine yerleştirilmiştir. Şekildeğiştirmeölçerler yerdeğiştirmeölçerin yatay doğrultudaki ölçümlerini kontrol amacı ile kullanılmıştır. Yerleştirilen şekildeğiştirmeölçer 10 mm ölçüm boyuna sahiptir. Şekildeğiştirmeölçerlerin sağlıklı ölçüm alabilmeleri için düz bir yüzeye yapıştırılmaları gerekmektedir. Bu sebeple şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılacakları bölgelerde önceden epoksi esaslı bir yapıştırıcı kullanılarak numune üzerinde düz bir yüzey oluşturulmuştur. Şekildeğiştirmeölçerler deney numuneleri üzerine, numunenin tam ortasına gelecek şekilde yatay olarak arka ve ön yüze yapıştırılmışlardır, Şekil 4.5. Yerleştirilmiş şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçer ölçümleri TDS-303 elektronik veri toplama aleti ile alınmış ve

kaydedilmiştir. Deney aletinin ölçüm sisteminden alınan yerdeğiştirme değerleri dışarıdan alınan değerlerin karşılaştırılması amacı ile kaydedilmiştir.



Şekil 4.5 : Güçlendirilmiş duvar numuneleri şekildeğiştirmeölçer yerleşimi.

4.2 Duvar Deneyleri

Bu bölümde duvar numunelerinin mekanik özelliklerini ortaya koymak, boyut etkisini ve güçlendirme detaylarının etkinliğini araştırmak amaçlanmıştır. Duvar numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, dayanım, süneklik ve numunenin deney sonrası hasar durumu ile ilgili numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması sunulan deneysel sonuçlar arasındadır.

4.2.1 Basınç Deneyleri

Basınç gerilmeleri altında denenen numunelerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, elastisite modulü, süneklik oranı ve göçme modu bu bölümde aktarılmıştır. Bu özellikler verilirken kullanılan denklem ve semboller aşağıda açıklanmıştır.

Basınç gerilmesi (σ_{mc}) Denklem **(4.1)** de verildiği üzere, uygulanan basınç yükünün (P_c) numune en kesit alanına (A_o) oranı olarak verilmiştir. Basınç dayanımı (f_{mc}) ise basınç gerilmelerinin en büyüğü olarak alınmıştır.

$$\sigma_{mc} = \frac{P_c}{A_o} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Düşey şekildeğiştirme $(\varepsilon_{v,mc})$ ise Denklem **(4.2)** verildiği gibi numunenin birim boyundaki kısalma olarak tanımlanmış ve hem Instron deney cihazı hem de

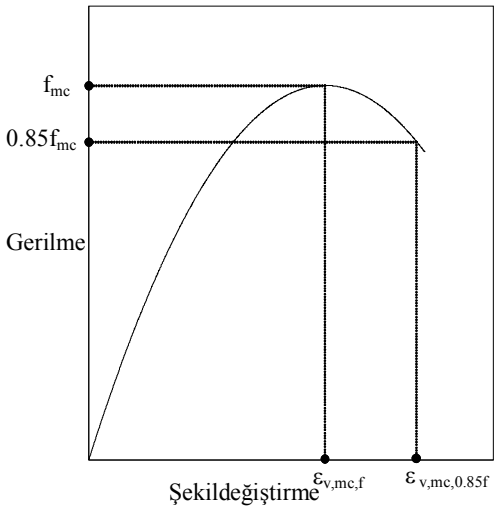
yerdeğiştirmeölçerler aracılığı ile toplanan veriler yardımı ile hesaplanmıştır. Yerdeğiştirmeölçer ile hesaplanan düşey şekildeğiştirme ölçüm boyunda meydana gelen değişimin (Δl) yerdeğiştirmeölçerin başlangıç ölçüm boyuna (l_o) oranı olarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_{v,mc} = \frac{\Delta l}{l_o} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Elastisite modulü (E_{mc}) değeri yerdeğiştirmeölçerler ile toplanan veriler için duvar numunelerinin maksimum basınç dayanımlarının %5 ile %33'ü arasındaki eğim olarak tanımlanmıştır, [17]. Elastisite modulü Instron deney cihazından elde edilen veriler için numunelerin maksimum basınç dayanımına kadar olan kısımda, en yüksek eğimli bölgenin eğimi olarak tanımlanmıştır. Eğimine bakılan bölgeler ise maksimum basınç dayanımlarının %5 ile %33'den başlayarak artan ve aralık değişmeden maksimum basınç dayanımına kadar olan bölgelerdir.

Süneklik (μ_{mc}) ise Denklem **(4.3)** de verildiği üzere, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde düşen kol üzerinde maksimum basınç dayanımının yüzde 85'i düzeyindeki gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirmenin $(\varepsilon_{v,mc,0.85f})$, maksimum basınç dayanımındaki şekil değiştirmeye $(\varepsilon_{v,mc,f})$ oranı olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.6 da süneklik tanımı gösterilmiştir.

$$\mu_{mc} = \frac{\varepsilon_{v,mc,0.85f}}{\varepsilon_{v,mc,f}} \qquad \textbf{(4.3)}$$



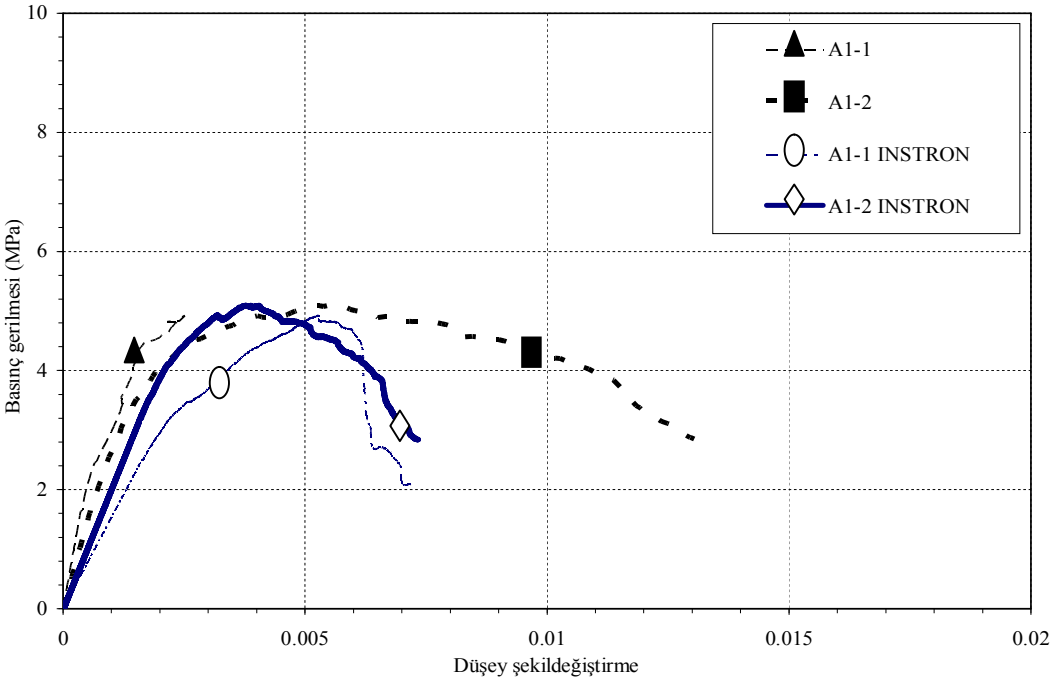
Şekil 4.6 : Süneklik tanımı.

Deney sırasında numuneler tarafından tüketilen enerji miktarı numunelerin basınç gerilmesi-düşey şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alandan hesaplanabilir. Alan hesabında; ilgili numuneler için, düşey yük-düşey şekildeğiştirme eğrisinin düşen kolu üzerinde maksimum yük seviyesinin 0.85'i seviyelerine kadar gelen kısmın altında kalan alan ($A_{0.85f}$) dikkate alınmıştır. Tüketilen enerji miktarı yalnızca Instron deney cihazından elde edilen veriler için hesaplanmıştır.

4.2.2 Güçlendirilmemiş Duvar Basınç Deneyleri

4.2.2.1 A1 Numuneleri Basınç Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin delik yönüne paralel olarak yüklenmesi durumundaki davranışı bu paragrafta özetlenmektedir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından ve Instron deney cihazı tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.7. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. A1-1 numunesinde dayanımdan hemen sonra numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve sağlıklı veri alınamamıştır, bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler bu kısımlar verilememiştir.



Şekil 4.7 : A1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçeri için verilmiştir, Çizelge 4.1. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.2 de verilmiştir. Çizelgede ölçüm düzeneğindeki hatalardan ötürü elde edilemeyen değerler "DH", hesaplanamayan değerler "-", yerdeğiştirmeölçerden alınan değerler "Y.D.Ö", Instron deney cihazından alınan değerler ise "INS."ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : A1 numuneleri deney sonuçları.

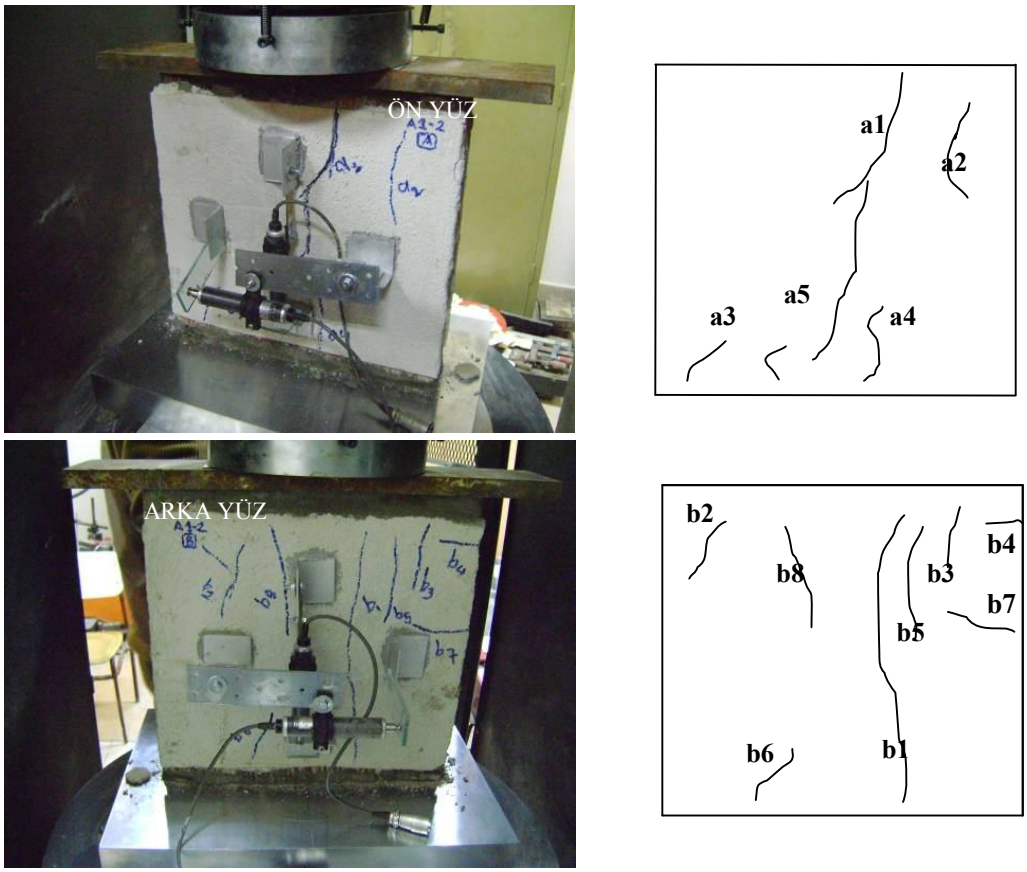
Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,p}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	$E_{mc,p}$ (MPa)	$\mu_{mc,p}$	$A_{0.85f}$
A1-1	Y.D.Ö	4.92	0.25	DH	4497	DH	-
	INS.	4.92	0.53	0.62	1534	1.18	0.021
A1-2	Y.D.Ö	5.09	0.55	0.94	2916	1.71	-
	INS.	5.09	0.40	0.58	2014	1.43	0.022

Çizelge 4.2 : A1 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö.	INS.
$f_{mc,p}$ (MPa)	5.02	5.02	0.12	0.12	0.02	0.02
$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	0.40	0.47	0.21	0.09	0.53	0.19
$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	-	0.60	-	0.03	-	0.05
$E_{mc,p}$ (MPa)	3707	1774	1118	339	0.30	0.19
$\mu_{mc,p}$	-	1.30	-	0.18	-	0.13
$A_{0.85f}$	-	0.021	-	0.001	-	0.034

A1-1 Numunesinde ilk çatlak 3.45 MPa gerilme düzeyinde oluşmuştur. İlk çatlaklar (a1, b1) numunenin orta bölgesinde, ön ve arka yüzde oluşmuştur. Ön yüzde oluşan çatlak başlıktan başlamış bir miktar ilerledikten sonra durmuştur. Arka yüzde ise başlıktan başlayan çatlak numunenin alt kısmına kadar ilerlemiştir. İkinci çatlak 4.25 MPa gerilme düzeyinde; ön yüzde (a2) numunenin kenar bölgesine yakın, arka yüzde (b2) ise yine orta bölgede oluşmuştur. 4.52 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde oluşan çatlak ilerleyerek numunenin alt tarafına kadar inmiştir. 4.75 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde sol alt tarafta bir çatlak (a3) daha oluşmuştur. 4.90 MPa gerilme düzeyinde arka yüzeyde sağ üst kenarda yeni çatlaklar (b3,b4) oluşmuştur. Bu çatlaktan sonra

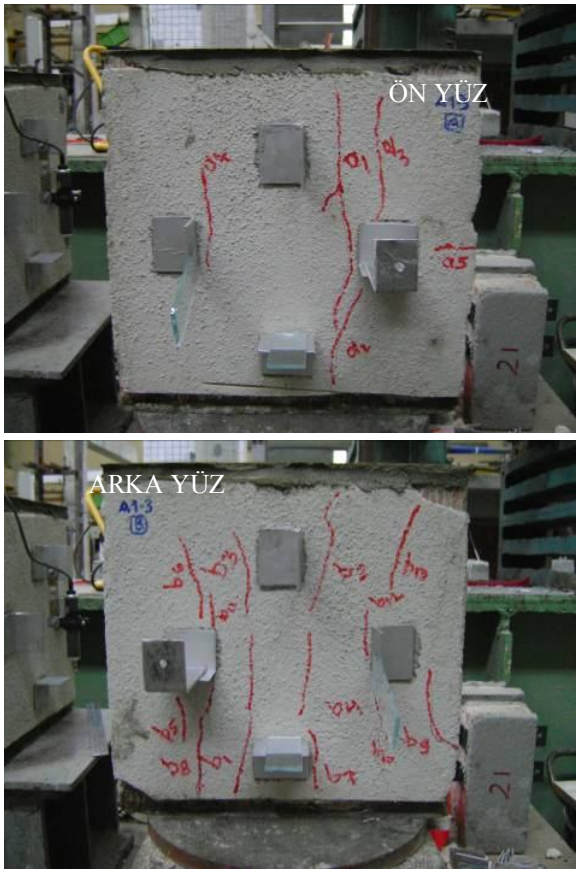
gerilme 4.92 MPa gerilme düzeyine kadar çıkmış ve bu gerilme değerinden sonra gerilme azalmaya başlamıştır. Gerilme azalırken 4.67 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde kenarda yeni bir çatlak (b5) oluşmuştur. 4.32 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde ilk oluşan çatlağın genişliği artmış aynı zamanda orta alt bölgede ilk çatlağa yakın bir yerde yeni bir çatlak (a4) daha meydana gelmiştir. Arka yüzde ise yeni küçük çatlaklar (b6, b7) oluşmuştur. 3.86 MPa gerilme düzeyinde ani yük düşüşleri meydana gelmiştir. Bundan sonra arka ve ön yüzde yeni çatlaklar (a5, b8) oluşmaya başlamış ve önceden oluşan çatlaklarda genişlik artmıştır. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.8 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.1 de verilmiştir.



Şekil 4.8 : A1-1 numunesi deney sonrası hasar durumu.

A1-1 numunesinde hasarlara bakıldığında hasarlar orta bölgede ve harç üzerinde oluşmuştur. Tuğlanın delik yönünde olması yani kesitin sürekli olması bunda en büyük etkendir. Numunelerin yan yüzlerine de bakıldığında tuğlalarda herhangi bir kırık görülmemektedir. Hasar durumu göz önüne alındığında numune üzerinden orta bölgeye yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından alınan ölçümlerin gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

A1-2 numunesinde ilk çatlak (a1) 0.78 MPa gerilme düzeyinde ön yüz üst orta bölgede çok erken oluşmuştur. İkinci çatlak (a2) 2.66 MPa gerilme düzeyinde ve yine ön yüzde oluşmuştur. Bu çatlak yine orta bölgede yalnız alt tarafta oluşmuştur. 4.15 MPa gerilme düzeyinde ön yüz alt tarafta oluşan çatlak ilerleyerek üstte oluşan çatlakla birleşmiştir. 4.40 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde ilk çatlak (b1) orta alt tarafta oluşmuştur. 4.76 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde üst orta bölgede iki yeni çatlak (b2, b3) daha oluşmuştur. 4.93 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde iki yeni çatlak (b4, b5) daha meydana gelmiştir. 5.05 MPa gerilme düzeyinde arka yüz üst kenar bölgede yeni bir çatlak (b6) daha oluşmuş bu çatlaktan sonra gerilme 5.09 MPa gerilme düzeyine kadar çıkmış ve bu gerilme değerinde sonra yük azalmaya başlamıştır. Yük azalırken 4.89 MPa gerilme seviyesinde arka yüzde orta alt kısımda, ön yüzde ise üst bölgede ilk çatlağa yakın bir yerde yeni çatlaklar (a3, b7) oluşmuştur. 4.73 MPa gerilme düzeyinde ön ve arka yüzde yeni çatlaklar (a4, b8) meydana gelmiştir. Bu yükten sonra arka yüzde çeşitli gerilme düzeylerinde çatlaklar (b9, b10, b11, b12) oluşmaya devam etmiştir. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.9 da, numune hasar gelişimi ise Şekil A.2 de verilmiştir.



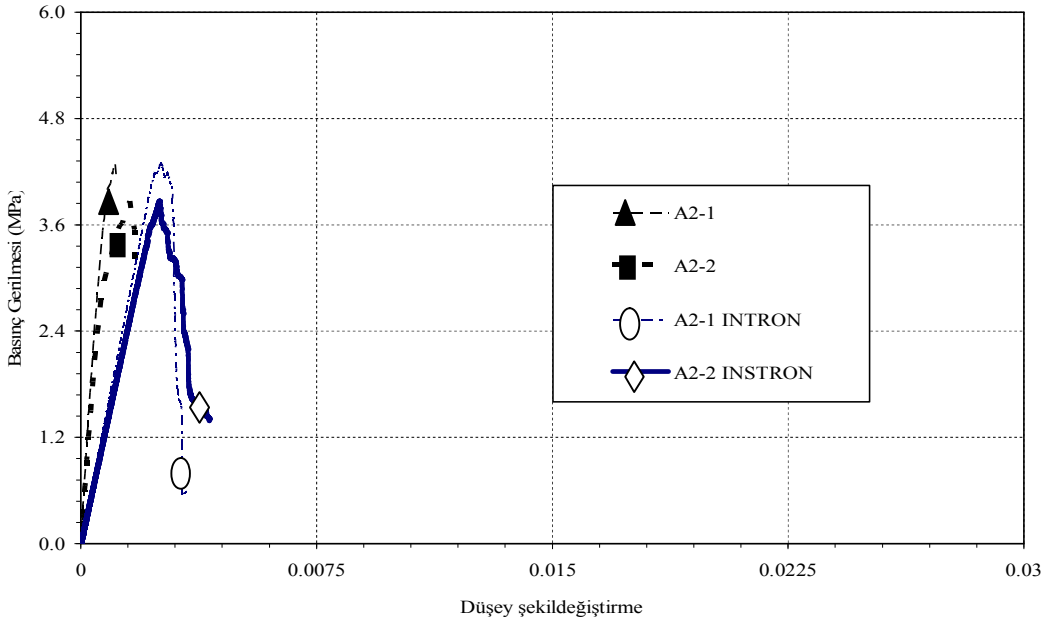
* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.9 : A1-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

A1-2 numunesinde hasarlara bakıldığında yine hasarlar orta bölgede ve harç üzerinde oluşmuştur. A1-2 numunesinde özellikle arka yüzde çok fazla miktarda çatlak meydana gelmiştir. Bu hasar durumu nedeni ile A1-1 numunesine kıyasla daha fazla şekildeğiştirme yapmıştır. Numunelerin yan yüzlerine bakıldığında tuğlalarda herhangi bir kırık görülmemektedir. Hasar durumu göz önüne alındığında numune üzerinden orta bölgeye yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından alınan ölçümlerin gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

4.2.2.2 A2 Numuneleri Basınç Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin delik yönüne dik olarak yüklenmesi durumundaki davranışı bu paragrafta özetlenmektedir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından ve Instron deney cihazı tarafından deney esnasında kaydedilen veriler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.10. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. Her iki numunede de dayanımdan kısa bir süre sonra numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve veri alınamamıştır, bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafiklerde bu kısımlar verilememiştir.



Şekil 4.10 : A2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçerleri için verilmiştir, Çizelge 4.3. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.4 de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : A2 numuneleri deney sonuçları.

Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,n}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	$E_{mc,n}$ (MPa)	$\mu_{mc,n}$	$A_{0.85f}$
A2-1	Y.D.Ö	4.29	0.11	DH	5938	DH	-
	INS.	4.29	0.26	0.30	1810	1.15	0.008
A2-2	Y.D.Ö	3.86	0.16	0.17	4884	1.09	-
	INS.	3.86	0.25	0.28	1636	1.12	0.006

Çizelge 4.4 : A2 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.
$f_{mc,n}$ (MPa)	4.10	4.10	0.30	0.30	0.07	0.07
$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	0.13	0.25	0.03	0.01	0.25	0.02
$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	-	0.29	-	0.01	-	0.04
$E_{mc,n}$ (MPa)	5411	1723	745	123	0.14	0.07
$\mu_{mc,n}$	-	1.13	-	0.02	-	0.01
$A_{0.85f}$	-	0.007	-	0.001	-	0.142

A2-1 numunesinde ilk çatlak (b1) gerilmenin en büyük değerine yakın bir değerde 4.21 MPa da arka yüz orta alt bölümde meydana gelmiştir. Çatlak başlığa yakın bir yerde meydana gelmiş ve fazla ilerlememiştir. Gerilme değeri bu çatlaktan sonra bir miktar azaldıktan sonra tekrar artmış ve 4.29 MPa değerine kadar çıkmıştır. Bu değer gerilmenin en büyük değeridir. Bu değerden sonra yükte ani düşüşler meydana gelmiştir. Numune ani olarak göçmüş ön ve arka yüzeyde dikkate değer çatlaklar oluşmazken, sıva toptan arka yüzde atmış, numunenin yan tarafından tuğlaların kırıldığı görülmüştür. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.11 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.3 de verilmiştir.

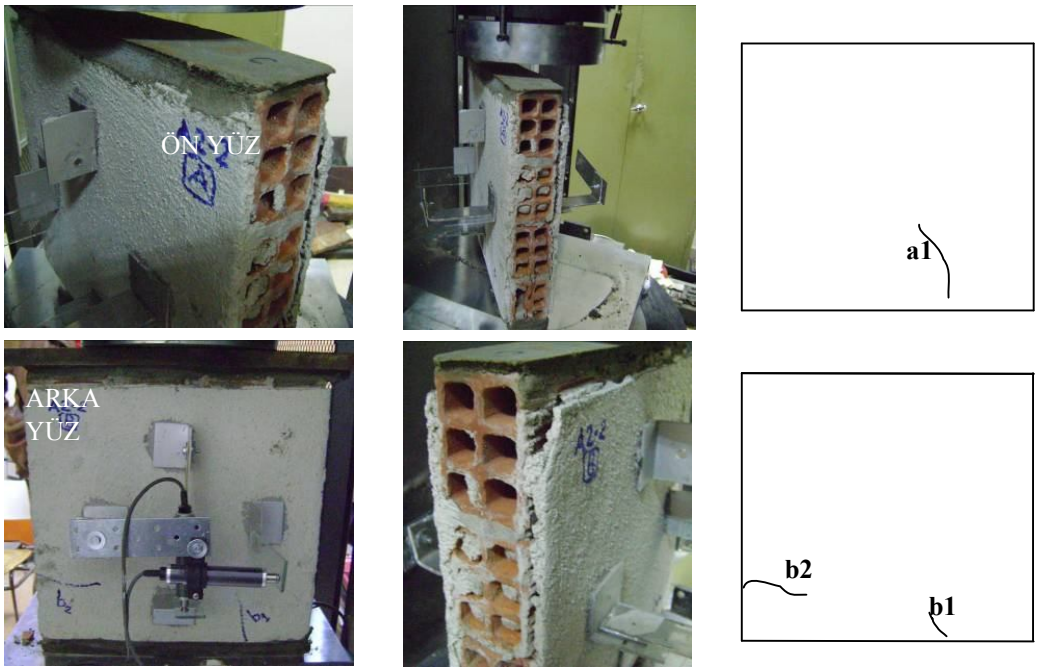
A2-1 numunesinde hasarlar yan yüzlerde ve numune içinde meydana gelmiştir. Yükler tuğla deliklerine dik olarak verildiği için tuğla kesitleri sürekli olmadığından

kesitin zayıf olduğu yerlerde kırılma olmuştur. Kırıklar numune üst bölgesinden alt kısma kadar zayıf kesitler boyunca ilerlemiştir. Harçta önemli çatlaklar oluşmazken, arka yüzde sıva harç yüzünden atmıştır. Yerdeğiştirmeölçer ölçüm düzeneği orta kısımdan ölçüm aldığı için buralarda hasar oluşmaması yüzünden, Instron deney düzeneğinin tam boy üzerinden aldığı ölçümlerin daha sağlıklı olduğu düşünülmektedir. Instron deney düzeneği ile yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiklerindeki farklılığın A2 numunelerinde A1 numunelerine göre daha fazla ve belirgin olmasının nedeninin yine bu hasar oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

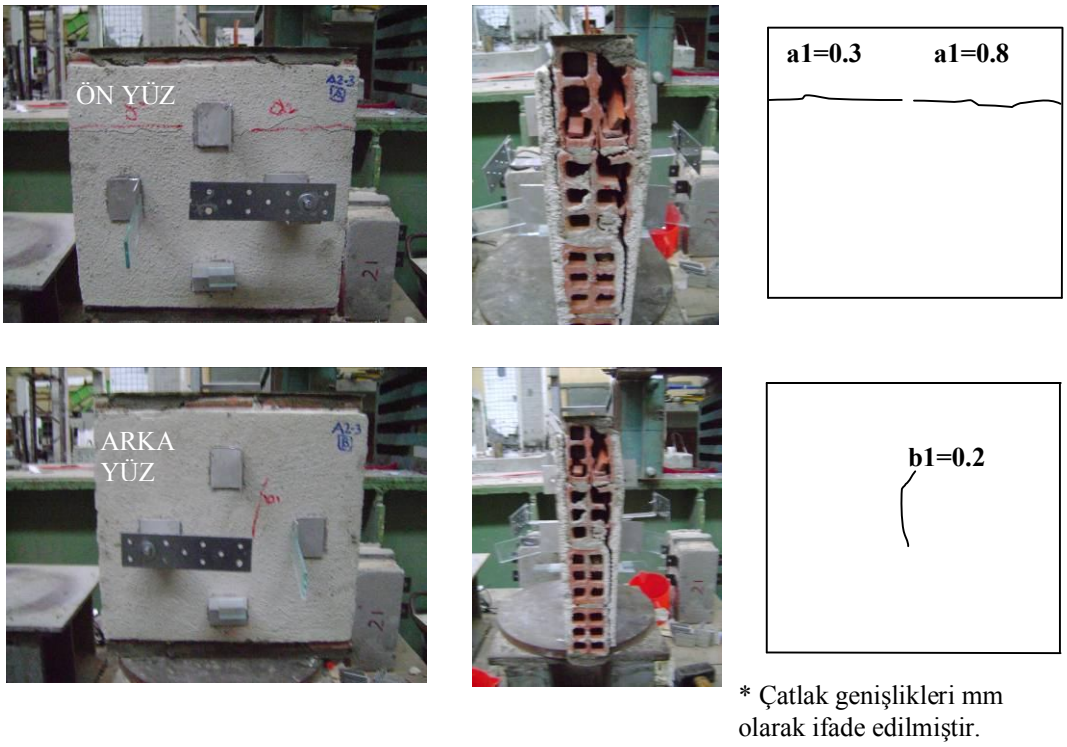
A2-2 numunesinde ilk çatlak (b1) 2 MPa gerilme düzeyinde arka orta bölümde meydana gelmiştir. Gerilme 4.39 MPa değerine kadar artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Bu değere kadar numunede başka bir çatlak oluşmamıştır. Gerilmede bu değerden sonra ani düşüşler meydana gelmiştir. Numune ani olarak göçmüş, ön ve arka yüzde dikkate değer çatlak oluşmazken sıva toptan üst arka ve ön yüzde atmış, numunenin yan tarafından tuğlaların kırıldığı görülmüştür. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.12 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.4 de verilmiştir.

A2-2 numunesindeki hasar oluşumu A2-1 numunesindekine benzerdir. Harç üzerinde ve özellikle yerdeğiştirmeölçerlerin ölçüm aldığı bölgede hasar oluşmamıştır. A2-2 numunesinde üst kısımdaki tuğlada zayıf kesitte başlayan kırık bu tuğla boyunca zayıf kesitlerde devam ederek yatay harç derzine kadar ilerlemiştir. Bu derzi aşan kırık bir alt sıradaki tuğlada zayıf kesitler boyunca devam etmiş ve yatay derze ulaşmıştır. Bu kısımda çatlak bir alt sırada bulunan tuğlaya ulaşmamış, tuğla ile yüzeye uygulanan harcın birleştiği yüzeye inmiş ve buradan alt kısma kadar devam ederek sıvayı tuğla yüzeyinden ayırmıştır. Bu numunede de Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçer tarafından elde edilen grafikler arasında A1 numunelerine göre daha fazla fark vardır. Bunun nedeni ifade edilen hasar durumu yüzünden yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği bölgelerde göçmeye neden olan hasarın oluşmamasıdır. Instron deney düzey düzeneği ile numune boyunca alınan ölçümlerin numunenin şekildeğiştirme karakteristiğini daha doğru olarak gösterdiği düşünülmektedir.

A2 numunelerinin davranışına bakıldığında A1 numunelerinden daha düşük dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda A2 numunelerinin sünekliği A1 numunelerinden daha düşüktür.



Şekil 4.11 : A2-1 numunesi deney sonrası hasar durumu.



* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

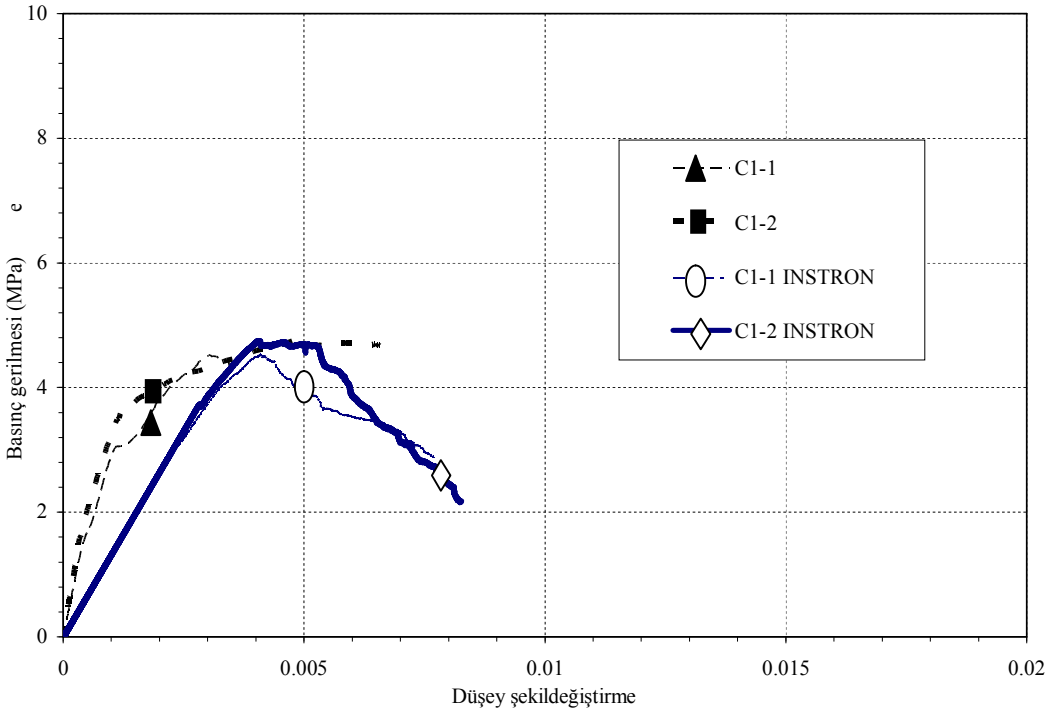
Şekil 4.12 : A2-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

4.2.2.3 C-1 Numuneleri Basınç Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin delik yönüne paralel olarak yüklenmesi durumundaki davranışı bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından ve Instron deney cihazı tarafından

deney esnasında kaydedilen veriler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.13. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. Her iki numunede de dayanımdan hemen sonra numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve sağlıklı veri alınamamıştır, bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafiklerde bu kısımlar verilememiştir.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçerleri için verilmiştir, Çizelge 4.5. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.6 da verilmiştir.



Şekil 4.13 : C1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Çizelge 4.5 : C1 numuneleri deney sonuçları.

Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,p}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	$E_{mc,p}$ (MPa)	$\mu_{mc,p}$	$A_{0.85f}$
C1-1	Y.D.Ö	4.53	0.30	0.47	3744	1.54	-
	INS.	4.53	0.41	0.53	1319	1.28	0.015
C1-2	Y.D.Ö	4.75	0.48	0.61	4687	1.28	-
	INS.	4.75	0.41	0.59	1323	1.46	0.019

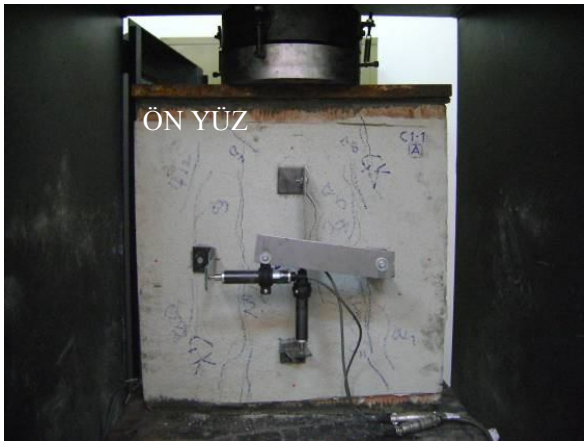
Çizelge 4.6 : C1 numuneleri istatistiksel değerleri.

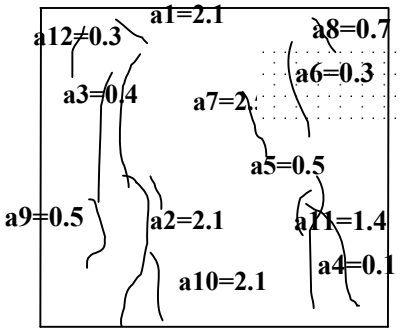
İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.
$f_{mc,p}$ (MPa)	4.60	4.60	0.16	0.16	0.03	0.03
$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	0.39	0.41	0.12	0.00	0.31	0.00
$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%	0.54	0.56	0.10	0.05	0.18	0.08
$E_{mc,p}$ (MPa)	4216	1321	667	3	0.16	0.00
$\mu_{mc,p}$	1.41	1.37	0.18	0.12	0.13	0.09
$A_{0.85f}$	-	0.017	-	0.003	-	0.156

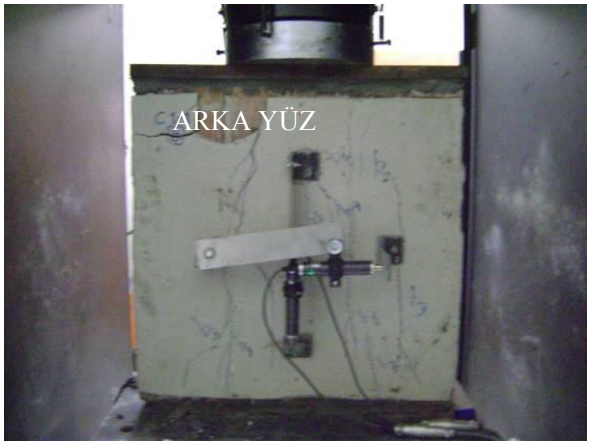
C1-1 numunesinde ilk çatlak (b1) 0.15 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde üst orta bölümde oluşmuştur. 0.40 MPa gerilme düzeyinde arka üst orta bölümde yeni bir çatlak (b2) daha oluşmuştur. 0.61 MPa gerilme düzeyinde ön üst orta bölümde, arka orta bölgede çatlaklar (a1, b3, b4) meydana gelmiştir. Oluşan tüm çatlaklar çok küçük kılcal çatlaklardır. 1.45 MPa gerilme düzeyinde ön ve arka yüzde orta kısımda birer çatlak (a2, b5) daha meydana gelmiştir. 1.88 MPa gerilme düzeyinde arka orta bölümde yeni bir çatlak (b6) daha oluşmuştur. 2.42 MPa gerilme düzeyinde ön orta bölümde yeni bir çatlak (a3) meydana gelmiş ve burada daha önce oluşan çatlak alt kısma kadar ilerlemiştir. 3.03 MPa gerilme düzeyinde arka orta alt bölgede bir çatlak (b7) oluşmuştur. 3.38 MPa gerilme düzeyinde ön ve arka yüzde orta kısımdan alt kısma ilerleyen birer çatlak (a4, b8) meydana gelmiştir. Bu ana kadar meydana gelen çatlaklar orta bölümde üstten ortaya, orta kısımdan alt kısma yükleme yönünde ilerleyen çatlaklardır. 4.1 MPa gerilme düzeyinde ön orta bölümde, 4.27 MPa gerilme düzeyinde ön üst orta kısımda ve arka orta bölümde, 4.52 MPa gerilme düzeyinde ön orta bölgede birer çatlak (a6, a7, a8, b9) daha oluşmuştur. Bu çatlak gerilme en büyük değere ulaştığında oluşmuştur. Bu değerden sonra gerilme azalmaya başlamıştır. Azalan kolda 4.4 MPa gerilme düzeyinde ön orta bölümde ve üst kenar bölgede birer çatlak (a11, a12) oluşmuştur. 4.19 MP gerilme düzeyinde arka bölümde daha önce oluşmuş çatlaklar genişlemiş ve ilerlemeye devam etmişler, aralarından bazıları birleşmişlerdir. Bundan sonra çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. 3.65 MPa gerilme düzeyinde artan çatlak genişlikleri ile ön üst bölümde sıva tuğla yüzünden ayrılmıştır. 3.49 MPa gerilme düzeyinde ise genişleyen çatlak

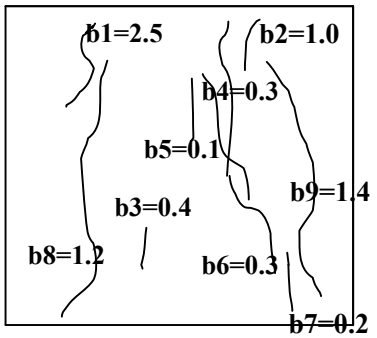
nedeniyle arka üst bölümde sıva tuğla yüzünde ayrılmıştır. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.14 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.5 de verilmiştir.

C1-1 numunesinde hasarlar A1 numunelerinde olduğu gibi orta bölgede ve harç üzerinde oluşmuştur. Tuğlanın delik yönünde olması yani kesitin sürekli olması bunda en büyük etkendir. Harç üzerinde oluşan çatlak sayısı A1-1 numunelerinden daha fazladır. Yine bu numunelerde dayanıma kadar A1 numunelerine kıyasla daha fazla çatlak oluşmuştur. Numunelerin yan yüzlerindeki tuğlalarda herhangi bir kırık görülmemektedir. Hasar durumu göz önüne alındığında numune üzerinde orta bölgeye yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından alınan ölçümlerin gerçekçi olduğu düşünülmektedir. Numune boyutunun fazla olması yüzünden tam boy üzerinden ölçüm alan Instron deney cihazı ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi ile yerdeğiştirmeölçerler yardımı ile elde edilen eğri arasında A1 numunelerinden daha fazla fark bulunmaktadır.







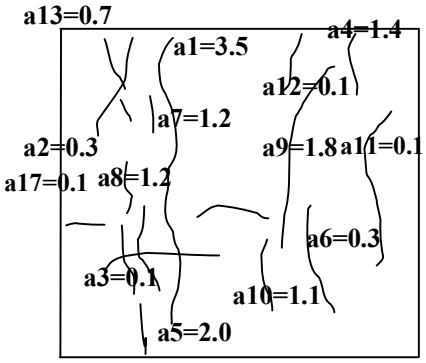


* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

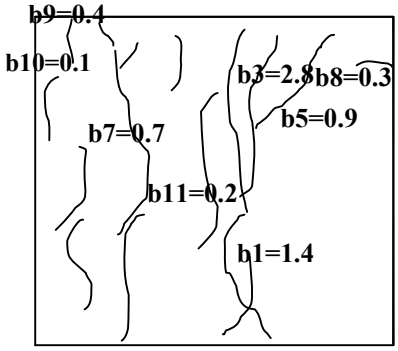
Şekil 4.14 : C1-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

C1-2 numunesinde ilk çatlak (b1) gerilme henüz 0.07 MPa gerilme düzeyinde iken arka yüzde orta bölümde oluşmuştur. Gerilme değeri 0.13 MPa düzeyinde iken ön yüzde arka yüzde oluşan çatlağa benzer şekilde orta kısımda bir çatlak (a1) daha oluşmuştur. 0.18 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde üst orta bölümde bir çatlak (b2) oluşmuştur. 0.29 MPa gerilme düzeyinde ise aynı bölgede ön yüzde bir çatlak (a2) oluşmuştur. 0.37 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde orta bölümde bir çatlak (b3) oluşmuş, 0.50 MPa gerilme düzeyinde ise ön yüzde orta kısımdan alta ilerleyen bir çatlak (a3) daha meydana gelmiştir. 0.76 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde orta kısımda oluşan çatlak üst kısma başlık bölgesine kadar ilerlemiş, arka yüzde ise ilk çatlağa yakın küçük bir çatlak (b4) daha oluşmuştur. 1.40 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde orta kısımda oluşan çatlak ilerleyerek başlık bölgesine kadar gitmiştir. 2.27 MPa gerilme düzeyinde ön, 2.48 MPa gerilme düzeyinde arka üst orta bölümde küçük birer çatlak (a4, b5) oluşmuştur. 2.88 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde ilk oluşan çatlak alt kısma doğru ilerlemiş, arka yüzde üst bölgede son olarak oluşan çatlak ilerleyerek orta kısımda daha önceden oluşan bir çatlakla birleşmiştir. 3.36 MPa gerilme düzeyinde ilk defa ön yüz alt orta kısımda bir çatlak (a5) meydana gelmiştir. 4.12 MPa gerilme düzeyine kadar her hangi bir değişiklik olmazken bu gerilmede ön yüz orta kısımda küçük bir çatlak (a6) oluşurken arka yüzde orta kısımda daha büyük bir çatlak (b6) oluşmuştur. Aynı zamanda arka yüzde alt kısımda bir çatlak (b7) oluşmuştur. 4.49 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde orta kısımda ufak birçok küçük çatlak (a7,a8) oluşmuştur. Arka yüzde ise üst kenar kısımda bir çatlak (b8) oluşmuştur. 4.74 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde orta kısımda, arka yüzde ise üst orta kısımda bir çatlak (a9, b9) daha oluşmuştur. Aynı zamanda bu değer gerilmenin en büyük değeridir. Bundan sonra gerilme azalmaya başlamıştır. Azalan kolda yeni çatlaklar oluşmaya devam etmiş, var olan çatlaklardan bir kısmı ise genişlemiş ve ilerlemiştir. Çatlaklar genişlerken 3.54 MPa gerilme düzeyinde arka üst bölümde sıva tuğla yüzünden ayrılmıştır. 3.09 MPa gerilme düzeyinde ise ön yüz alt kısımda sıva tuğla yüzünden ayrılmıştır. 2.79 MPa gerilme düzeyinde da ön yüzde orta kısımda yatay çatlaklar oluşmuştur. 2.35 MPa gerilme düzeyi civarında artık çatlaklar çok genişlemiş ve sıva tuğla yüzeyinden ayrılmıştır. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.15 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.6 da verilmiştir.









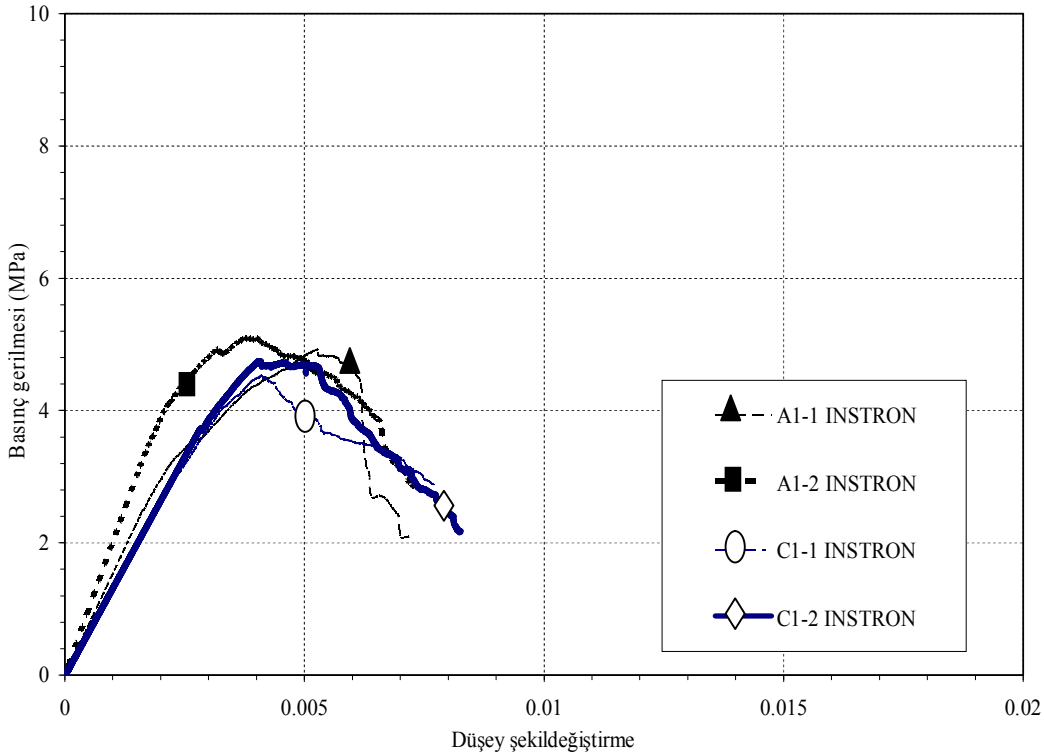
* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.15 : C1-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

C1-2 numunesinin göçme şekli ve hasar durumu da C1-1 numunesine benzerdir. Bu nedenle yerdeğiştirmeölçerler tarafından elde edilen değerlerin gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

4.2.2.4 A1 ve C1 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin delik yönüne paralel olarak yüklendiği A1 ve C1 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin boyut etkisi ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.16 da verilmiştir. Kullanılan gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Instron tarafından elde edilen veriler kullanılarak elde edilmiştir. Karşılaştırmada esas alınan elastisite modülü değeri ise yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.16 : A1 ve C1 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Çizelge 4.7 de A1 ve C1 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C1 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A1 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde boyut artışı ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.7 : A1 ve C1 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

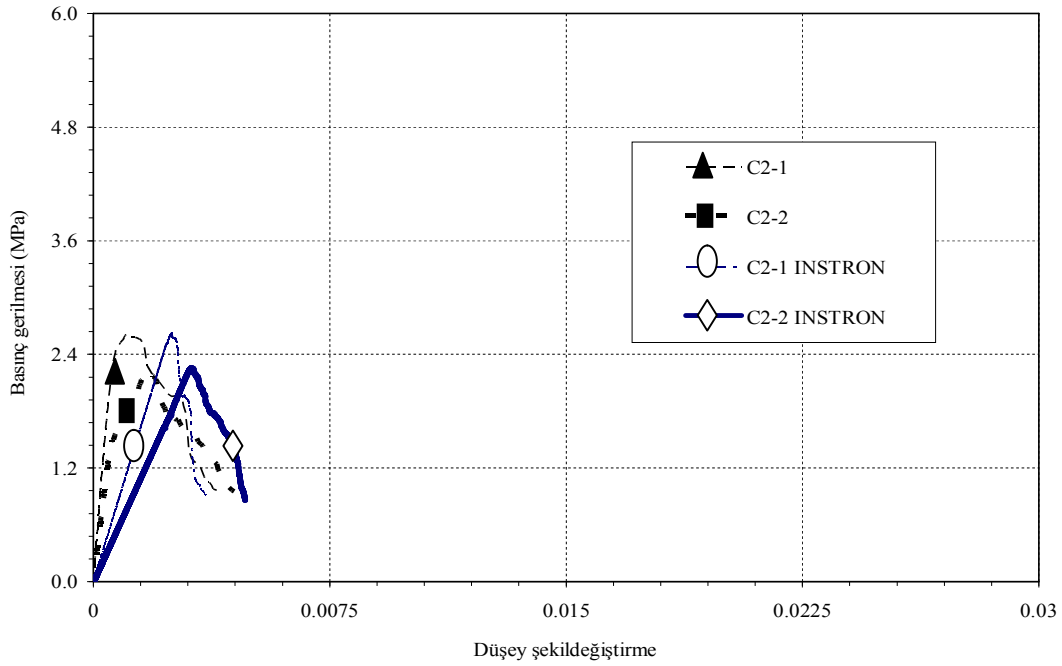
Deneysel parametreler	C1/A1 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
$f_{mc,p}$ (MPa)	0.92	8 azalış
$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	0.88	12 azalış
$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	0.94	6 azalış
$E_{mc,p}$ (MPa)	1.14	14 artış
$\mu_{mc,p}$	1.05	5 artış
$A_{0.85f}$	0.80	20 azalış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin delik yönündeki davranışında boyut etkisinin dayanım üzerindeki etkisinin az olduğunu görülmüştür Hasar durumuna bakıldığında C1 ve A1 numunelerinde göçmenin şeklinin benzer olduğu görülmüştür. Tuğlalar delik yönünde yüklendiği için tuğlalarda kırık oluşmamış,

hasar harç üzerinde meydana gelmiştir. Yalnız C1 numunelerinde çatlaklar çok daha erken gerilme düzeyinden itibaren oluşmaya başlamış ve dayanıma kadar A1 numunelerine göre daha fazla çatlak oluşmuştur. Bu durumun elastisite modulündeki fazla azalışın nedeni olduğu düşünülmektedir.

4.2.2.5 C2 Numuneleri Basınç Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin delik yönüne dik olarak yüklenmesi durumdaki davranışı bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından ve Instron deney cihazı tarafından deney esnasında kaydedilen veriler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.17. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. Her iki numunede de dayanımdan hemen sonra numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve sağlıklı veri alınamamış, bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafiklerde bu kısımlar verilememiştir.



Şekil 4.17 : C2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçerleri için verilmiştir, Çizelge 4.8. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.9 da verilmiştir.

Çizelge 4.8 : C2 numuneleri deney sonuçları.

Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,n}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	$E_{mc,n}$ (MPa)	$\mu_{mc,n}$	$A_{0.85f}$
C2-1	Y.D.Ö	2.63	0.11	0.18	4276	1.65	-
	INS.	2.63	0.25	0.27	1086	1.09	0.004
C2-2	Y.D.Ö	2.23	0.17	0.22	2781	1.27	-
	INS.	2.23	0.31	0.35	731	1.15	0.004

Çizelge 4.9 : C2 numuneleri istatistiksel değerleri.

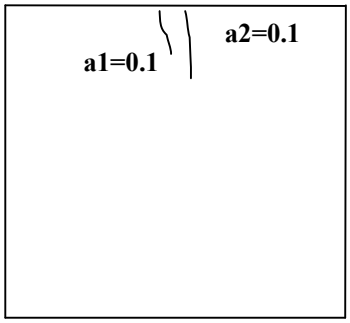
İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.
$f_{mc,n}$ (MPa)	2.40	2.40	0.28	0.28	0.12	0.12
$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	0.14	0.28	0.04	0.04	0.32	0.15
$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%	0.20	0.31	0.03	0.06	0.13	0.19
$E_{mc,n}$ (MPa)	3529	909	1057	251	0.30	0.28
$\mu_{mc,n}$	1.46	1.12	0.27	0.04	0.19	0.04
$A_{0.85f}$	-	0.004	-	0.00	-	0.00

C2-1 numunesinde gerilme henüz 0.08 MPa değerinde iken arka yüzde üst orta bölümde iki adet küçük düşey çatlak (b1, b2) oluşmuştur. 0.14 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde orta kenar bölgede bir çatlak (b3) meydana gelmiştir. Bundan sonra 1.44 MPa gerilme düzeyine kadar bir değişiklik olmamış, bu gerilme düzeyinde arka yüzde orta bölümde yeni bir çatlak (b4) oluşmuştur. 1.66 MPa gerilme düzeyinde yine arka bölgede orta üst bölgeye yakın küçük bir çatlak (b5) daha oluşmuştur. 2.58 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde üst orta bölgeden başlayıp orta kısma doğru ilerleyen ve nispeten büyük bir çatlak (b6) oluşurken, ilk kez ön yüzde orta üst bölgede bir çatlak (a1) oluşmuştur. Bu çatlaktan sonra gerilme çok az artıp 2.62 MPa gerilme düzeyine geldikten sonra gerilme azalmaya başlamıştır. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.18 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.7 de verilmiştir.

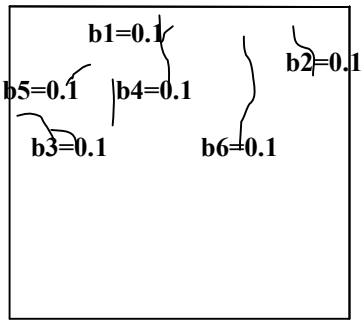
C2-1 numunesinde A2 numunelerine oranla özellikle arka yüzde ölçüm sisteminin olduğu orta bölümde çok sayıda çatlak oluşmuştur. Bu çatlaklar gerilmenin dayanım değerinden önce oluşmuştur. Göçme bu çatlaklardan değil duvar numunenin iç kısmındaki tuğlaların kırılmasından kaynaklanmıştır. A2 numunelerden farklı olarak

C2-1 numunesinde tuğla yüzeyinden sıva ayrılmamıştır. Buna kırılmaların numune iç bölgesinde olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Hem numune göçme biçimi, hem de numune boyutunun fazla olması nedeni ile Instron ve yerdeğiştirmeölçerler yardımı ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri arasındaki fark fazla çıkmıştır. Bu fark özellikle dayanımdan önceki bölümde ortaya çıkmıştır. Dayanımdan sonraki kısımda ise fark azalmış ve benzer bir davranış sergilemiştir. Numunede göçme tüm numune üzerinde oluşan kırılmalar nedeniyle oluştuğu için Instron tarafından numune tüm boyundan alınan ölçümler numune davranışını daha iyi gösterdiği düşünülmektedir.









* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.18 : C2-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

C2-2 numunesinde ilk çatlak (b1) 0.33 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde üst orta bölümde oluşmuştur. İkinci çatlak (a1) ise 2.19 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde arka yüzde oluşan çatlakla aynı yerde olmuş olup ve onun gibi küçük bir çatlaktır. Bundan sonra 2.23 MPa gerilme düzeyine kadar artan gerilme, bu değerden sonra azalmaya başlamıştır. Azalan gerilme değerlerinde ön ve arka yüzde ilk oluşan

çatlaklara yakın yerlerde birer çatlak (a2, b2) daha meydana gelmiştir. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.19 da, numune hasar gelişimi ise Şekil A.8 de verilmiştir.

C2-2 numunesi A2 numunelerine benzer bir davranış sergilemiştir. Ölçüm alınan bölge olan orta bölgede harç üzerinde çatlak oluşmamıştır. Göçme A2 numunelerindeki gibi tuğlaların kırılmasından kaynaklanmış, yalnız bu kırılma C2-1 numunesindeki gibi numune iç bölgesinde gerçekleşmiş, numunenin sağ ve sol yan yüzlerindeki en dışta bulunan tuğlalarda A2 numunelerindeki gibi belirgin bir kırık oluşmamıştır.



a1=2.1 a2=0.1



b2=0.1
b1=0.1
b3=0.3

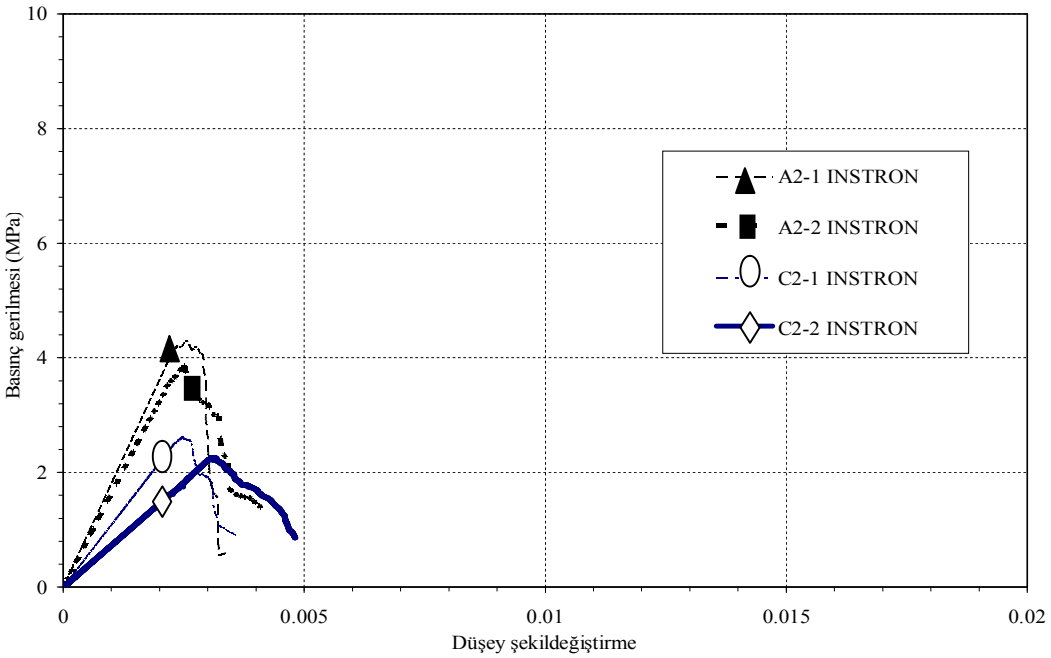
* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.19 : C2-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

4.2.2.6 A2 ve C2 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin delik yönüne dik olarak yüklendiği A2 ve C2 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin boyut etkisi ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir

arada Şekil 4.20 de verilmiştir. Kullanılan gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Instron deney cihazı tarafından kaydedilen veriler kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.20 : A2 ve C2 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Çizelge 4.10 da A2 ve C2 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C2 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A2 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde boyut artışı ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.10 : A2 ve C2 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	C2/A2 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
$f_{mc,n}$ (MPa)	0.59	41 azalış
$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	1.10	10 artış
$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	1.09	9 artış
$E_{mc,n}$ (MPa)	0.65	35 azalış
$\mu_{mc,n}$	0.99	1 azalış
$A_{0.85f}$	0.61	39 azalış

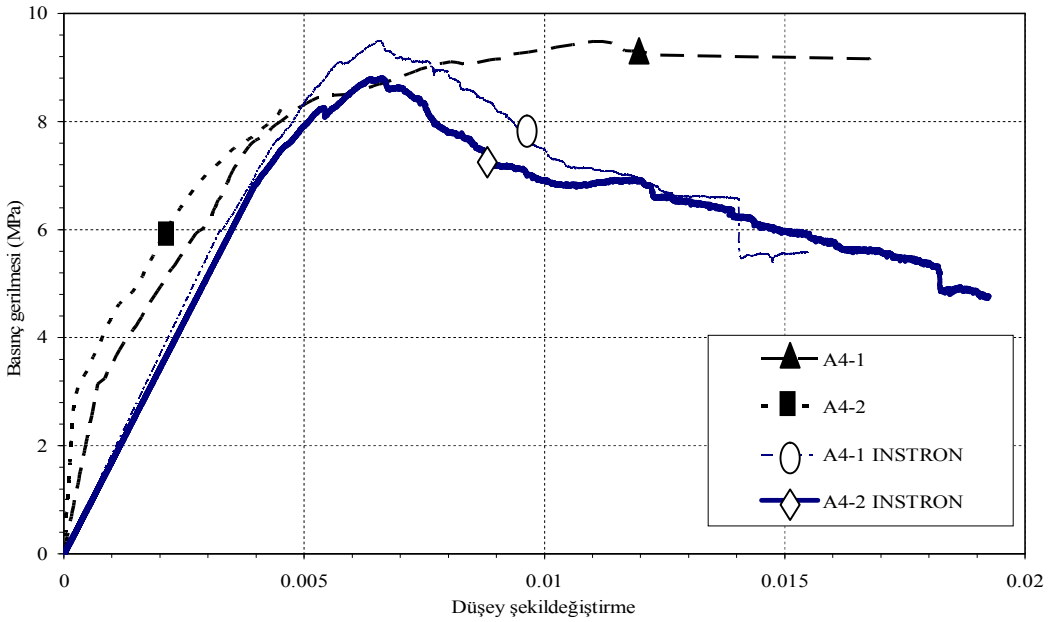
Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin delik dik yönünde yüklendiği durumdaki davranışında boyut etkisinin dayanım ve elastisite modülü üzerindeki etkisinin fazla olduğunu görülmüştür. Hasar durumuna bakıldığında C2 ve A2 numunelerinde göçmenin şeklinin benzer olduğu görülmüştür. Tuğlalar delik yönüne

dik olarak yüklendiği için tuğlalarda kırıklar oluşmuş ve göçme tuğlaların kırılması ile olmuştur. Yalnız C2 numunelerinde kırıklar numunenin iç kısmında oluşmuşken, numune yan yüzlerinde bulunan en dış sıradaki tuğlalarda kırıklar oluşmamıştır. Bunun yanı sıra C2 numunelerinde harç tuğla yüzeyinden ayrılmamıştır ve harçta özellikle C2-1 numunesinde A2 numunelerine kıyasla daha fazla çatlak oluşmuştur.

4.2.3 Güçlendirilmiş Duvar Basınç Deneyi

4.2.3.1 A4 Numuneleri Basınç Deneyi

Güçlendirilmiş duvar numunelerinin delik yönüne paralel olarak yüklenmesi durumundaki davranışı bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler ve Instron deney cihazı tarafından deney esnasında kaydedilen veriler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.21. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. A4-1numunesinde dayanımdan hemen sonra, A4-2 numunesinde ise henüz dayanıma ulaşılmamışken numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve sağlıklı veri alınamamıştır. Bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafiklerde bu kısımlar verilememiştir.



Şekil 4.21 : A4 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçerleri için

verilmiştir, Çizelge 4.11. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.12 de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : A4 numuneleri deney sonuçları.

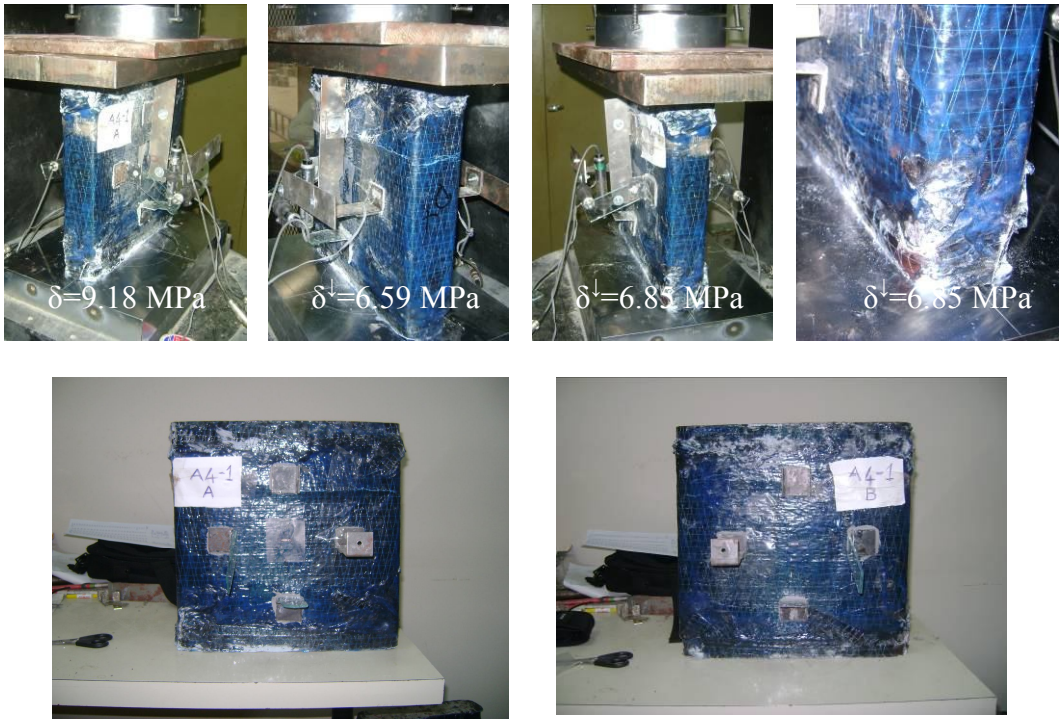
Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,p}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	$E_{mc,p}$ (MPa)	$\mu_{mc,p}$	$A_{0.85f}$
A4-1	Y.D.Ö	9.50	1.12	DH	4429	DH	-
	INS.	9.50	0.66	0.92	1844	1.41	0.060
A4-2	Y.D.Ö	8.80	DH	DH	5407	DH	-
	INS.	8.80	0.66	0.87	1721	1.31	0.052

Çizelge 4.12 : A4 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.
$f_{mc,p}$ (MPa)	9.20	9.20	0.49	0.49	0.05	0.05
$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	-	0.66	-	0.00	-	0.00
$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	-	0.90	-	0.04	-	0.05
$E_{mc,p}$ (MPa)	4918	1783	692	87	0.14	0.05
$\mu_{mc,p}$	-	1.36	-	0.07	-	0.05
$A_{0.85f}$	-	0.056	-	0.006	-	0.108

A4-1 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı için herhangi bir çatlak gözlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 9.50 MPa dır. Bu gerilme değerinden sonra gerilme azalmaya başlamıştır. 9.16 Mpa gerilme düzeyinde arka yüzdeki yerdeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır. Numunenin alt ve üst yükleme başlığına yakın bölgelerdeki tuğla ve harçta ezilme meydana gelmiştir. Ezilme ile birlikte bu bölgelerde genişleme olmuştur. Genişleme nedeniyle buradaki CFRP malzemesi numune köşe kısımlarında yırtılmıştır. Deney sonunda CFRP malzemesinde üst ve alt başlık bölgelerine yakın yerlerdeki toplam yırtılma bir anda olmamış, dayanımdan sonra CFRP malzemesinde oluşan yırtıklar büyümüştür. Numunenin orta bölgesindeki tuğlalarda ezilme meydana gelmemiş, bu bölgedeki CFRP malzemesinde hiç hasar oluşmamıştır. CFRP malzemesinin yırtılması esnasında normal yük düşüşüne oranla daha fazla yük düşüşleri yaşanmıştır.

Numunenin deney esnasındaki durumu ve deney sonrası hasar durumu Şekil 4.22 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.9 da verilmiştir.

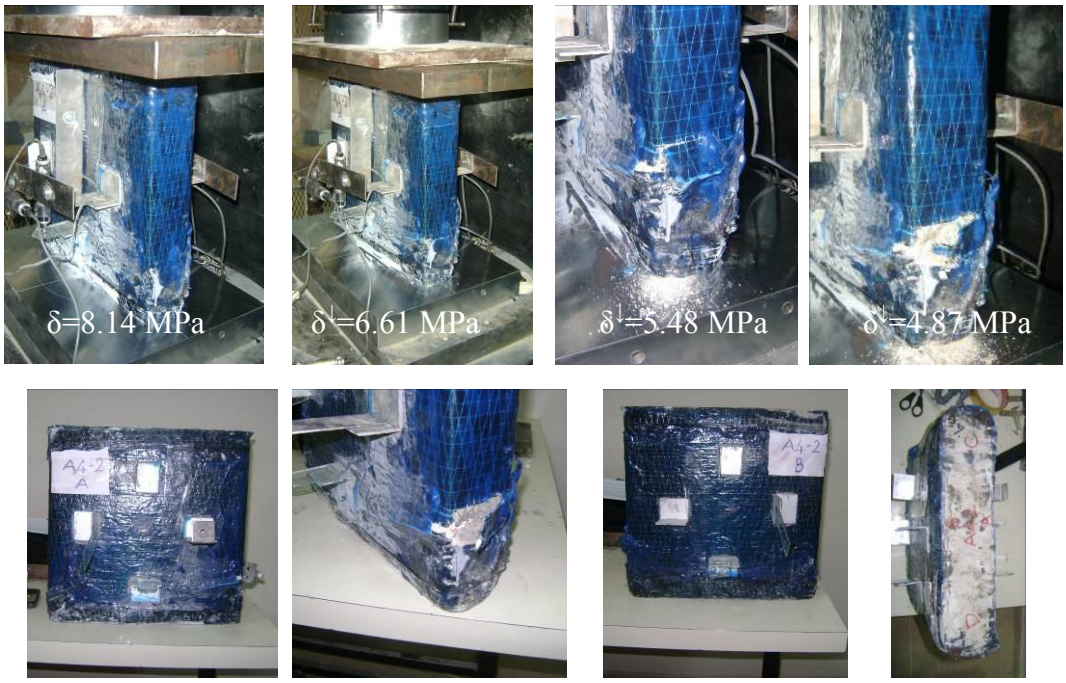


* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.22 : A4-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

A4-1 numunesinde üst ve alt başlık bölgelerindeki tuğla ezilmesiyle genişleyen kısımlar deneyin başlarında yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği bölgelerin üzerinde kalmış ve bu sebepten dolayı yerdeğiştirmeölçerler tam boy üzerinden ölçüm alan Instron deney cihazının ölçtüğü yerdeğiştirme değerlerinden çok daha küçük değerler ölçmüştür. Gerilme dayanıma ulaşmadan genişleyen bu bölgeler yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği korniyerlerin seviyesine kadar gelmiştir. Bu sayede yerdeğiştirmeölçerlerin ölçtüğü kısalmalar artmıştır ve deney sonunda Instron deney cihazının ölçtüğü şekildeğiştirmeyi aşmıştır.

A4-2 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı için herhangi bir çatlak gözlenememiştir. Numunenin taşıdığı en büyük gerilme değeri 8.80 MPa dır. Bu gerilme değerinden sonra yük azalmaya başlamıştır. Numunenin göçme biçimi A4-1 numunesiyle aynıdır. Alt ve üst başlık bölgelerine yakın bölgedeki tuğlalar ezilmiş ve bu bölgelerin genişlemesiyle CFRP malzemesi yırtılmıştır. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.23 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.10 da verilmiştir.



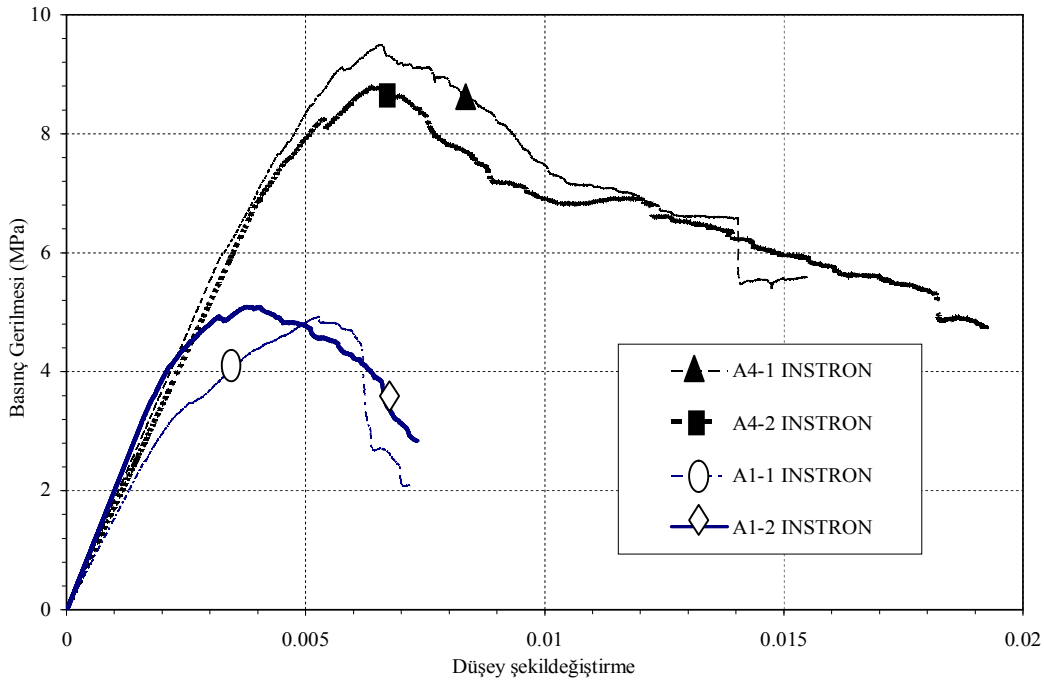
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.23 : A4-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

A4-2 numunesinde de A4-1 numunesi gibi üst ve alt başlık bölgelerindeki tuğla ezilmesiyle genişleyen kısımlar deneyin başlarında yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği bölgelerin dışında kalmış ve bu sebepten dolayı yerdeğiştirmeölçerler tam boy üzerinden ölçüm alan Instron deney cihazının ölçtüğü yerdeğiştirme değerlerinden çok daha küçük değerler ölçmüştür. Her iki numunede de gerilme dayanıma ulaşmadan genişleyen bu bölgeler yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği korniyerlerin seviyesine kadar gelmiştir. Bunun üzerine yerdeğiştirmeölçerlerin ölçtüğü kısalmalar artmış bu aşamadan sonra daha da ilerleyerek deney sonunda Instron deney cihazının ölçtüğü şekildeğiştirmeyi aşmıştır.

4.2.3.2 A1 ve A4 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

A4 numuneleri A1 numunelerine özdeş numunelerin yüzeylerinin tamamının CFRP malzemesi ile sarılarak güçlendirildiği numunelerdir. Duvar numunelerinin delik yönüne paralel olarak yüklendiği A1 ve A4 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.24 de verilmiştir. Kullanılan gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Instron tarafından elde edilen veriler kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.24 : A1 ve A4 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Çizelge 4.13 de A1 ve A4 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma A4 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A1 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.13 : A1 ve A4 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

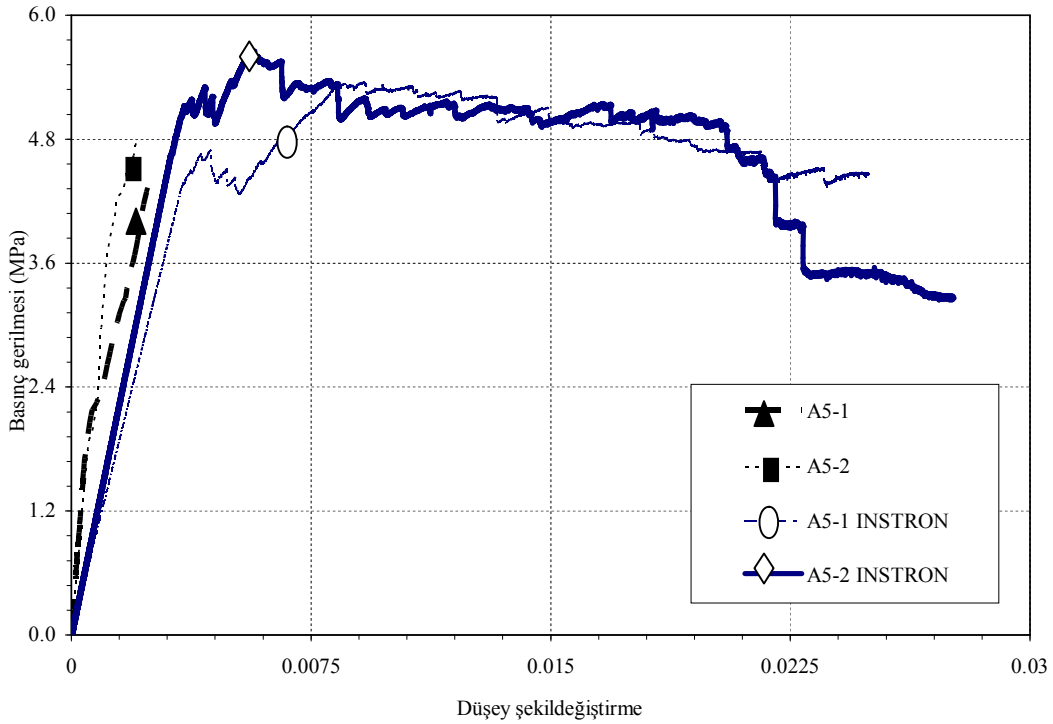
Deneysel parametreler	A4/A1 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
$f_{mc,p}$ (MPa)	1.83	83 artış
$\varepsilon_{v,mc,p,f}$ (%)	1.42	42 artış
$\varepsilon_{v,mc,p,0.85f}$ (%)	1.50	50 artış
$E_{mc,p}$ (MPa)	1.33	33 artış
$\mu_{mc,p}$	1.04	4 artış
$A_{0.85f}$	2.62	162 artış

Duvar numunelerinin delik yönündeki davranışında güçlendirmenin dayanım üzerindeki etkisi fazla olup güçlendirme numune dayanımını % 80 oranında arttırmıştır. Güçlendirme ile numunelerin maksimum dayanım değerinde yapmış olduğu şekildeğiştirme değeri % 42 artmışken, deney sonunda numunelerin yapmış olduğu toplam kısalma miktarı daha da fazla artmıştır. Hasar durumuna bakıldığında güçlendirmenin numunenin göçme şeklini değiştirdiği görülmüştür. A1 numuneleri

harç üzerinde oluşan çatlakların genişliklerinin artması ile birlikte yük taşıma özelliğini kaybederken, A4 numunelerinde dayanım kaybı alt ve üst başlık bölgelerine yakın bölgelerdeki tuğlaların ezilmesi ile bu kısımlarda meydana gelen CFRP malzemesinin yırtılması ile olmuştur.

4.2.3.3 A5 Numuneleri Basınç Deneyi

Güçlendirilmiş duvar numunelerinin delik yönüne dik olarak yüklenmesi durumundaki davranışını göstermektedir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler ve Instron deney cihazı tarafından deney esnasında kaydedilen veriler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birlikte verilmiştir, Şekil 4.25. Her iki numune için Instron deney cihazı ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafikler yorumlanmıştır. Her iki numunede de henüz dayanıma ulaşılmamışken numune üzerindeki ölçüm düzeneği devre dışı kalmış ve sağlıklı veri alınamamıştır. Bu nedenle yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen grafiklerde bu kısımlar verilememiştir.



Şekil 4.25 : A5 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler hem harici yerdeğiştirmeölçerler hem de Instron deney cihazı dahili yerdeğiştirmeölçerleri için verilmiştir, Çizelge 4.14. Bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.15'de verilmiştir.

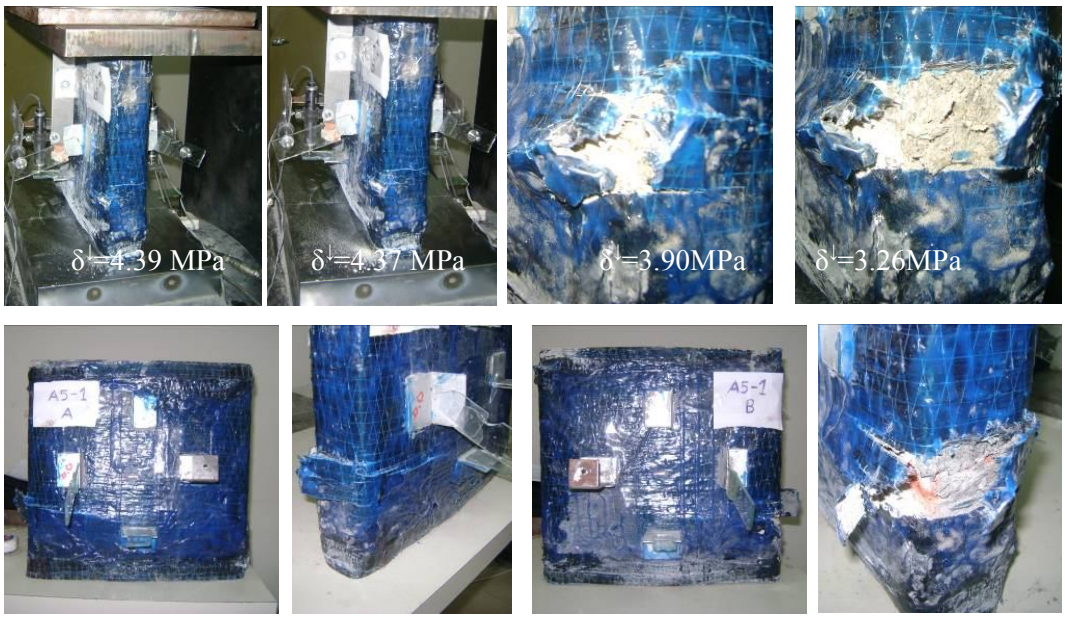
Çizelge 4.14 : A5 numuneleri deney sonuçları.

Numune	Ölçüm düzeneği	$f_{mc,n}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	$E_{mc,n}$ (MPa)	$\mu_{mc,n}$	$A_{0.85f}$
A5-1	Y.D.Ö	5.36	DH	DH	4127	DH	-
	INS.	5.36	0.91	2.16	1257	2.36	0.097
A5-2	Y.D.Ö	5.65	DH	DH	3476	DH	-
	INS.	5.65	0.57	2.05	1497	3.59	0.096

Çizelge 4.15 : A5 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama		Standart sapma		Varyasyon katsayısı	
	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.	Y.D.Ö	INS.
$f_{mc,n}$ (MPa)	5.50	5.50	0.20	0.20	0.04	0.04
$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	-	0.74	-	0.24	-	0.33
$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	-	2.11	-	0.08	-	0.04
$E_{mc,n}$ (MPa)	3802	1377	460	170	0.12	0.12
$\mu_{mc,n}$	-	2.98	-	0.87	-	0.29
$A_{0.85f}$	-	0.097	-	0.000	-	0.004

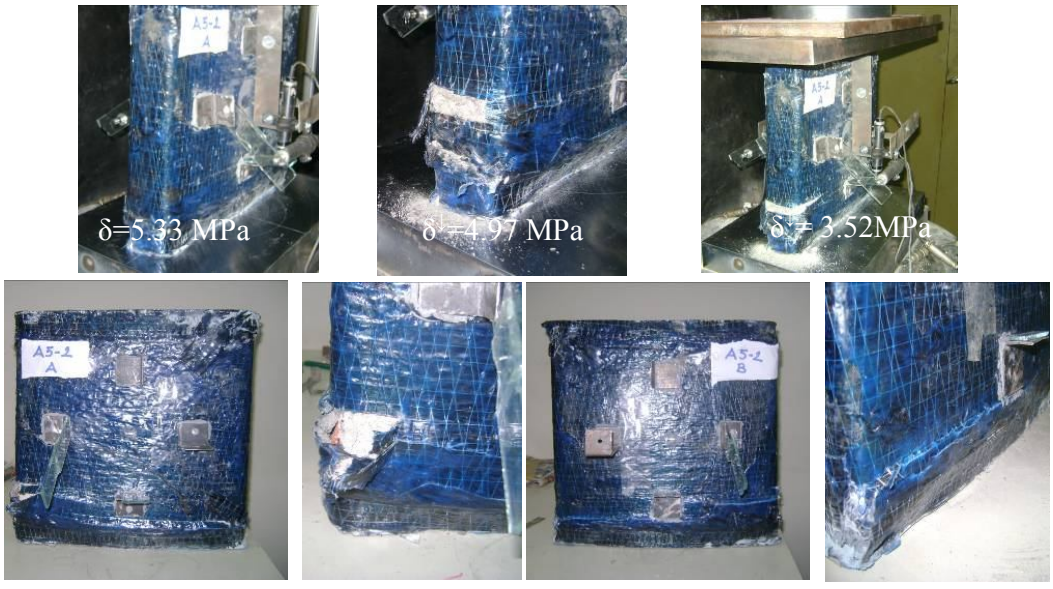
A5-1 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı için çatlak gözlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 5.34 MPa dır. Bu gerilme değerinden sonra yük önce azalmış daha sonra 5.34 MPa değerini geçmeyecek şekilde tekrar artmış ve daha sonra azalmıştır. Numunenin davranışı sünekçedir. Gerilme dayanımdan sonra çok yavaş bir şekilde düşmüştür. Numunenin alt ve üst yükleme başlığına yakın bölgelerdeki tuğla ve harçta ezilme meydana gelmiştir. Ezilme ile birlikte bu bölgelerde genişleme olmuştur. Genişleme nedeniyle buradaki CFRP malzemesi numune köşe kısımlarında yırtılmıştır. A5-1 numunesinde genişleme miktarı A4 numunelerine oranla çok daha fazla ve çok daha belirgin olmuştur. Deney sonunda CFRP malzemesinde üst ve alt başlık bölgelerine yakın yerlerdeki yırtılma bir anda olmamış, dayanımdan sonra CFRP malzemesinde oluşan yırtıklar büyümüştür. A5-1 numunesinde oluşan yırtık A4 numunelerine göre çok daha fazla olmuştur. Numunenin orta bölgesindeki tuğlalarda ezilme meydana gelmemiş, bu bölgedeki CFRP malzemesinde hasar oluşmamıştır. CFRP malzemesinin yırtılması esnasında normal yük düşüşüne oranla daha fazla yük düşüşleri yaşanmıştır. Numunenin deney esnasındaki durumu ve deney sonrası hasar durumu Şekil 4.26 da, numune hasar gelişimi ise Şekil A.11 de verilmiştir.



* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.26 : A5-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası surumu.

A5-2 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı için çatlak gözlenememiştir. Numunenin maruz kaldığı gerilmenin en büyük değeri 5.64 MPa dır. Numunenin davranışı ve hasar oluşumu A5-1 numunesine benzerdir. Numune sünekçe bir davranış göstermiştir. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.27 de numune hasar gelişimi ise Şekil A.12 de verilmiştir.



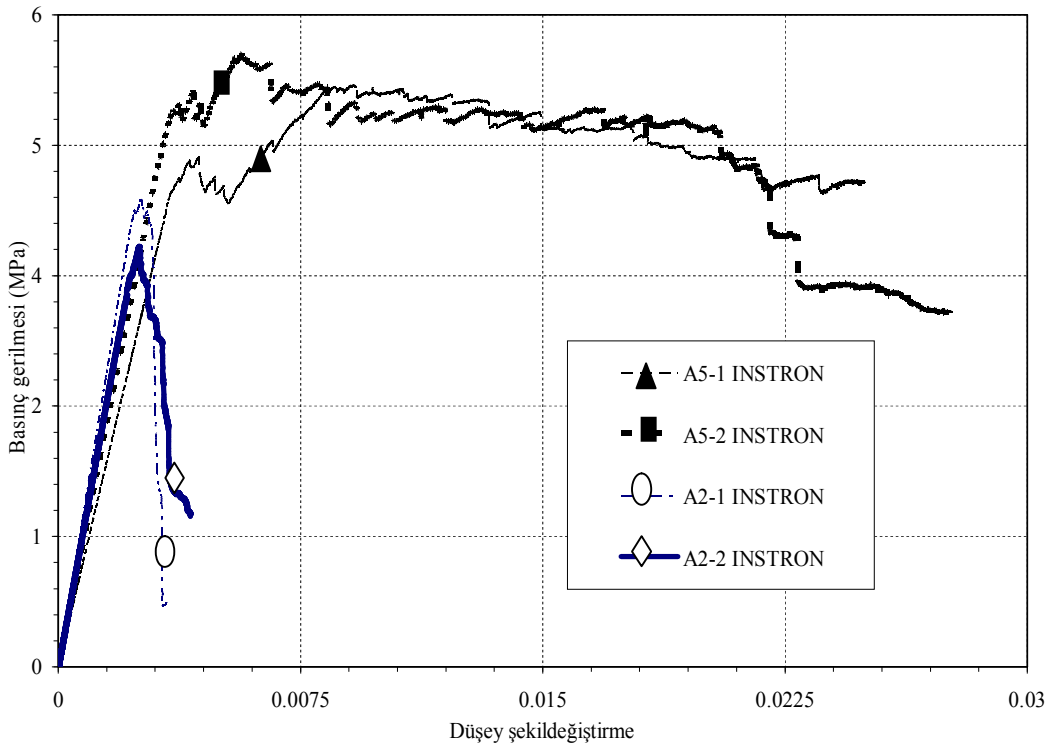
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.27 : A5-2 Numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

A5 numunelerinde A4 numunelerine göre daha fazla hasar oluşmuştur, bunun sonucunda numune daha sünekçe bir davranış göstermiştir. Numunenin üst ve alt başlık bölgelerinde ezilmeden ötürü meydana gelen genişleme bu numunelerde daha fazla iken bunun yanı sıra hasarın yoğun olduğu bölümler numune orta bölgesine daha yakındır.

4.2.3.4 A2 ve A5 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin delik yönüne dik olarak yüklendiği A2 ve A5 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.28 de verilmiştir. Bu gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Instron tarafından elde edilen veriler kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 4.28 : A2 ve A5 numuneleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Çizelge 4.16 da A2 ve A5 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma A5 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A2 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.16 : A2 ve A5 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	A5/A2 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
$f_{mc,n}$ (MPa)	1.34	34 artış
$\varepsilon_{v,mc,n,f}$ (%)	2.93	193artış
$\varepsilon_{v,mc,n,0.85f}$ (%)	7.31	631artış
$E_{mc,n}$ (MPa)	1.08	8 artış
$\mu_{mc,n}$	2.62	162 artış
$A_{0.85f}$	14.09	1309 artış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin delik dik yönündeki davranışında güçlendirmenin dayanım üzerindeki etkisi delik yönündeki davranıştakine göre daha az olmuştur. Delik dik yönde asıl etki şekildeğiştirme özelliğinde olmuştur. Hem dayanım değerinde meydana gelen şekildeğiştirmede hem de toplam şekildeğiştirme miktarında önemli artış olmuştur. Numune davranışı değişmiş sünekçe bir davranış sergilemiştir. Böylelikle numunenin şekildeğiştirme kapasitesi yani enerji yutma özelliği büyük bir artış göstermiştir. Hasar durumuna bakıldığında güçlendirmenin numunenin göçme şeklini değiştirdiği görülmüştür. A2 numunelerinde tuğlaların kırılması ile meydana gelen göçme, A5 numunelerinde alt ve üst başlık bölgelerine yakın bölgelerdeki tuğlaların ezilmesi ile bu kısımlarda meydana gelen CFRP malzemesinin yırtılması ile olmuştur.

4.2.4 Kayma Deneyleri

Bu bölümdeki deneylerde ASTM E 519-02'de [18] yığma yapılar için önerilen kayma gerilmesi deney tekniği kullanılmıştır. Kayma deneyi numunelerine ait kayma gerilmesi ve kayma şekildeğiştirme ilişkisi, kayma modülü, süneklik oranı ve göçme modu bu bölümde sunulmuştur. Bu özellikler verilirken kullanılan formül ve semboller aşağıda açıklanmıştır.

Kayma gerilmesi (τ), uygulanan yükünün (P) 0.707 katının, numune enkesit alanına (A_n) oranı olarak verilmiştir [18].

$$\tau = \frac{0.707P}{A_n} \qquad \textbf{(4.4)}$$

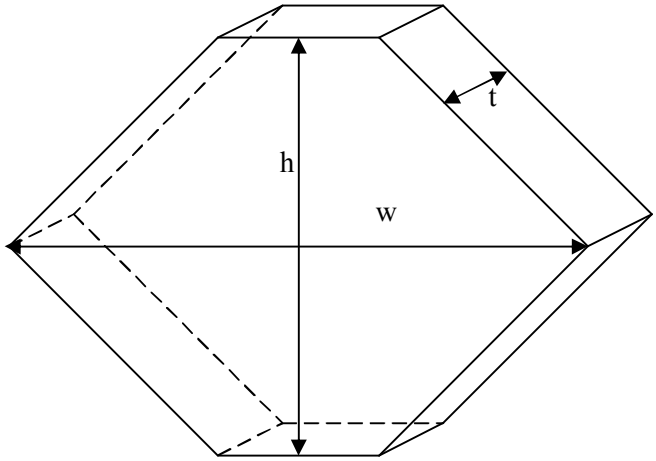
Kayma enkesit alanı A_n ise Denklem **(4.5)** de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$A_n = \frac{(w+h)}{2} t_n \qquad \textbf{(4.5)}$$

Denklem **(4.5)** deki kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan numune ölçüm yerlerinin (w,h,t_n) neresi olduğu Şekil 4.29 da açıklanmıştır.

Kayma şekildeğiştirmesi (γ) ise numunede oluşan düşey birim kısalma ile yatay birim uzamanın toplamına bağlı olarak hesaplanmıştır. Kayma şekildeğiştirmesi Denklem **(4.6)** da görüldüğü gibi yerdeğiştirmeölçerin deney sonunda düşey ölçüm boyunda meydana gelen değişim (ΔV) ile yatay ölçüm boyunda meydana gelen değişimin (ΔH) toplamının, yerdeğiştirmeölçerin başlangıç ölçüm boyuna (g) oranı olarak verilmiştir.

$$\gamma_{sh,msh} = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \qquad \textbf{(4.6)}$$



Şekil 4.29 : Alan hesabında kullanılan numune ölçüm yerleri.

Kayma modülü (G) kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi eğrisinde duvar numunelerinin maksimum kayma dayanımlarının % 5 ile % 33'ü arasındaki eğim olarak tanımlanmıştır. Bu eğriler yerdeğiştirmeölçerler ile toplanan veriler kullanılarak çizilmiştir.

Süneklik (μ_{msh}) ise, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde düşen kol üzerinde maksimum kayma dayanımının yüzde 85'i düzeyindeki gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirmenin ($\gamma_{msh,0.85f}$), maksimum basınç dayanımındaki şekildeğiştirmeye ($\gamma_{msh,f}$) oranı olarak tanımlanmıştır.

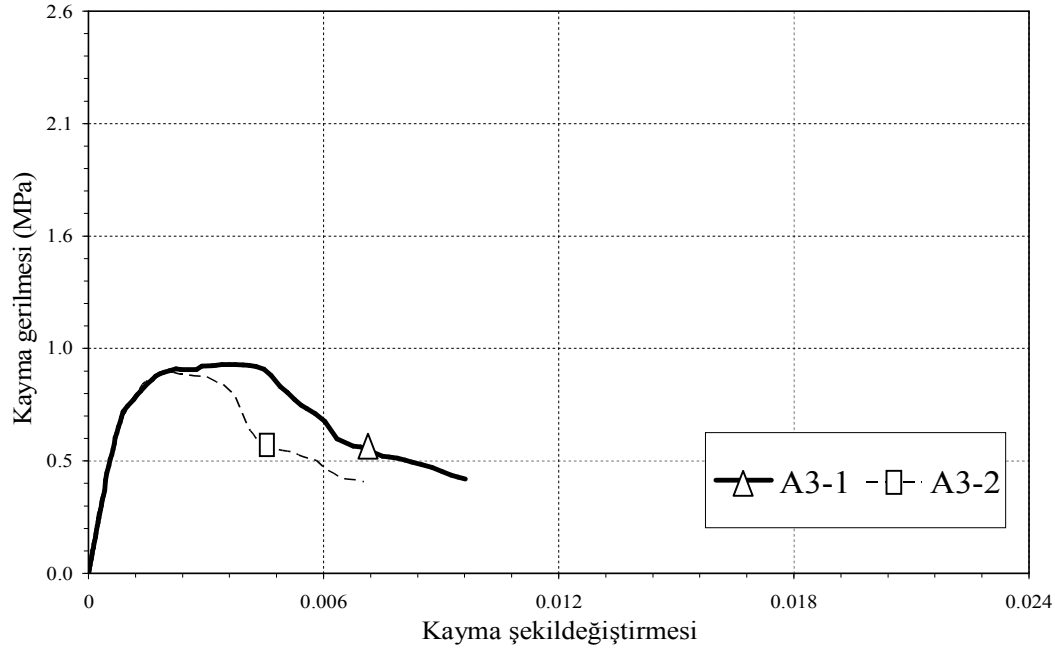
$$\mu_{msh} = \frac{\gamma_{msh,0.85f}}{\gamma_{msh,f}} \qquad \textbf{(4.7)}$$

Deney sırasında numuneler tarafından tüketilen enerji miktarı numunelerin kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi eğrileri altında kalan alandan hesaplanabilir. Alan hesabında; ilgili numuneler için, kayma gerilmesi ve kayma şekildeğiştirmesi eğrisinin düşen kolu üzerinde maksimum gerilme seviyesinin 0.85'i seviyelerine kadar gelen kısmın altında kalan alan ($A_{0.85f}$) dikkate alınmıştır. Kayma numunelerinde tüketilen enerji miktarı yerdeğiştirmeölçerler tarafından elde edilen veriler için hesaplanmıştır.

4.2.5 Güçlendirilmemiş Duvar Kayma Deneyi

4.2.5.1 A3 Numuneleri Kayma Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denenmesi durumundaki davranış bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir, Şekil 4.30.



Şekil 4.30 : A3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler Çizelge 4.17 de, bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.18 de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : A3 numuneleri deney sonuçları.

Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
A3-1	0.97	0.34	0.51	952	1.49	0.004
A3-2	0.93	0.22	0.39	1159	1.81	0.003

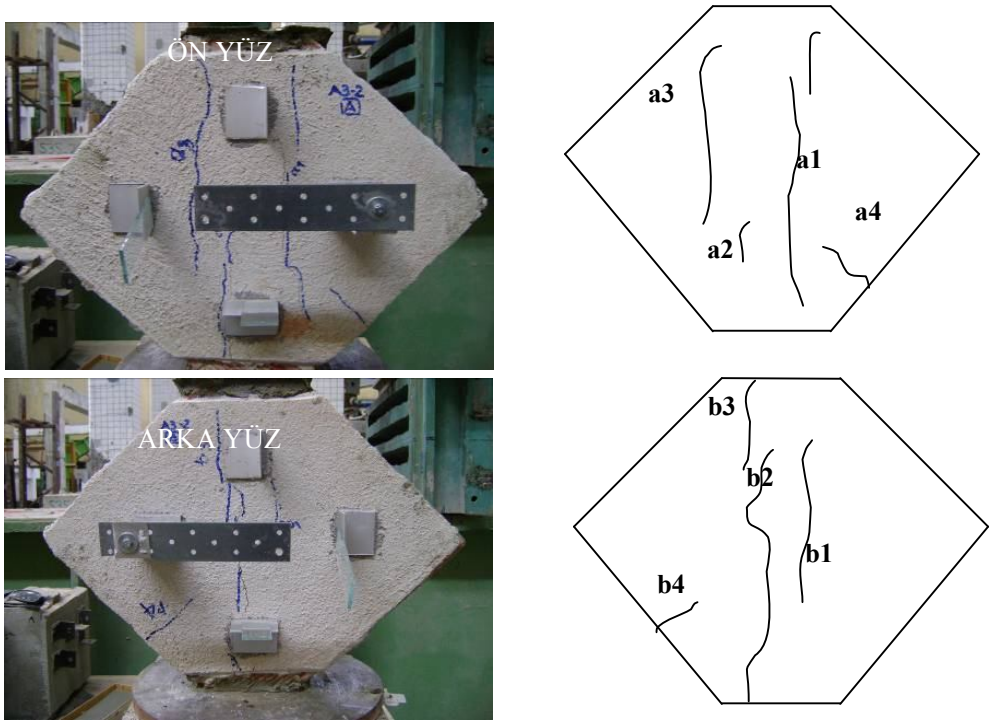
Çizelge 4.18 : A3 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
f_{msh} (MPa)	1.00	0.03	0.03
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.28	0.09	0.32
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.45	0.08	0.19
G_{msh} (MPa)	1056	146	0.14
μ_{msh}	1.65	0.23	0.14
$A_{0.85f}$	0.004	0.001	0.202

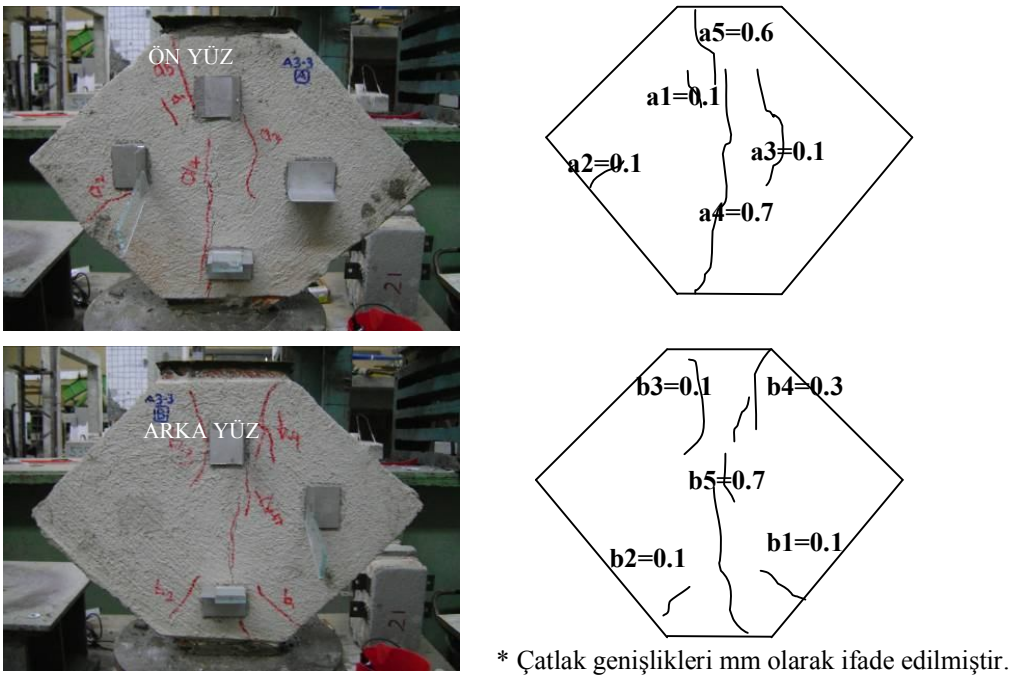
A3-1 numunesinde ilk çatlaklar (a1, a2, b1, b2) en büyük gerilme değerine çok yakın olan 0.92 MPa gerilme düzeyinde oluşmuştur. Ön yüzde orta kısımda düşey doğrultuda orta kısımda olmuştur. Arka yüzde de ön yüzdekine paralel şekilde iki çatlak düşey doğrultuda orta bölgede oluşmuştur. Bu gerilmeden sonra gerilme değeri 0.97 MPa gerilme düzeyine kadar çıkmış ve yük azalmaya başlamıştır. Bu esnada ön yüzde orta üst bölgede bir çatlak (a3) daha oluşmuş ve orta kısma kadar ilerlemiştir. Yük azalırken daha önce oluşan çatlaklar düşey doğrultuda ilerleyerek üst taraftan alt tarafa kadar ilerlemiştir. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.31 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.13 de verilmiştir.

A3-2 numunesinde ilk çatlak (a1) gerilme henüz 0.06 MPa iken meydana gelmiştir. Ön yüzde oluşan bu çatlak numunenin köşesinden orta kısma doğru oluşmuştur. 0.15 MPa gerilme düzeyinde yine ön yüzde alt kenardan orta kısma ilerleyen bir çatlak (a2) meydana gelmiştir. 0.38 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde orta kısımda düşey doğrultuda bir çatlak (a3) daha oluşmuştur. 0.59 MPa gerilme düzeyinde ise arka yüzde kenar alt bölgede orta kısma doğru bir çatlak (b1) meydana gelmiştir. 0.71 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde oluşan çatlağın karşısında bir çatlak (b2) daha oluşmuştur. Gerilmenin en büyük değeri olan 0.93 MPa gerilme düzeyinde de arka yüzde üst bölgeden düşey doğrultuda orta kısma kadar ilerleyen bir çatlak (b3) oluşmuştur. Gerilme azalırken arka ve ön yüzde düşey doğrultuda ilerleyen yeni

çatlaklar (a4, a5, b4, b5) oluşmuş, bu doğrultudaki mevcut çatlaklar ilerlemiş ve genişliği de artmıştır. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.32 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.14 de verilmiştir.



Şekil 4.31 : A3-1 numunesi deney sonrası hasar durumu.

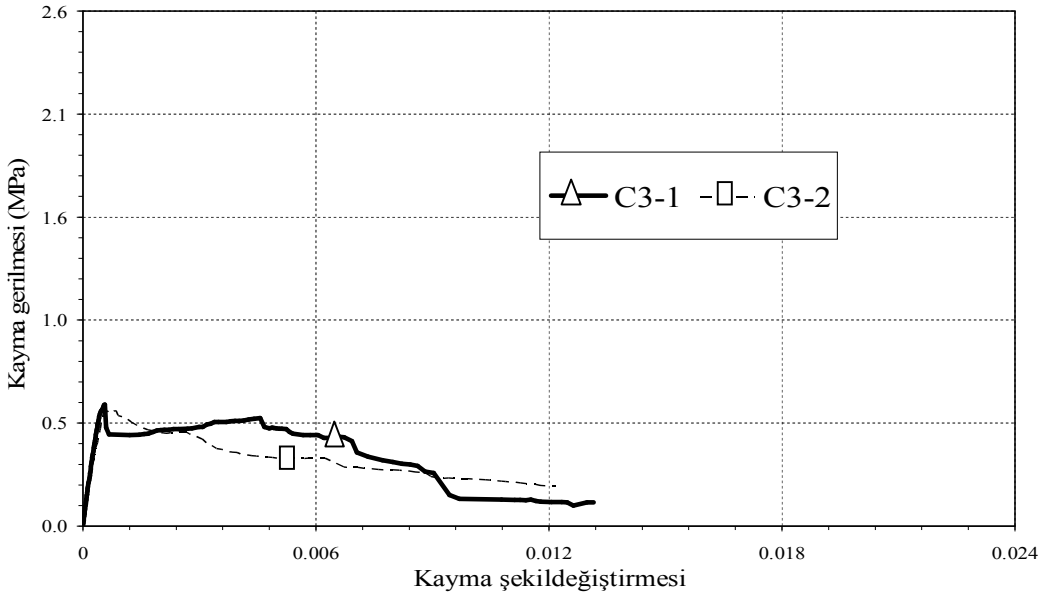


* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.32 : A3-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

4.2.5.2 C3 Numuneleri Kayma Deneyleri

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denenmesi durumundaki davranış bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir, Şekil 4.33.



Şekil 4.33 : C3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler Çizelge 4.19 da, bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.20 de verilmiştir.

Çizelge 4.19 : C3 numuneleri deney sonuçları.

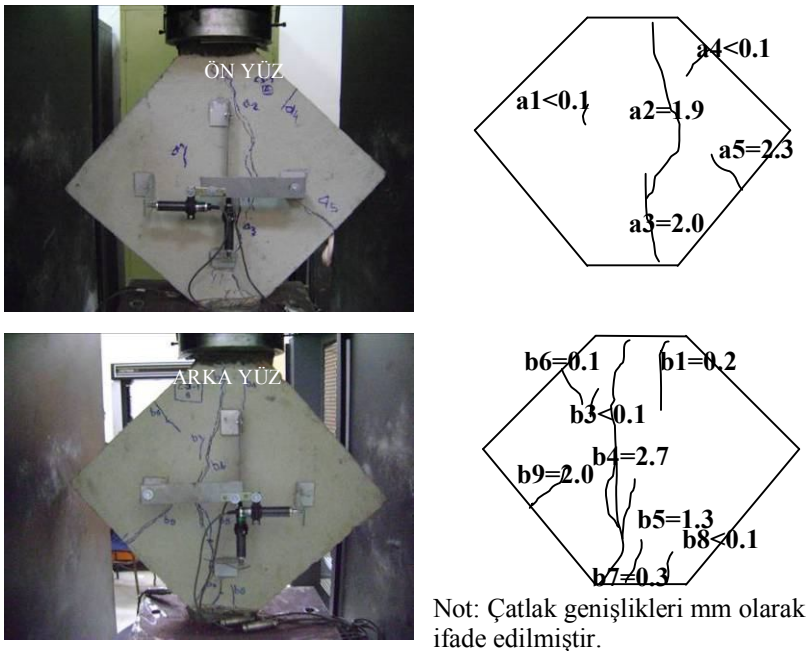
Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
C3-1	0.61	0.06	0.06	1546	1.00	0.0003
C3-2	0.58	0.08	0.15	1426	1.71	0.0009

Çizelge 4.20 : C3 numuneleri istatistiksel değerleri.

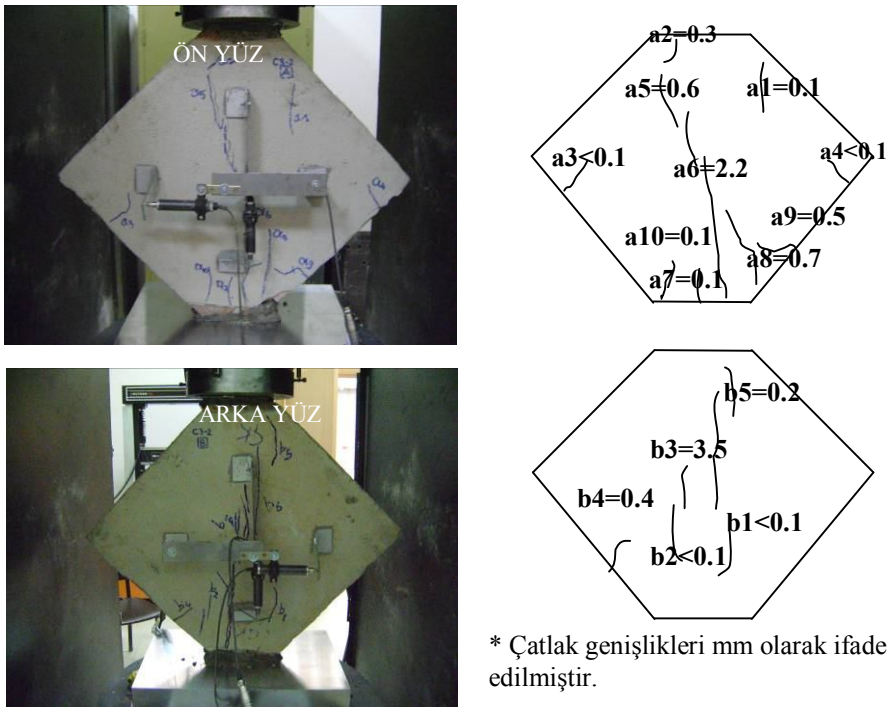
İstatistiksel değerler	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
f_{msh} (MPa)	0.60	0.02	0.03
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.07	0.02	0.29
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.10	0.06	0.59
G_{msh} (MPa)	1486	85	0.06
μ_{msh}	1.36	0.50	0.37
$A_{0.85f}$	0.0006	0.0004	0.7611

C3-1 numunesinde gerilme 0.31 MPa düzeyinde iken ön yüzde orta kısımda düşey doğrultuda küçük bir çatlak (a1) oluşmuştur. Bundan sonra gerilmenin en büyük değeri olan 0.61 MPa gerilme düzeyinde düşey doğrultuda, ön yüzde üst başlıktan alt kısma kadar ilerleyen bir çatlak (a2) oluşurken, arka yüzde düşey doğrultuda birkaç çatlak (b1, b2, b3, b4) oluşmuştur. Çatlaklarla birlikte yük ani olarak 0.50 MPa gerilme düzeyine düşmüştür. Bundan sonra numune tekrar yük almaya başlamış ve 0.55 MPa gerilme düzeyine kadar çıkmış sonra tekrar düşmüştür. Bu esnada düşey doğrultuda arka ve ön yüzeyde yeni çatlaklar (a3, b5, b7, b8) meydana gelmiştir. Bunlar dışında numunelerin kenar kısımlarından numune orta bölgelerine doğru ilerleyen çatlaklar (a4, a5, b6, b9) oluşmuştur. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.34 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.15 de verilmiştir.

C3-2 numunesinde ilk çatlak 0.17 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde üst kısımda düşey doğrultuda oluşmuştur. 0.32 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde üst kısımda küçük bir çatlak (a2) daha meydana gelmiştir. Gerilmenin en büyük değeri olan 0.58 MPa gerilme düzeyinde ön yüzde kenar kısımda bir çatlak (a3) meydana gelmiştir. Gerilme azalmaya başlamış 0.52 MPa gerilme düzeyinde arka yüzde alt kısımda iki, orta kısımda diyagonal doğrultusunda çatlaklar (a4, b1, b2) oluşmuştur. Bundan sonra gerilme azalmaya devam etmiş, arka yüzde düşey doğrultuda yeni çatlaklar (b3, b4, b5, b7, b8) oluşmuştur. Numunenin deney sonrası hasar durumu Şekil 4.35 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.16 da verilmiştir.



Şekil 4.34 : C3-1 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

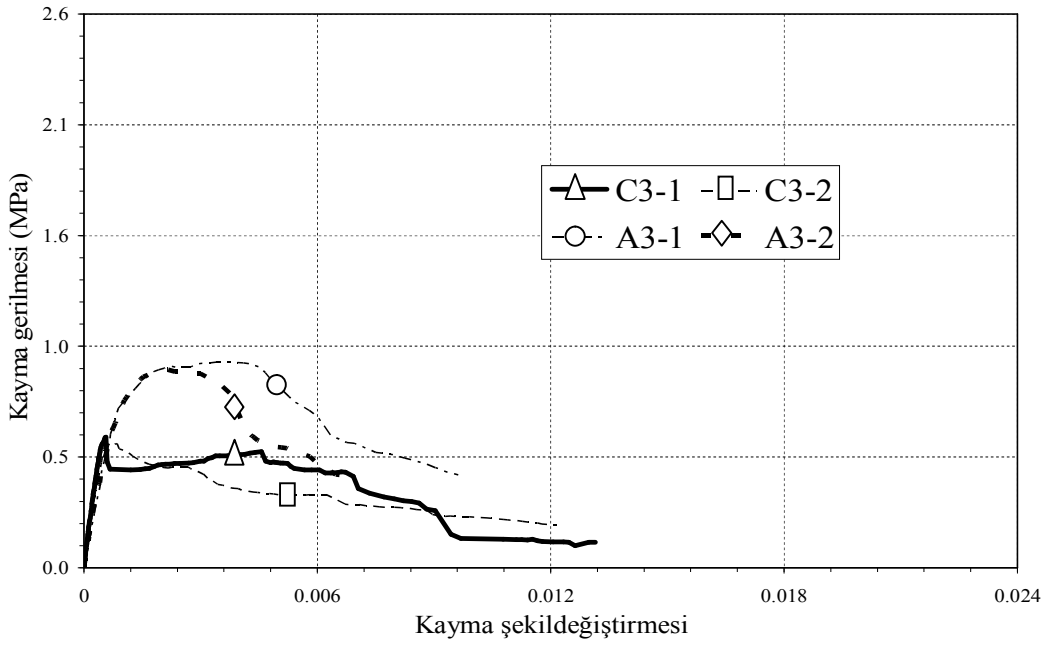


* Çatlak genişlikleri mm olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.35 : C3-2 numunesi deney sonrası hasar durumu ve çatlak genişlikleri.

4.2.5.3 A3 ve C3 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Güçlendirilmemiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A3 ve C3 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin boyut etkisi ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri bir arada Şekil 4.36 da verilmiştir.



Şekil 4.36 : A3 ve C3 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.21 de A3 ve C3 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C3 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde boyut artışı ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.21 : A3 ve C3 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

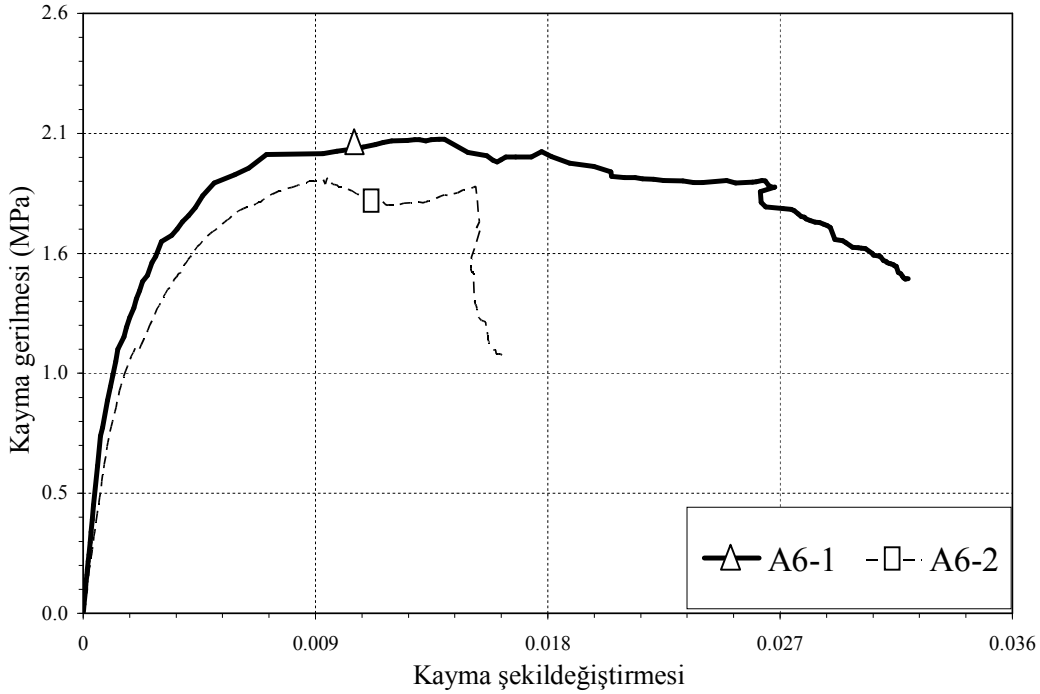
Deneysel parametreler	C3/A3 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	0.60	40 azalış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.25	75 azalış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.23	77azalış
G_{msh} (MPa)	1.41	41 artış
μ_{msh}	0.82	18 azalış
$A_{0.85f}$	0.16	84 azalış

Sonuçlara bakıldığında boyut etkisinin güçlendirilmemiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışına etkisi; dayanım, dayanıma ulaştığında oluşan kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın % 85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük azalışa neden olmuştur. Şekildeğiştirme üzerindeki bu etkiyle birlikte numune davranışı daha gevrek olmuştur. Bunların yanı sıra kayma modulünde önemli bir artış meydana gelmiştir. Hasar durumuna bakıldığında C3 ve A3 numunelerinde göçmenin şeklinin benzer olduğu görülmüştür. Dayanım değerine yakın gerilme düzeyinde meydana gelen düşey doğrultudaki çatlaklarla birlikte numuneler göçmüştür.

4.2.6 Güçlendirilmiş Duvar Kayma Deneyleri

4.2.6.1 A6 Numuneleri Kayma Deneyleri

Şeritler halinde güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denenmesi durumundaki davranış bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir, Şekil 4.37.



Şekil 4.37 : A6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler Çizelge 4.22 de, bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.23 de verilmiştir.

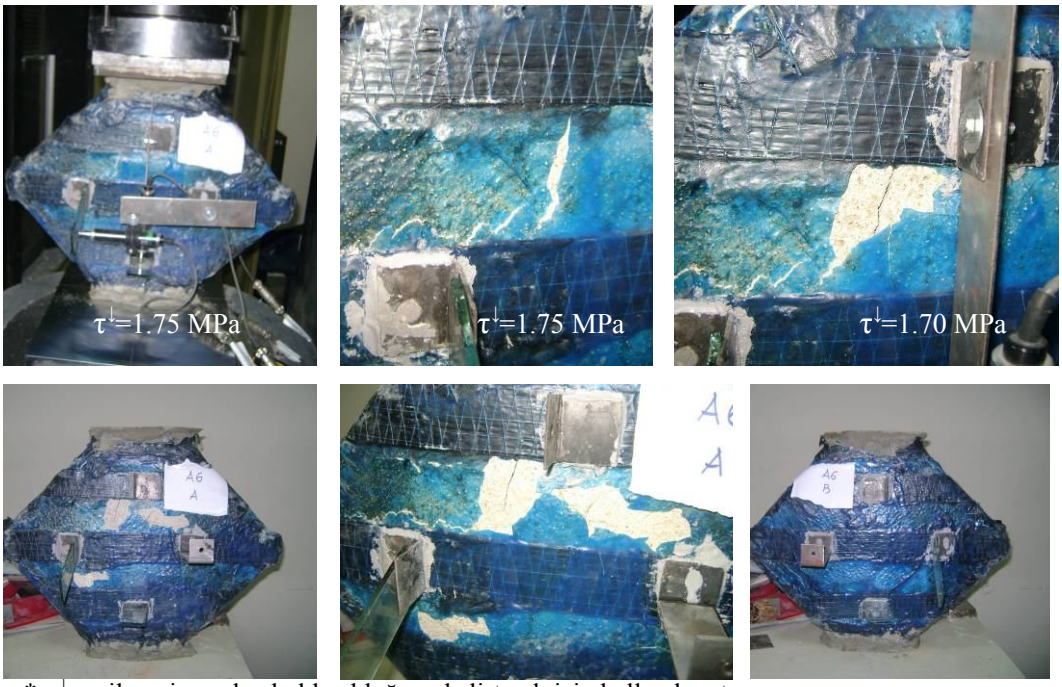
Çizelge 4.22 : A6 numuneleri deney sonuçları.

Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
A6-1	2.06	1.30	2.75	1152	2.12	0.051
A6-2	1.89	1.50	1.52	791	1.01	0.024

Çizelge 4.23 : A6 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
f_{msh} (MPa)	2.00	0.12	0.06
$\gamma_{msh,f}$ (%)	1.40	0.14	0.10
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	2.14	0.87	0.41
G_{msh} (MPa)	972	255	0.26
μ_{msh}	1.57	0.78	0.50
$A_{0.85f}$	0.037	0.019	0.504

A6-1 numunesinin taşıdığı en büyük gerileme değeri 2.06 MPa dır. Numunede dayanımdan sonra üst başlık bölgesinin altındaki CFRP malzemesinin olmadığı bölgede oluşan hasar CFRP malzemesini aşabilmiş ve orta bölgede düşey doğrultuda büyük bir çatlak oluşmuştur. Bu hasarla birlikte bu kısımdaki CFRP malzemesi gevşemiştir. CFRP malzemesinde her hangi bir hasar oluşmamıştır. Bu çatlakla birlikte numunenin yapmış olduğu yatay şekildeğiştirme büyük oranda artmıştır. Numune deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.38 de verilmiştir.



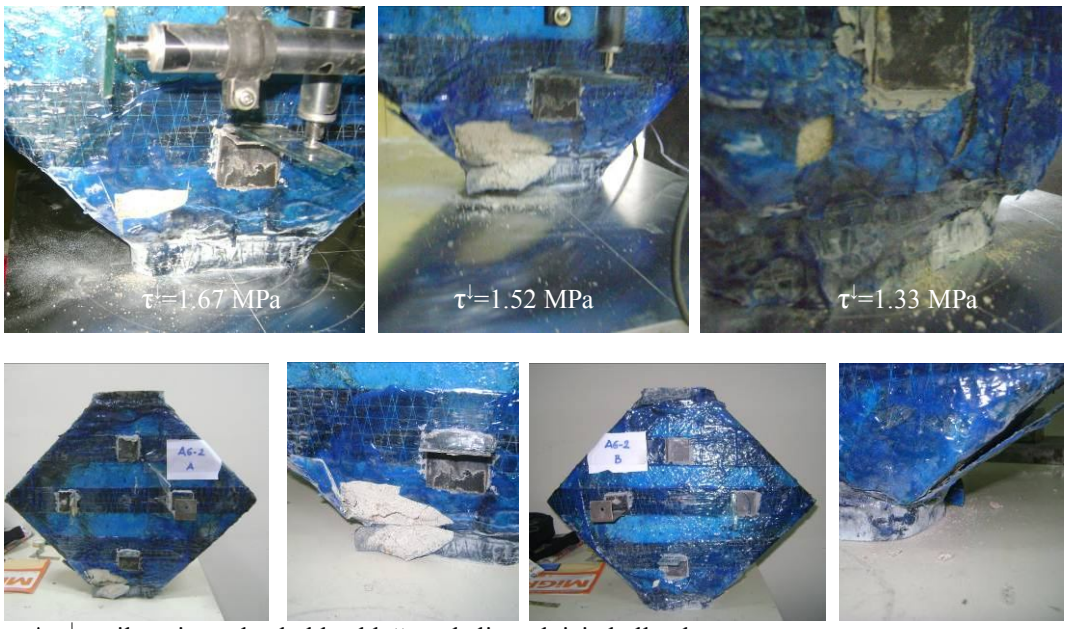
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.38 : A6-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

A6-2 numunesinin taşıdığı en büyük gerilme değeri 1.89 MPa dır. Bundan sonra çok yavaş bir şekilde yük düşüşü gözlemlenmiştir. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.39 da, numune hasar gelişimi ise Şekil A.17 de verilmiştir.

A6-1 numunesinde göçme güçlendirilmemiş bölgelerde meydana gelen hasarların yanı sıra düşey doğrultuda meydana gelen büyük bir çatlak nedeniyle olmuştur. Bu nedenle çok fazla yatay şekildeğiştirme yapmıştır. Bu düşey çatlağın açılmasını sınırlamak üzere CFRP malzemesi etkin olarak çalışmıştır. Göçme bu yatay çatlak nedeniyle olmuştur. A6-2 numunesinde göçme daha fazla güçlendirilen alt başlık bölgesinin hemen üstündeki güçlendirilmemiş bölgede meydana gelen hasar ile olmuştur. Bu bölgelerde özellikle harç hasar görmüş ve dökülmüştür. Güçlendirme

için kullanılan şerit CFRP malzemelerinde herhangi bir hasar ve zorlanma gözlenmemiştir.

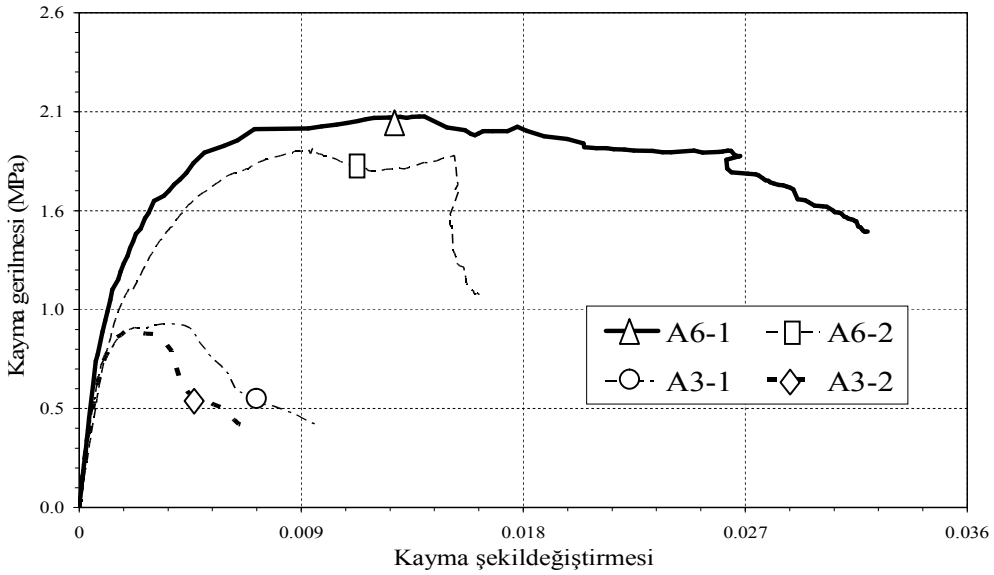


* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.39 : A6-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

4.2.6.2 A3 ve A6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A3 ve A6 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin şeritler halinde yapılan güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.40 da verilmiştir.



Şekil 4.40 : A3 ve A6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.24 de A3 ve A6 numunelerinin bulunan deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma A6 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde şeritler ile yapılan güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

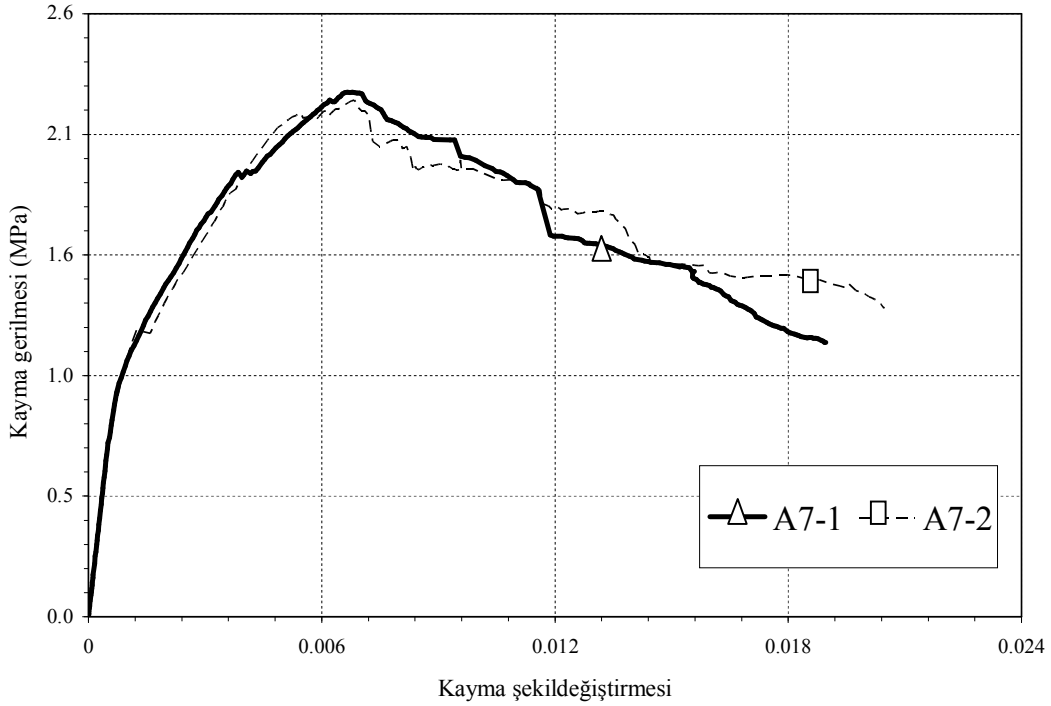
Çizelge 4.24 : A3 ve A6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	A6/A3 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	2.00	100 artış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	5.04	404 artış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	4.77	377 artış
G_{msh} (MPa)	0.92	8 azalış
μ_{msh}	0.95	5 azalış
$A_{0.85f}$	10.69	969 artış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışında şeritler halinde güçlendirme; dayanım, dayanıma karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın %85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük bir artış sağlamıştır. Güçlendirilen numune daha gevrekçe bir davranmış sergilemiş olsa da grafikler altında kalan alana bakıldığında güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma özelliği çok fazla artış göstermiştir. Numune davranışı ve göçme türü değişmiştir. A3 numunelerinde düşey doğrultuda meydana gelen çatlaklar ile meydana gelen göçme, A6 numunelerinde alt başlık bölgesinin hemen üstünde CFRP malzemesinin bulunmadığı bölgelerde meydana gelen hasarlar yüzünden göçme olmuştur.

4.2.6.3 A7 Numuneleri Kayma Deneyleri

Şeritler yerine tam olarak sargılanarak güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denenmesi durumundaki davranış bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir, Şekil 4.41.



Şekil 4.41 : A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler Çizelge 4.25 de, bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.26 de verilmiştir.

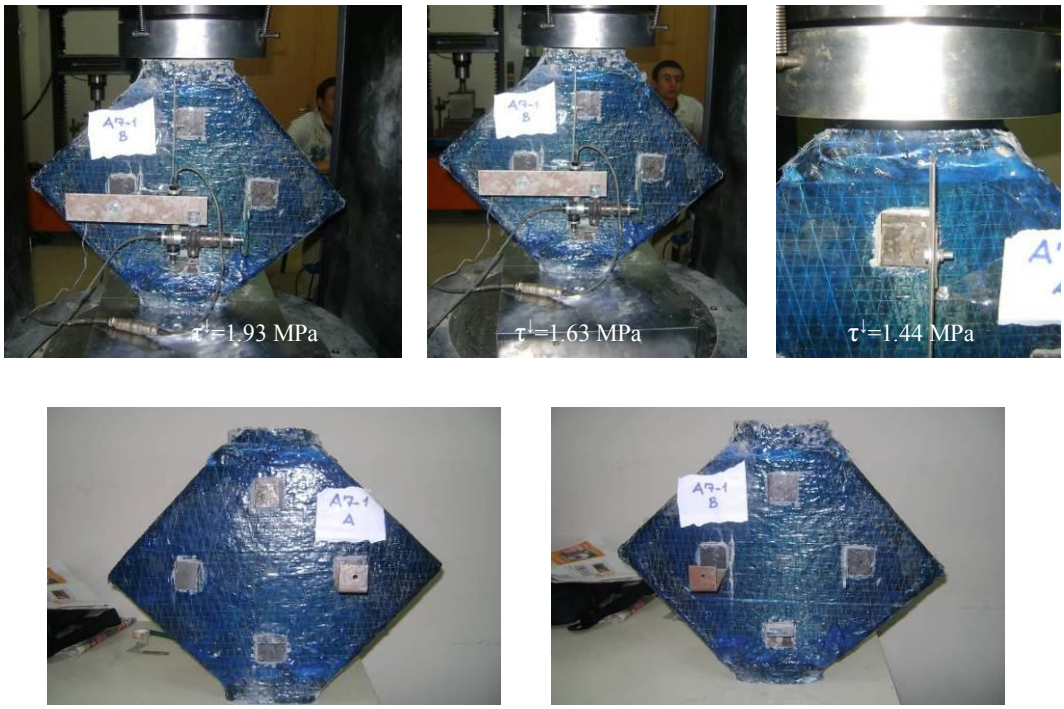
Çizelge 4.25 : A7 numuneleri deney sonuçları.

Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
A7-1	2.27	0.68	1.05	1489	1.55	0.019
A7-2	2.23	0.68	1.05	1512	1.53	0.019

Çizelge 4.26 : A7 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
f_{msh} (MPa)	2.30	0.03	0.01
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.68	0.00	-
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	1.05	0.00	-
G_{msh} (MPa)	1501	16	0.01
μ_{msh}	1.54	0.01	0.01
$A_{0.85f}$	0.019	0.000	0.000

A7-1 Numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı ve epoksi malzemesi uygulandığı için herhangi bir çatlak gözlemlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 2.27 MPa'dır. Bu gerilme değerinden sonra yavaş bir şekilde yük düşüşü gözlemlenmiştir. Göçme alt ve üst başlık bölgelerine yakın olan tuğlalarda ezilme oluşması nedeniyle meydana gelmiştir. Bununla birlikte bu bölgelerde genişleme meydana gelmiş ve genişleyen bu bölgeler numunenin köşe kısımlarında CFRP kumaşının yırtılmasına neden olmuştur. Yırtıklar bir anda olmamış küçük bir yırtıkla başlayıp giderek artmıştır. Yırtılmanın başlangıç anı dayanıma ulaştıktan sonradır. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.42 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.18 de verilmiştir.

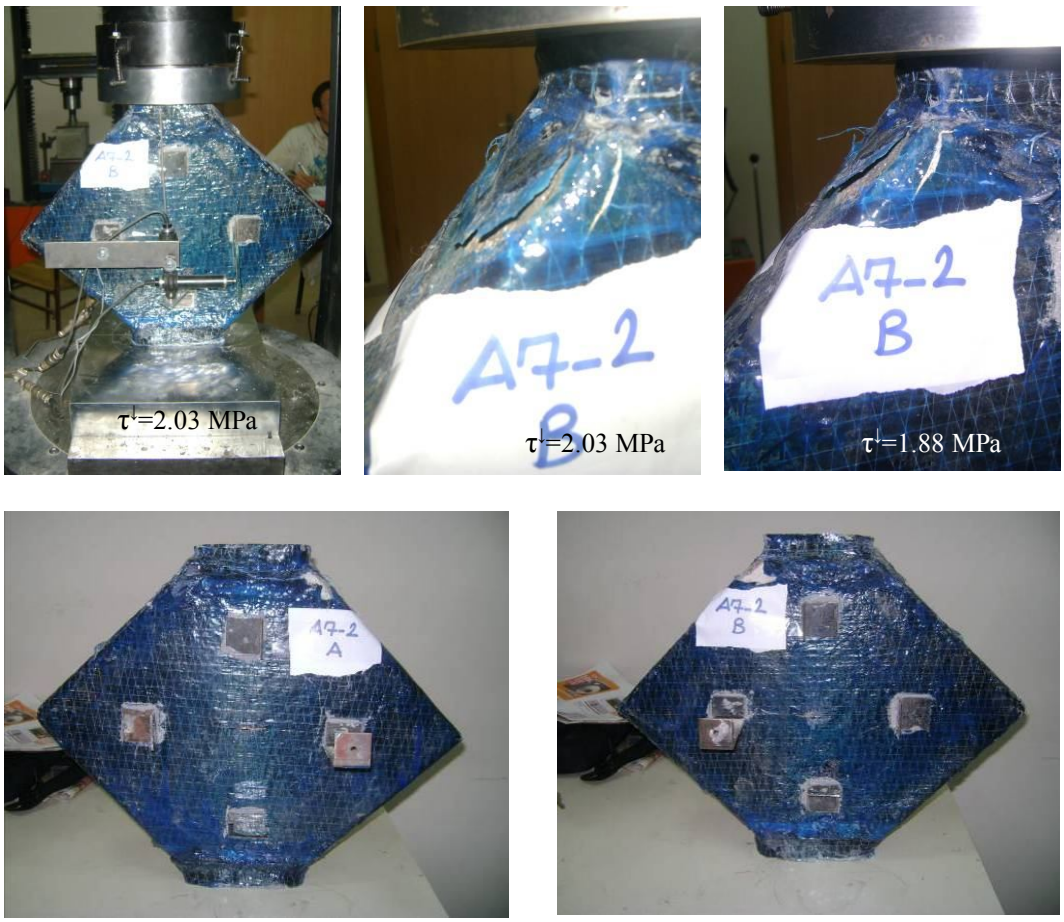


* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.42 : A7-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

A7-2 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı ve epoksi malzemesi uygulandığı için herhangi bir çatlak gözlemlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 2.23 MPa dır. Bu gerilme değerinden sonra yavaş bir şekilde yük düşüşü gözlemlenmiştir. Göçme A7-1 numunesi ile benzer şekilde gerçekleşmiştir. Alt ve üst başlık bölgelerinde meydana gelen tuğlaların ezilmesi ile birlikte bu gölgeler genişlemiştir. Dayanımdan sonra genişleyen bu bölgelerde meydana gelen CFRP malzemesindeki yırtılma ile numune göçmüştür. Numunenin deney aşamasındaki ve

deney sonundaki durumu Şekil 4.43 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.19 da verilmiştir.



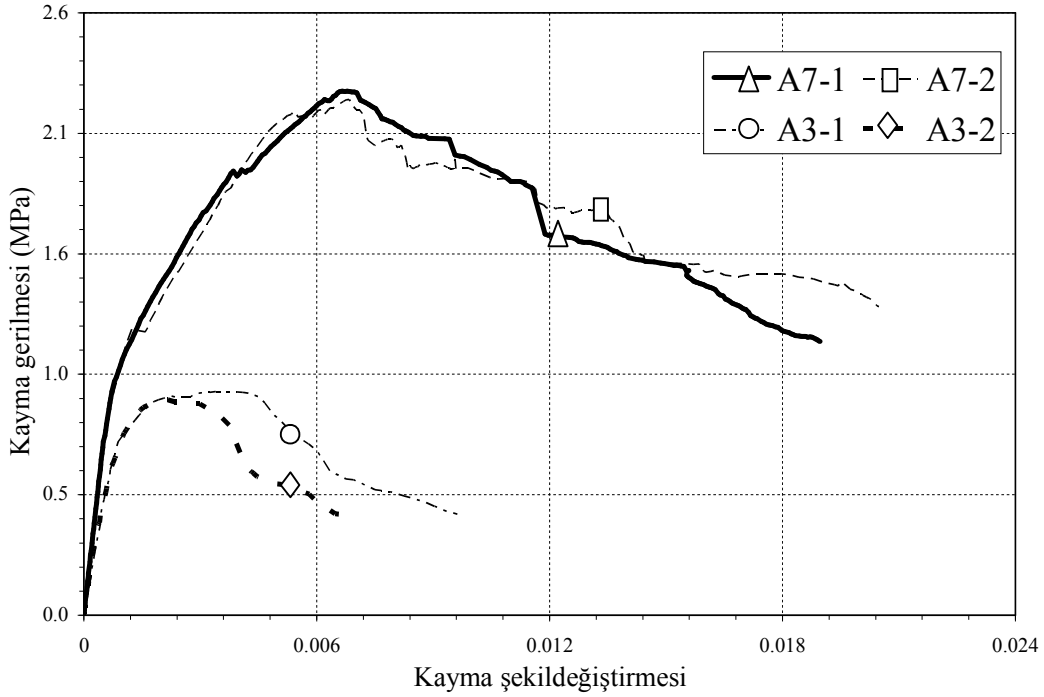
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.43 : A7-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

4.2.6.4 A3 ve A7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A3 ve A7 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin tam olarak yapılan güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.44 de verilmiştir.

Çizelge 4.27 de A3 ve A7 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde tam sargılama olarak yapılan güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.



Şekil 4.44 : A3 ve A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkilerileri.

Çizelge 4.27 : A3 ve A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

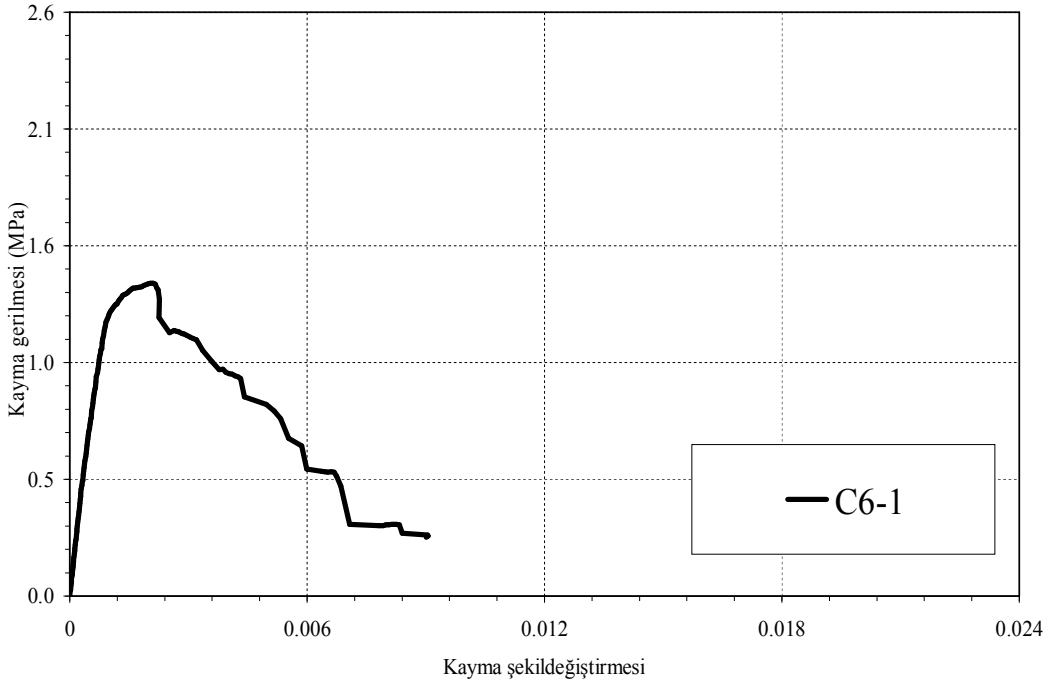
Deneysel parametreler	A7/A3 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	2.30	130 artış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	2.45	145 artış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	2.33	133 artış
G_{msh} (MPa)	1.42	42 artış
μ_{msh}	0.93	7 azalış
$A_{0.85f}$	5.43	443 artış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışında tam sargılama olarak yapılan güçlendirmenin etkisi; dayanım, dayanım karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın gerilmenin %85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük bir artışa neden olmuştur. Güçlendirilen numune daha gevrekçe bir davranış sergilemiş olsa da grafikler altında kalan alana bakıldığında numunenin enerji yutma özelliği çok fazla artış göstermiştir. Numune davranışı ve göçme türü değişmiştir. A3 numunelerinde düşey doğrultuda meydana gelen çatlaklar ile meydana gelen göçme, A7 numunelerinde ise alt ve üst başlık bölgelerine yakın yerlerdeki tuğlaların

ezilmesi ile bu bölgelerde genişleme meydana gelmiştir. Genişleyen bu bölgelerde CFRP malzemesi yırtılmış ve bu yırtılmayla birlikte numuneler göçmüştür.

4.2.6.5 C6 Numunesi Kayma Deneyi

Şeritler halinde güçlendirilmiş duvarın diyagonal olarak yerleştirip bu şekilde yüklenmesi durumdaki davranışını göstermektedir. Numunenin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerlerle birlikte numunenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir, Şekil 4.45.



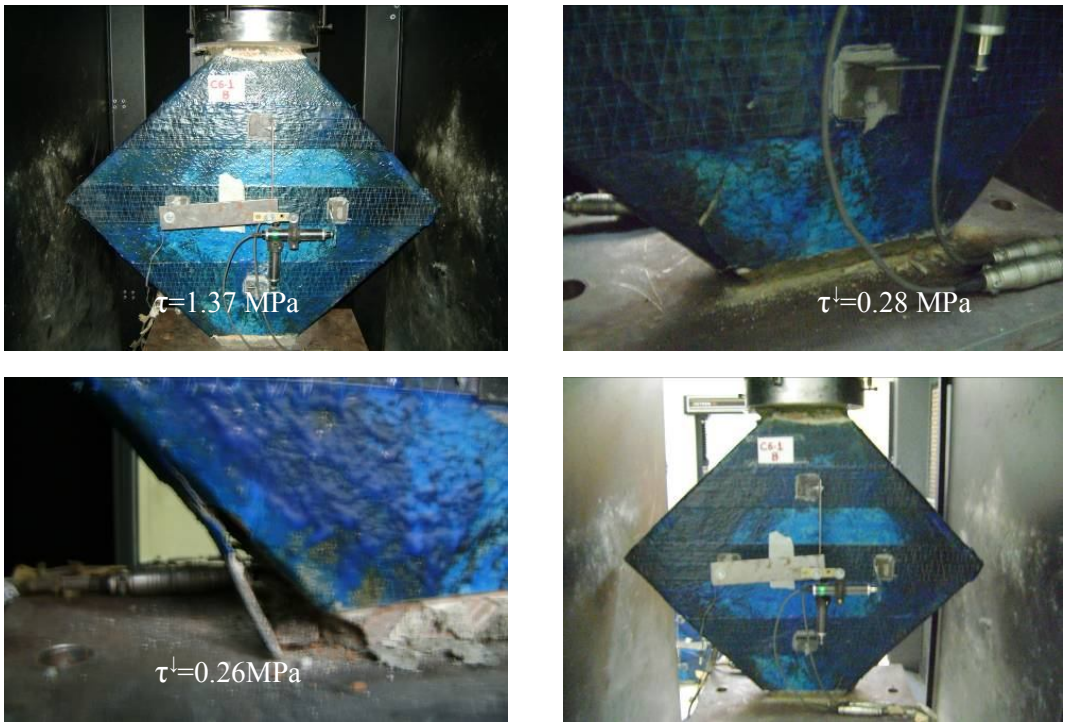
Şekil 4.45 : C6 numunesi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

Deney esnasında C6-2 numunesinde üst başlık bölgesinde meydana gelen beklenmedik kırılma yüzünden veri alınamamıştır. Bu yüzden C6 numuneleri için yalnızca C6-1 numunesinden elde edilen deneysel parametreler verilmiştir, Çizelge 4.28.

Çizelge 4.28 : C6 numuneleri deney sonuçları.

Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
C6-1	1.39	0.21	0.26	1628	1.30	0.003
C6-2	DH	DH	DH	DH	DH	DH

C6-1 numunesinin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 1.39 MPa dır. C6 numunesi alt başlık bölgesinin üstündeki bölgede meydana gelen hasar yüzünden göçmüştür. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.46 da, numune hasar gelişimi ise Şekil A.20 de verilmiştir.



* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.46 : C6-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

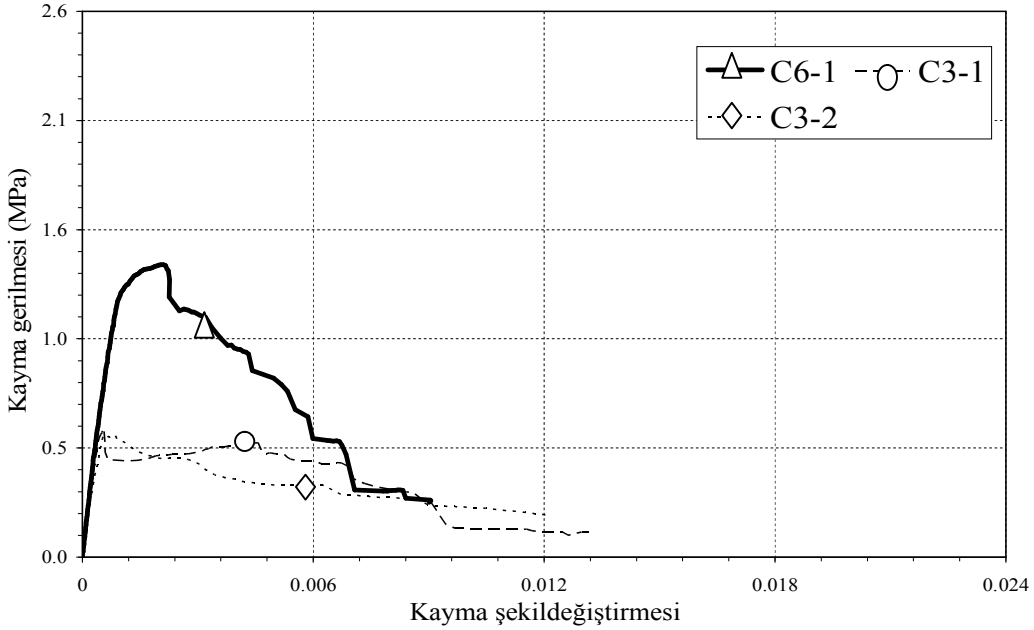
C6-2 numunesinde gerilme değeri 0.79 MPa iken beklenmedik bir şekilde üst başlık bölgesinin altındaki tuğla kırılmış ve buradaki harç yüzeyden atmıştır, Şekil 4.47. Numune taşıma kapasitesinin çok altında göçmüştür. Bu numuneden sağlıklı veri alınamadığı için bu numune sonuçları hesaplarda kullanılmamıştır.



Şekil 4.47 : C6-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

4.2.6.6 C3 ve C6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği C3 ve C6 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin şeritler halinde yapılan güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.48 de verilmiştir.



Şekil 4.48 : C3 ve C6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.29 de C3 ve C6 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin C3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde şeritler ile yapılan güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

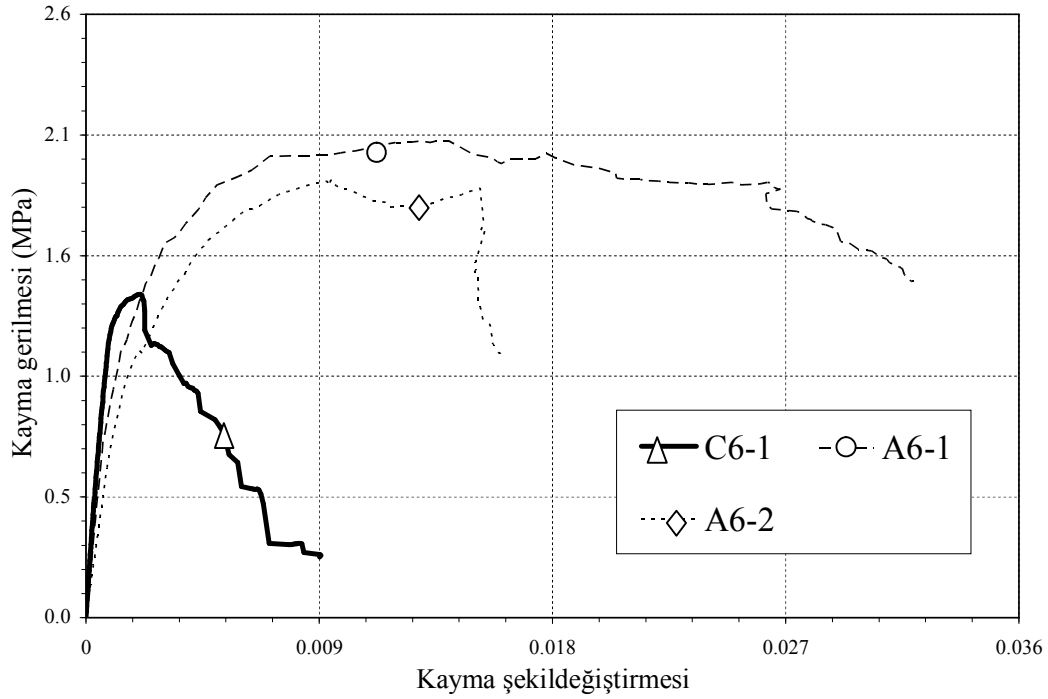
Çizelge 4.29 : C3 ve C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	C6/C3 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	2.33	133 artış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	2.99	199 artış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	2.57	157 artış
G_{msh} (MPa)	1.10	10 artış
μ_{msh}	0.92	8 azalış
$A_{0.85f}$	5.27	427 artış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışında şeritler halinde güçlendirme; dayanım, dayanıma karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın % 85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük bir artış sağlamıştır. Güçlendirilen numune daha gevrekçe bir davranmış sergilemiş olsa da grafikler altında kalan alana bakıldığında numunenin enerji yutma özelliği çok fazla artış göstermiştir. Numune davranışı ve göçme türü değişmiştir. C3 numunelerinde düşey doğrultuda meydana gelen çatlaklar ile meydana gelen göçme, C6 numunesinde alt başlık bölgesinin hemen üstünde CFRP malzemesinin bulunmadığı bölgelerde meydana gelen hasarlar yüzünden göçme olmuştur.

4.2.6.7 A6 ve C6 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şeritler halinde güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A6 ve C6 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin boyut etkisi ile değişimi şeritler halinde güçlendirilmiş numuneler için gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.49 da verilmiştir.



Şekil 4.49 : A6 ve C6 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.30 da A6 ve C6 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A6 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde boyut artışı ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.30 : A6 ve C6 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

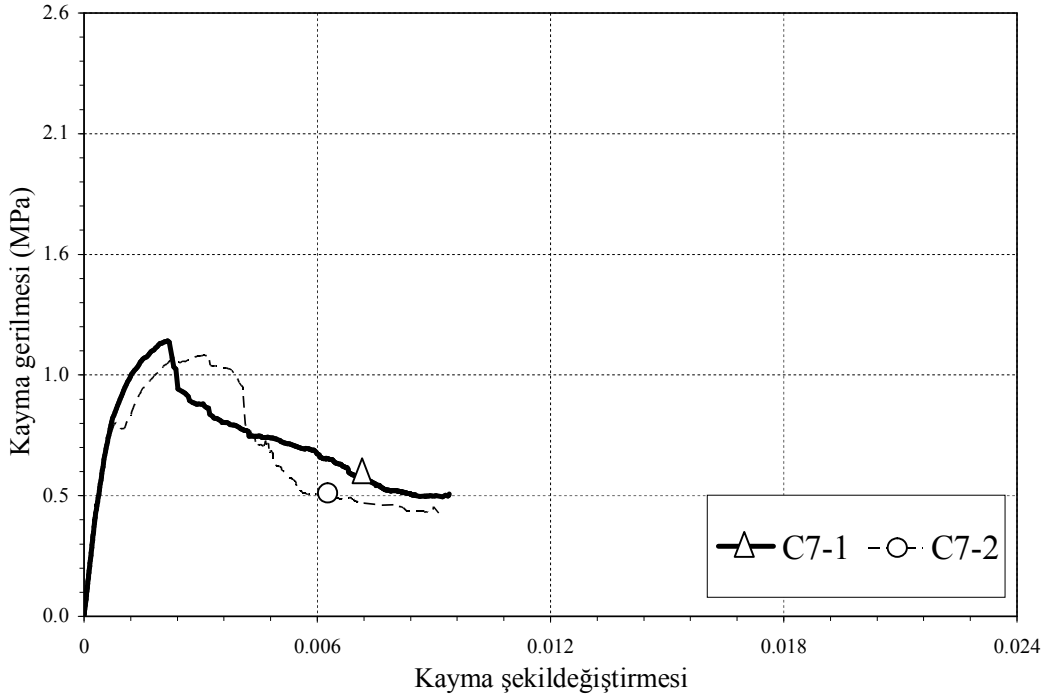
Deneysel parametreler	C6/A6 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
$f_{mc,p}$ (MPa)	0.70	30 azalış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.15	85 azalış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.12	88 azalış
G_{msh} (MPa)	1.67	67 artış
$\mu_{mc,p}$	0.80	20 artış
$A_{0.85f}$	0.08	92 azalış

Sonuçlara bakıldığında boyut etkisinin şeritler halinde güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışına etkisi; dayanım, dayanıma karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın %85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük azalışa neden olmuştur. Bunun yanı sıra kayma modülünde önemli bir artış meydana gelmiştir. Hasar durumuna bakıldığında C6 ve A6 numunelerinde göçmenin şeklinin benzer olduğu görülmüştür. Numuneler alt başlık bölgesinin üstündeki bölgede oluşan hasarla birlikte göçme yaşanmıştır.

4.2.6.8 C7 Numuneleri Kayma Deneyleri

Şerit yerine tam sargı olarak güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denenmesi durumundaki davranış bu paragrafta özetlenmiştir. Numunelerin üzerine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler tarafından deney esnasında kaydedilen değerler kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir, Şekil 4.50.

Grafikler yardımı ile elde edilen deneysel parametreler Çizelge 4.31 de, bunların istatistiksel değerleri ise Çizelge 4.32 de verilmiştir.



Şekil 4.50 : C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.31 : C7 numuneleri deney sonuçları.

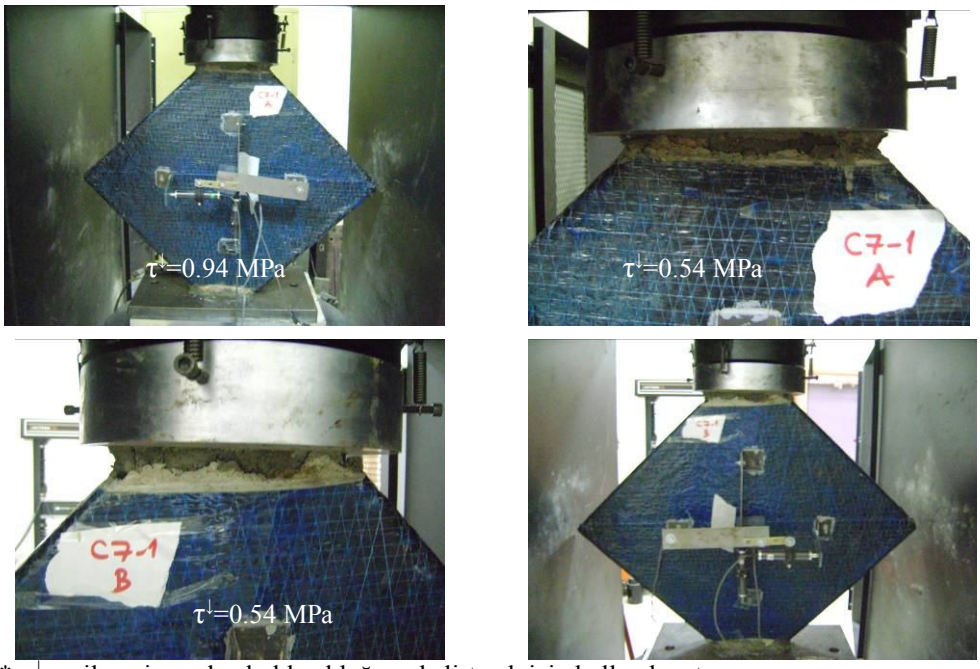
Numune	f_{msh} (MPa)	$\gamma_{msh,f}$ (%)	$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	G_{msh} (MPa)	μ_{msh}	$A_{0.85f}$
C7-1	1.19	0.21	0.24	1491	1.10	0.002
C7-2	1.12	0.31	0.41	1778	1.31	0.004

Çizelge 4.32 : C7 numuneleri istatistiksel değerleri.

İstatistiksel değerler	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
f_{msh} (MPa)	1.20	0.05	0.04
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.26	0.07	0.26
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.32	0.12	0.38
G_{msh} (MPa)	1635	203	0.12
μ_{msh}	1.21	0.15	0.12
$A_{0.85f}$	0.003	0.001	0.304

C7-1 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı ve epoksi malzemesi uygulandığı için herhangi bir çatlak gözlemlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 1.19 MPa dır. Gerilmenin en büyük değerinden sonra ani bir yük düşüşü olmuş ve gerilme 0.93 MPa civarına inmiştir. Bundan sonra numunede yavaş bir yük

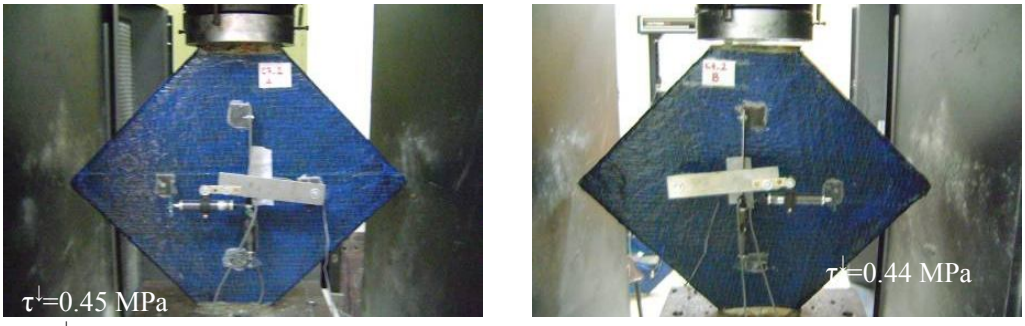
düşüşü yaşanmıştır. Numunede göçme alt ve üst başlık bölgeleri civarında bulunan tuğlaların ezilmesi sonucu bu kısımlar numune içine doğru girmesiyle olmuştur. CFRP malzemesinde herhangi bir hasar görülmemiştir, yırtılma olmamıştır. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 5.51 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.21 de verilmiştir.



* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.51 : C7-1 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

C7-2 numunesi CFRP malzemesi ile sarıldığı ve epoksi malzemesi uygulandığı için herhangi bir çatlak gözlemlenememiştir. Numunenin taşıdığı gerilmenin en büyük değeri 1.12 MPa dır. Bundan sonra yavaş bir şekilde yük düşüşü gözlemlenmiştir. Numunenin göçme şekli C7-1 numunesi ile benzerdir. Numunenin deney aşamasındaki ve deney sonundaki durumu Şekil 4.52 de, numune hasar gelişimi ise Şekil A.22 de verilmiştir.

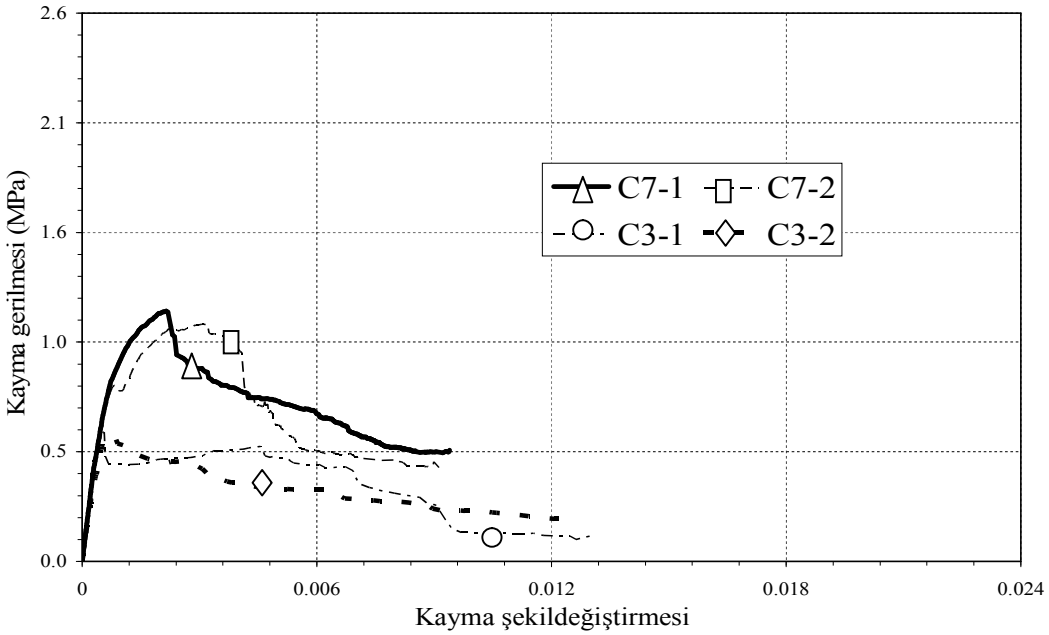


* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Şekil 4.52 : C7-2 numunesi deney esnasındaki ve deney sonrası durumu.

4.2.6.9 C3 ve C7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği C3 ve C7 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin tam sargılama şeklinde yapılan güçlendirme ile değişimi gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.53 de verilmiştir.



Şekil 4.53 : C3 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.33 C3 ve C7 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin C3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde tam sargılama ile yapılan güçlendirme ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

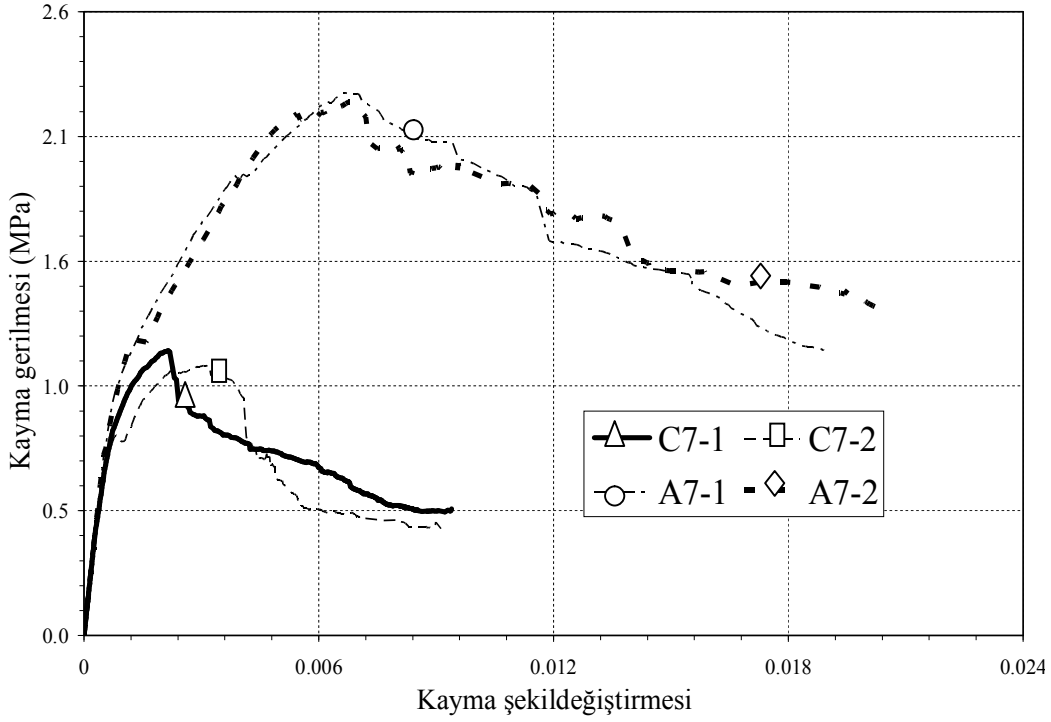
Çizelge 4.33 : C3 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	C7/C3 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	2.00	100 artış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	3.73	273 artış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	3.13	213 artış
G_{msh} (MPa)	1.10	10 artış
μ_{msh}	0.89	11 azalış
$A_{0.85f}$	5.44	444 artış

Sonuçlara bakıldığında duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışında tam sargılama ile yapılan güçlendirmenin; dayanım, dayanıma karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın % 85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük bir artışa neden olmuştur. Güçlendirilen numune daha gevrekçe bir davranmış sergilemiş olsa da grafikler altında kalan alana bakıldığında numunenin enerji yutma özelliği çok fazla artış göstermiştir. Numune davranışı ve göçme türü değişmiştir. C3 numunelerinde düşey doğrultuda meydana gelen çatlaklar ile meydana gelen göçme, C7 numunelerinde alt ve üst başlık bölgesi civarında tuğlalarda meydana gelen ezilme ile birlikte ortaya çıkmıştır.

4.2.6.10 A7 ve C7 Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tam sargı ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A7 ve C7 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak numune davranışının ve karakteristiklerinin boyut etkisi ile değişimi tam sargı ile güçlendirilmiş numuneler için gösterilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.54 de verilmiştir.



Şekil 4.54 : A7 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.34 de A7 ve C7 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A7 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde boyut artışı ile deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

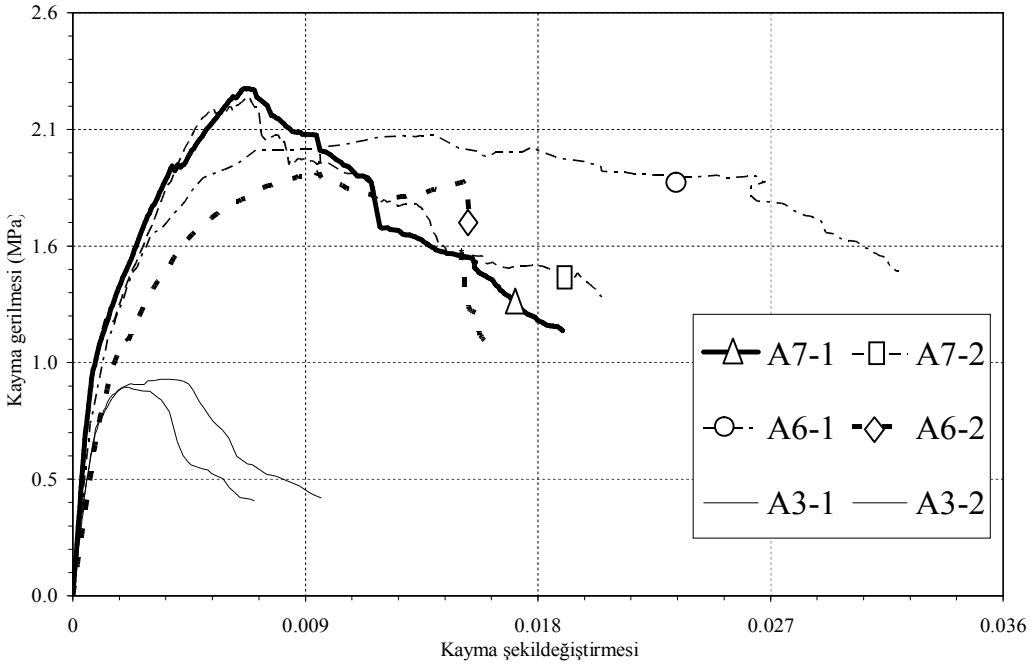
Çizelge 4.34 : A7 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	C7/A7 oranı	Artış veya azalış miktarı (%)
f_{msh} (MPa)	0.52	48 azalış
$\gamma_{msh,f}$ (%)	0.39	61 azalış
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	0.31	69 azalış
G_{msh} (MPa)	1.09	9 artış
μ_{msh}	0.79	21 azalış
$A_{0.85f}$	0.16	84 azalış

Sonuçlara bakıldığında boyut etkisinin tam sargı ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altındaki davranışına etkisi; dayanım, dayanıma karşı gelen kayma şekildeğiştirmesi ve dayanımın % 85'i değerindeki gerilme değerinde yapmış olduğu kayma şekildeğiştirmesi miktarında büyük azalışa neden olmuştur. Bunun yanı sıra kayma modulü fazla değişmemiştir. Hasar durumuna bakıldığında C7 ve A7 numunelerinde göçmenin şeklinin benzer olduğu söylenebilir. Göçme alt ve üst başlık bölgesindeki tuğlaların ezilmesi ile oluşmuştur. Fakat A7 numunelerinde tuğlaların ezilmesi ile bu bölgelerde CFRP malzemesi yırtılmışken; C7 numunelerinde bu bölgelerde CFRP malzemesinde bir hasar oluşmamış, bu bölgeler numune içine girmiştir.

4.2.6.11 A6 ve A7 Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şeritler halinde ve tam sargı ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği A6 ve A7 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak güçlendirme yönteminin ve miktarının etkinliği karşılaştırılmıştır. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.55 de verilmiştir.



Şekil 4.55 : A6 ve A7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.35 de A6 ve A7 numunelerinin bulunan deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma A6 ve A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin A3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde güçlendirme yönteminin etkinliği deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.35 : A6 ve A7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

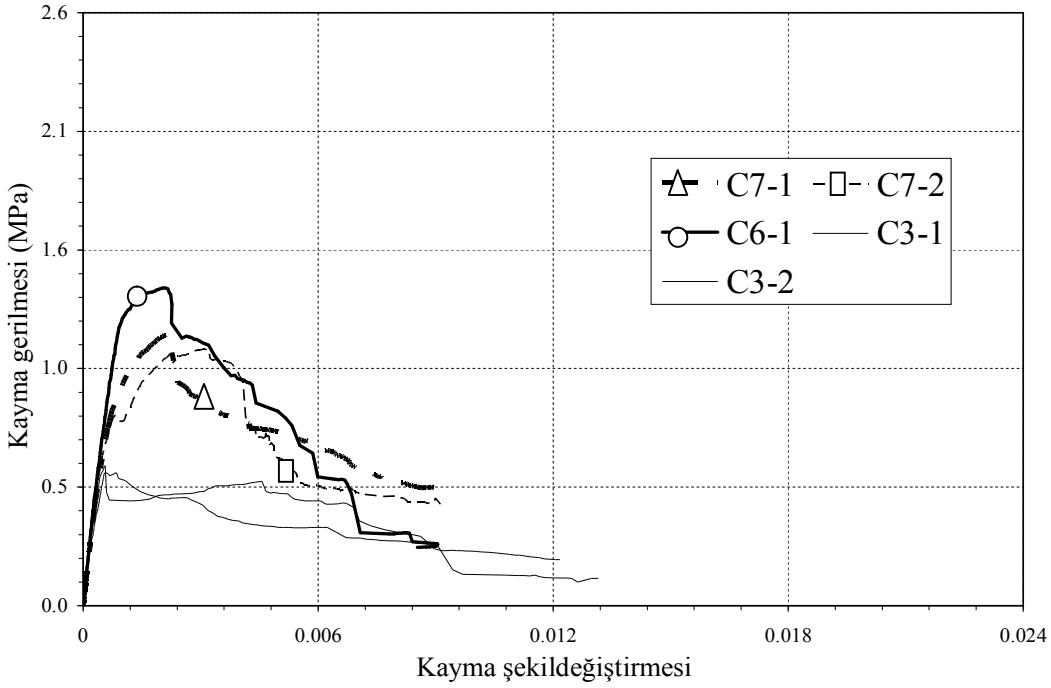
Deneysel parametreler	A6/A3 oranı	A7/A3 oranı
f_{msh} (MPa)	2.00	2.30
$\gamma_{msh,f}$ (%)	5.04	2.45
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	4.77	2.33
G_{msh} (MPa)	0.92	1.42
μ_{msh}	0.95	0.92
$A_{0.85f}$	10.69	5.43

Sonuçlara bakıldığında tam güçlendirilmiş numunelerin kayma dayanımının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu beklenen bir durumdur. A6 numunelerinin şekildeğiştirme yeteneği ise daha fazla artış göstermiştir. Daha az CFRP malzemesi

ile sarılan A6 numuneleri daha fazla hasar görmüş ve daha fazla yatay şekildeğiştirme yapmıştır ve bu da sonuçlara yansımıştır. A6 numunelerinin enerji yutma özelliği ve şekildeğiştirme kapasitesinde yapmış olduğu artışa bakıldığında bu durumun özellikle deprem durumu için şeritler halinde yapılan güçlendirmenin tercih edilecek bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra şeritler halinde yapılan güçlendirmenin daha ekonomik olması da diğer bir tercih sebebidir.

4.2.6.12 C6 ve C7 Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şeritler halinde ve tam sargı ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin diyagonal çekme etkileri altında denendiği C6 ve C7 numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılarak güçlendirme yönteminin ve miktarının etkinliği karşılaştırılmıştır. Numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bir arada Şekil 4.56 da verilmiştir.



Şekil 4.56 : C6 ve C7 numuneleri kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ilişkileri.

Çizelge 4.36 da C6 ve C7 numunelerinin deneysel parametreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma C6 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin ortalama değerlerinin C3 numunelerininkine oranı olarak yapılmıştır. Bu şekilde güçlendirme yönteminin etkinliği deneysel parametrelerdeki artış veya azalış belirlenmiştir.

Çizelge 4.36 : C6 ve C7 numunelerinin deneysel parametrelerinin karşılaştırılması.

Deneysel parametreler	C6/C3 oranı	C7/C3 oranı
f_{msh} (MPa)	2.33	2.00
$\gamma_{msh,f}$ (%)	2.99	3.73
$\gamma_{msh,0.85f}$ (%)	2.57	3.13
G_{msh} (MPa)	1.10	1.10
μ_{msh}	0.92	0.89
$A_{0.85f}$	5.27	5.44

Sonuçlara bakıldığında tam güçlendirilmiş numunelerin kayma dayanımının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu beklenmeyen bir durumdur. Bunun nedeni olarak CFRP malzemesinin C7 numunelerinde tam kapasite ile çalışmadığı, her iki güçlendirme tipi için de yalnızca başlık bölgelerine yakın yerdeki CFRP malzemesinin çalıştığı tahmin edilebilir. Bundan ötürü her iki güçlendirme tipinin etkisi birbirine yakın olmuştur. Bu anlamda şeritler halinde yapılan güçlendirmenin ekonomik olması dolayısıyla daha uygun bir çözüm olduğu görülmektedir.

5. ANALİTİK ÇALIŞMA

5.1 Giriş

Bu bölümde çalışma boyunca yapılan deneylerden elde edilen değerler ile TDY'de [16] ve Eurocode-6'da [19] tanımlanan amprik bağıntılarla elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Analitik çalışma, malzeme numuneleri ve duvar numuneleri olmak üzere iki ayrı başlık altında yapılmıştır.

5.2 Malzeme Numuneleri Deneysel ve Ampirik Sonuçları

Dolgu duvarların yapısal davranışlarının en iyi şekilde anlaşılabilmesi için, duvarı oluşturan malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için yapılan deneyler ile belirlenen mekanik özellikleri TDY'de ve Eurocode-6'da tanımlanan minimum sınır değerler ile karşılaştırılmıştır, Çizelge 5.1.

Bu tabloda verilen ve deneysel olarak belirlenen malzeme mekanik özellikleri; f_b tuğla basınç dayanımı, , f_{vko} sıfır basınç dayanımı altında duvar kayma dayanımını simgelemektedir.

Çizelge 5.1 : Eurocode-6 ve TDY Minimum Sınır Değerleri.

	Eurocode-6	**TDY**
f_b :	f'_b	5.00
f_{vko}:	0.20	0.12

Tuğla basınç dayanımı (f_b); Eurocode-6 da deneye tabi tutulmuş tuğla numunelerinin ortalama basınç dayanımı olarak tanımlanmıştır. Eurocode-6'da ayrıca tasarım sırasında ise tuğla basınç dayanımı olarak standartlaştırılmış tuğla basınç dayanımının kullanılması gerektiği belirtmiştir. Standartlaştırılmış tuğla basınç dayanımı da, numunelerin boyutlarına bağlı olarak belirlenen ve 0.65 ile 1.55 arasında olan bir katsayı ile deneysel olarak elde edilen ortalama tuğla basınç dayanımı değerinin çarpılmasıyla hesaplanır. Yığma duvarların deprem etkisine

maruz kalması durumunda bu katsayı 0.7 olarak alınabilir, [19]. TDY'de ise taşıyıcı duvarlarda kullanılacak doğal ve yapay birimlerin en düşük basınç dayanımının en az 5.00 MPa olması gerektiği belirtilmiştir.

Sıfır basınç gerilmesi altında duvar kayma dayanımı (f_{vko}); Eurocode-6'da duvar imalatında kullanılan tuğla ve harç basınç dayanımına bağlı olarak belirlenen 0.2 MPa olarak verilmiştir. TDY'de duvar tasarımında çimento takviyeli kireç harcı ve boşluklu tuğla ile örülen duvar numuneleri için duvar çatlama emniyet gerilmesinin 0.12 MPa alınacağı belirtilmiştir.

Malzeme deneyi olarak, yapılan tuğla deneylerinden elde edilen deneysel veriler Çizelge 5.2 de yukarıda verilen minimum sınır değerler göz önüne alınarak belirlenen analitik sonuçlar ile karşılaştırılmalı verilmiştir. Elde edilen deneysel tuğla basınç dayanımlarından tuğla delik yönündeki dayanımı TDY'de öngörülen minimum sınır değerin üstündeyken, delik dik dayanımında yönetmelikte belirtilen şartı sağlamamıştır. Eurocode-6'ya göre alınacak tuğla basınç dayanımı ise çalışmada tasarım yapılmadığı için elde edilen deneysel tuğla basınç dayanımı değeridir.

Çizelge 5.2 : Malzeme numuneleri deneysel sonuçları ve analitik minimum sınır değerleri.

		Deneysel Sonuçlar		Eurocode-6		TDY	
	Yükleme yönü	DY	DD	DY	DD	DD	DY
f_b (MPa)	Ortalama :	12.98	3.80	12.98	3.80	5.00	
	Std. Sapma :	1.74	0.14				

5.3 Duvar Numuneleri Deneysel ve Analitik Sonuçları

5.3.1 Duvar Numuneleri Basınç Dayanımı

Tuğla ve harç basınç dayanımına bağlı olan duvar basınç dayanımının (f_k); Eurocode-6'da duvar numuneleri üzerinde yapılacak deneylerle veya deney yapılamadığında Denklem **(5.1)** de verilen amprik bağıntı ile hesaplanacağı belirtilmiştir. Bu bağıntıda; K, (N/mm^2) biriminde yığma yapı sınıfına bağlı bir katsayıyı; f_b, normalize edilmiş tuğla basınç dayanımını; f'_m genel amaçlı harç basınç

dayanımını simgelemektedir. K katsayısı Eurocode-6'da boşluk oranı % 25 ile % 45 arasında olan killi tuğla birimler için 0.45 olarak verilmiştir.

$$f_k = K * f_b^{0.7} * f'_m{}^{0.3} \quad \textbf{(5.1)}$$

TDY'de duvar basınç dayanımının deneylerden hesaplanan basınç dayanımının 0.25 katının duvar basınç emniyet gerilmesi olduğu belirtilmiş. Yine standartta eğer duvar parçasının deneyi yapılmamışsa duvarda kullanılan bloğun deneysel olarak elde edilen serbest basınç dayanımının 0.50'si duvar basınç dayanımı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.3 de duvar numuneleri basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar ve yukarıda verilen amprik formüller ile minimum sınır değerler göz önüne alınarak belirlenen analitik sonuçlar karşılaştırılmalı verilmiştir. Kullanılan tuğlaların Eurocode 6'ya göre güvenli tarafta olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3 : Basınç numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerler.

			Deneysel Sonuçlar		Eurocode-6		DBYBHY	
		Numune tipi	DY	DD	DY	DD	DY	DD
f_k (MPa)	Ortalama :	A	5.01	4.10	4.04	1.71	2.50	
	Std. Sapma :		0.12	0.30				
	Ortalama :	C	4.60	2.40				
	Std. Sapma :		0.16	0.26				

5.3.2 Duvar Numuneleri Kayma Dayanımı

Duvar kayma dayanımının (f_{vk}); Eurocode-6'da duvar numuneleri üzerinde yapılacak deneylerle veya deney yapılamadığında Denklem **(5.2)** de verilen amprik bağıntı ile hesaplanacağı belirtilmiştir. Yapmış olduğumuz güçlendirilmemiş duvar kayma deneylerinden elde edilen sonuçlar numune kayma dayanımı fvk olarak alınmış fakat bu değerler tuğla birim elemanlarının sıfır basınç dayanımı ve çeşitli basınç dayanım düzeyindeki deneyler yapılmadığı için analitik değerlerle karşılaştırması yapılamamıştır.

$$fvk = fvko + 0.4\sigma \quad \textbf{(5.2)}$$

TDY'de ise duvar kayma gerilmesinin Denklem **(5.3)** de verilen amprik bağıntı ile hesaplanacağı belirtilmiştir. Bu denklemde; τ_o, sıfır basınç gerilmesi altında duvar çatlama gerilmesini; σ, duvar düşey gerilmesini simgelemektedir. μ, ise sürtünme

katsayısıdır ve TDY'de sürtünme katsayısının 0.5, ASTM C 1531-03'de [20] ise 0.3 ile 1.6 arasında bir değer olarak alınabileceği belirtilmiştir.

$$\tau = \tau_o + \mu\sigma \quad \textbf{(5.3)}$$

Mevcut standart ve yönetmeliklere göre duvar numunelerinin kesme dayanımı (V), betonarme elemanlara benzer olarak, iki bileşenin katkısının toplamından oluşmaktadır. Bu bileşenlerden ilki; duvar birimin katkısı (V_m) diğeri de kesme donatısının katkısıdır (V_s). CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş duvar numunelerinde ise CFRP'nin kesme dayanımına katkısı da (V_{frp}) göz önüne alınarak numunelerin kesme dayanımı güçlendirilmiş numuneler için Denklem **(5.4)** de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$V = V_m + V_s + V_{frp} \quad \textbf{(5.4)}$$

Çalışma kapsamında duvar numunelerinde kesme donatısı kullanılmadığı için numunelerin kesme dayanımı V_m ve V_{frp} toplamından oluşmaktadır.

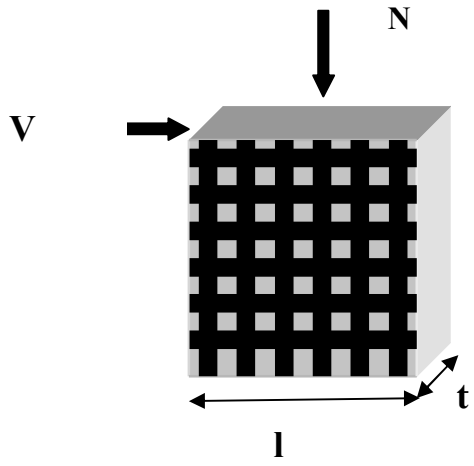
Duvar birimin, numunenin kesme dayanımına katkısı (V_m) Eurocode-6 tarafından tanımlanmış olan Denklem **(5.5)** ile hesaplanmıştır. Bu denklemde; f_{vk}, duvar karakteristik kayma dayanımını; t; duvar kalınlığını; d, etkili derinliği (d=0.8*l olarak alınabilir [19]); γ_m, kagir dolgu için emniyet katsayısını simgelemektedir. Tasarım yapılmadığı için 1 alınmıştır.

$$V_m = \frac{f_{vk} \times t \times d}{\gamma_m} \quad \textbf{(5.5)}$$

LP kompozitlerin, duvarların kesme dayanımına katkısının belirlenmesi için pek çok araştırmacı tarafından yapılmış çalışmalar sonucunda önerilmiş amprik bağıntılar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında lifli polimer kompozitlerin numunelerin kesme dayanımına katkısının (V_m) belirlenebilmesi için Triantafillou [21] tarafından tanımlanmış olan amprik bağıntıdan yararlanılmıştır.

Triantafillou, eksenel yükle beraber düzlem içi kesme kuvvetine maruz LP kompozit ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin davranışının incelenmesi sonucunda lifli polimerin duvar numunelerinin kesme dayanımına katkısının belirlenebilmesi için Denklem **(5.6)** yı önermiştir, Şekil 5.1. Bu denklemde; ρ_h, LP kompozit kesit alanının duvar numunesi kesit alanına oranını; E_{frp}, LP kompozit elastisite modülünü; $\varepsilon_{frp,e}$,

LP kompozit etkin şekildeğiştirmesini; l, duvar eleman genişliğini; t; kagir eleman derinliğini simgelemektedir. γ_{frp}, ise LP kompozit için emniyet katsayısını belirtmektedir ve bu katsayı CFRP için 1.15; AFRP için 1.20; GFRP için 1.25 olarak önerilmiştir [21]. Bu çalışmada tasarım yapılmadığı için γ_{frp} =1 olarak alınmıştır.



Şekil 5.1 : LP Kompozit ile Güçlendirilmiş Duvar Numunesi.

Bu çalışmada etkin şekildeğiştirme değeri için iki ayrı durum göz önüne alınmıştır. Birinci olarak, numune orta bölgelerinde lifli polimer kompozit üzerine yatay doğrultuda yerleştirilen şekildeğiştirmeölçerden elde edilen en büyük şekildeğiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen en büyük yatay şekildeğiştirme değerleri Çizelge 5.4 de verilmiştir. İkinci olarak ise Denklem **(5.7)** de LP kompozit etkin şekildeğiştirme değerinin hesaplanması için önerilen [21] amprik bağıntıdan hesaplanan değerler kullanılmıştır, Çizelge 5.5.

Çizelge 5.4 : Kayma numuneleri için şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen en büyük yatay şekildeğiştirme değerleri.

Numune	ε_{frp}
A6-1	0.0056
A6-2	0.0052
A7-1*	0.0025
A7-2	0.0021
C6-1	0.0015
C7-1	0.0006
C7-2	0.0004

* A7-1 numunesinde şekildeğiştirmeölçerlerden sağlıklı okuma alınamadığından yerdeğiştirmeölçerlerden okunan değerler baz alınmıştır.

Çizelge 5.5 : Kayma numuneleri için Denklem (5.7) ile hesaplanan etkin şekildeğiştirme değerleri.

Numune	ε_{frp}
A6-1	0.00514
A6-2	0.00514
A7-1*	0.00203
A7-2	0.00203
C6-1	0.00514
C7-1	0.00198
C7-2	0.00198

$$V_{FRP}=(0.7*\rho_h*E_{FRP}*\varepsilon_{FRP,e}*l*t)/\gamma_{FRP} \quad \textbf{(5.6)}$$

$$\varepsilon_{FRP,e} = 0.0119 - 0.0205(\rho_h E_{FRP}) + 0.0104(\rho_h E_{FRP})^2 \quad \textbf{(5.7)}$$

Yerdeğiştirmeölçerden elde edilen şekildeğiştirme değerleri ile hesaplanan amprik değerler ile deneysel olarak elde edilen numune kesme dayanımları Çizelge 5.6 da karşılaştırılmıştır. Ampirik bağıntı ile hesaplanan değerler karakteristik değerler olduğu için, deneysel değerler ile karşılaştırabilmek için deneysel değerler TS EN 1052-1-c'de [22] önerildiği gibi 1.2 katsayısına bölünmüştür.

Çizelge 5.6 : Kayma numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerler.

Duvar Numunesi	Analitik Kesme Kuvveti (kN)*1	Deneysel Kesme Kuvveti (kN)*2
A6-1	68.35	70.08
A6-2	64.67	68.63
A7-1	63.42	79.94
A7-2	57.45	80.00
C6-1	38.28	70.25
C7-1	38.45	65.67
C7-2	33.49	59.34

*1 Deneyde ölçülen en büyük yatay şekildeğiştirme Denklem (5.6) da $\varepsilon_{FRP,e}$ olarak kullanıldığında elde edilen V_{FRP} kullanıldığında bulunan güçlendirilmiş duvar kesme dayanımı.

*2 Numunelerin başlık bölgeleri basınç gerilmeleri nedeni ile ezildiğinde oluşan en büyük kesme kuvveti.

Duvar numunelerinde şekildeğiştirmeölçerlerin olduğu bölge başlıklarda yoğunlaşan hasar bölgesinin uzağında kalmış ve küçük değerler okumuştur. Bu göçme

mekanizmasına bağlı olarak hesaplanan kesme kuvveti taşıma kapasiteleri deneysel değerlerden düşük çıkmıştır. Özellikle C tipi duvar numunelerinde şekildeğiştirmeölçerler hasar bölgesinden çok uzak kalmış ve daha da küçük değerler hesaplanmıştır.

Denklem **(5.7)** de önerilen LP kompozit etkin şekildeğiştirme değeri ile hesaplanan teorik duvar kesme dayanımları değerleri ile deneysel sonuçlar Çizelge 5.7 de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Kayma numuneleri deneysel sonuçları ve analitik değerleri.

Duvar Numunesi	Analitik Kesme Kuvveti (kN)*1	Deneysel Kesme Kuvveti(kN)*2
A6-1	64.58	70.08
A6-2	64.58	68.63
A7-1	55.66	79.94
A7-2	55.66	80.00
C6-1	83.43	70.25
C7-1	85.22	65.67
C7-2	85.22	59.34

*1 Denklem (5.7) ile hesaplanan $\varepsilon_{FRP,e}$ kullanılarak elde edilen V_{FRP} kullanıldığında bulunan güçlendirilmiş duvar kesme dayanımı.

*2 Numunelerin başlık bölgeleri basınç gerilmeleri nedeni ile ezildiğinde oluşan en büyük kesme kuvveti.

Denklem **(5.7)** de verilen etkin şekildeğiştirme değeri CFRP malzemesinin duvar yüzeyinden ayrılmasından önce çekme kopmasına ulaşması düşünülerek verilen bir bağıntıdır. Bu çalışmada tüm yüzeyin sarılması ile CFRP malzemesinin yüzeyden ayrılması engellenmiştir. Ayrıca hiçbir deneyde orta bölgedeki şekildeğiştirmeölçerlerin olduğu CFRP malzemesinde çekme kopması olmamıştır. Numunelerin göçmesi başlık bölgelerindeki tuğlaların ezilmesi nedeniyle olduğu için, tam olarak kayma göçme türü meydana gelmemiştir. Bu nedenle analitik olarak hesaplanan değerler ile deneysel değerler birbirinden farklı çıkmıştır. Gerçekte de bu tip göçme mekanizmalarının olabileceği hesaba katılmalı ve önerilen ampirik bağıntıların hangi tip göçme mekanizmalarını içerdiği dikkate alınarak hesap yapılmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada; 1/3 ölçekli özel fabrika tuğlalarıyla üretilen 24 adet duvar numunesi denenmiştir. Numuneler 350x350x70 mm^3 ve 500x500x70 mm^3 boyutlarında iki ana gruptan oluşmaktadır. Boyut etkisinin ana parametre olarak belirlendiği bu çalışmada diğer parametreler ise yükleme doğrultusu ve CFRP etkisi olarak belirlenmiştir. 2 adet A grubundan 2 adet de C grubundan toplam dörder adet numune güçlendirilmeden yük deliğe dik ve yük delik yönünde olacak şekilde denenmiştir. 2 adet A grubundan 2 adet de C grubundan toplam 4 adet güçlendirilmemiş numune de diyagonal çekme etkileri altında denenerek numune davranışları belirlenmiş ve boyut etkisi ile değişimi araştırılmıştır. Delik yönünde ve delik dik yönünde denenmek üzere yalnızca A grubu için dörder adet numune tam olarak güçlendirilmiş ve deneye tabi tutularak güçlendirme etkisi incelenmiştir. Diyagonal çekme etkileri altında ise hem A grubundan hem de C grubundan ikişer adet numune şeritler halinde ikişer adet numune ise tam olarak güçlendirilerek denenmiş ve güçlendirme etkisi ile güçlendirme miktarının etkisi araştırılmıştır.

Yapılan deneyler ile elde edilen önemli sonuçlar şunlardır:

- CFRP ile güçlendirilmiş duvarlar ile deprem güçlendirmesi yapılan duvarların betonarme yapılardaki gibi modellenmesi için önemli veriler elde edilmiştir.

- Numunelerin delik yönündeki davranışı ile delik dik yönündeki davranışlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Numunelerin delik yönü davranışında ortalama basınç dayanımı, deformasyon yeteneği ve enerji yutma özelliklerinin delik dik yöndeki davranıştan daha iyi olduğu görülmüştür.

- Numunelerin delik yönündeki göçme şeklinin delik dik yöndeki göçme şeklinden farklı olduğu görülmüştür. Buna delik yönünde kesitin sürekli olmasının delik dik yönde ise süreksiz olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

- Boyut artışı ile duvar numunelerinin ortalama basınç dayanımının ve kayma dayanımının azaldığı görülmüştür.

- Boyut artışının numunenin deformasyon ve enerji yutma yeteneği üzerindeki etkisi kayma numunelerinde basınç numunelerine oranla daha etkili olmuş ve büyük bir azalış görülmüştür.

- Duvar numunelerinin delik dik ve delik yönü davranışında boyut etkisinin numune göçme şekillerini değiştirmediği gözlemlenmiştir.

- Boyut etkisinin güçlendirilmiş kayma numuneleri üzerindeki etkisinin güçlendirilmemiş numunelerdeki etkisi ile benzer olduğu görülmüştür.

- Boyut artışı güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kayma numunelerinin göçme şekillerini değiştirmediği görülmüştür.

- Güçlendirme ile numunelerin davranışı önemli ölçüde gelişmiştir. Bu iyileşmenin numunelerin basınç dayanımı, kayma dayanımı, deformasyon yeteneği ve enerji yutma özelliği üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

- Numunelerin şekildeğiştirme ve enerji yutma özelliği üzerindeki artışta en iyi sonucu numunenin delik dik yöndeki davranışta tam sargı ile güçlendirilen numunelerde meydana geldiği görülmüştür.

- Güçlendirme ile numunelerin delik dik yöndeki davranışlarında sünekçe bir davranış elde edildiği görülmüştür. Bu durum bu tür güçlendirmenin yapının deprem sırasındaki performansını iyileştireceği düşünülmektedir.

- Güçlendirmenin basınç dayanımında neden olduğu artış delik yönündeki davranışta delik dik yöndeki artıştan daha fazla olduğu görülmüştür.

- Güçlendirme ile numunenin göçme şeklinin değiştiği görülmüştür.

- CFRP kullanılarak güçlendirilen duvarlarda bu malzemelerin donatı etkisi göstererek duvarın parçalanmasını önlediği ve hasar miktarını azalttığı görülmüştür.

- Güçlendirilmiş numunelerde başlık bölgelerine yakın yerlerdeki tuğlaların ezildiği ve göçmenin CFRP malzemesinin yırtılması ile meydana geldiği görülmüştür.

- Güçlendirilmiş numunelerde orta bölgelerdeki CFRP malzemesinde herhangi bir hasar görülmemiş ve buralarda CFRP malzemesinin kapasitelerinden tam olarak yararlanılamadığı gözlemlenmiştir.

- Şeritler halinde yapılan güçlendirmenin kayma dayanımı üzerindeki etkisinin tam sargılama ile yapılan güçlendirmenin etkisine yakın olduğu görülmüştür. Bunun güçlendirme sonrası değişen hasar oluşum şekli nedeniyle CFRP malzemesinin kapasitesinden tam olarak yararlanılamamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

- Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçların yönetmeliklerde belirtilen minimum sınır değerlerin tuğla deliğe dik yönünü hariç üstünde olduğu ve duvar imalatında kullanılan bu malzemelerin belirtilen minimum değerleri sağladığı görülmüştür.

- LP kompozitler ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin analitik kesme dayanımlarının genellikle deneysel sonuçlardan daha düşük, çıktığı görülmüştür.

- Literatürde önerilen bağıntıların göçme moduna (kesme göçmesi, basınç ezilmesi, CFRP malzemenin yüzeyden ayrılması vb.) bağlı olduğu görülmüştür. Numune göçme modu duvar kalitesine, harç kalitesine, kullanılan LP miktarı ve türüne göre değişmektedir. Numunenin göçme modunun, önerilmiş olan bağıntılarda dikkate alınan göçme modu ile farklı olması sonucunda; amprik bağıntılarla elde edilen değerlerin deneysel sonuçlarla çok farklı olabileceği görülmüştür.

- Yığma yapıların güçlendirilmesi için CFRP malzemesinin, uygulama kolaylığı, ek yük getirmemesi ve kesit alanının az olmasının yanı sıra dayanım, enerji yutma özelliği, şekildeğiştirme yeteneği üzerindeki yapmış olduğu artış ve duvarın parçalanmasını önlediği ve hasar miktarını azalttığını göz önüne bulundurularak iyi bir yöntem olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **TS-2510**, 1977. Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[2] **Arun, G.,** 2005. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, ODTÜ, Ankara, 17 Şubat 2005.

[3] **TS-EN 771-1**, 2005. Kâgir Birimler- Özellikler- Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (tuğlalar), *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[4] **Krevaikas**, **T.D. and Triantafillou, T. C.,** 2005. Masonry Confinement with Fiber-Reinforced Polymers. *Journal of Composites for Construction*, vol. 9, no. 2, April, p: 128-135.

[5] **Çılı, F., Karadoğan, H. F., Geçili, G. E.,** 2007. Karbon Liflerle Güçlendirilmiş Bölme Duvarlı Betonrme Çerçeveler, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Tübitak Mag Proje 104M562.

[6] **El-Dakhakhni, W. W., Hamid, A.A., Hakam, Z.H.R., Elgaaly. M.,** 2005. Hazard Mitigation and Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using Composites. *Journal of Composite for Structures*.

[7] **Farooq, Ilyas, M., Ghaffar, A.,** 2006. Technique for Strengthening of Masonry Wall Panels Using Steel Strips, *Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, vol. 7, no. 6, p: 621-638.

[8] **Alcaino, P., Santa-Maria, H.,** 2008. Experimental Response of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading, *M.ASCE. doi: 10.1061/ASCE1090-0268 12:5, p:489-49, Journal of Composites for Construction.*

[9] **Wei, C., Zhou, X. and Wei, L.,** 2007. Experimental Study of Masonry Walls Strengthened with CFRP, *Structural Engineering and Mechanics,* vol. 25, no. 6, p: 675-690.

[10] **ElGawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M.,** 2007. Static Cyclic Reponse Masonry Walls Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers, *Journal of Composites for Construction,* vol. 11, no. 1, p: 50-61.

[5] **Özsayın, B.,** Boşluklu Tuğla Duvarların Lifli Polimerler İle Güçlendirilmesi Ve Davranışta Harç Etkisi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Şubat 2010.

[12] **TS-EN 772-1**, 2002. Kâgir Birimler- Deney Metotları- Bölüm 1: Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[13] **TS-EN 772-16**, 2002. Kâgir Birimler- Deney Metotları- Bölüm 16: Boyutların Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[14] **EN 1998-1. Eurocode 8.,** 2004. Design of Structures for Earthquake Resistance- Part1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings.

[15] **TS 500**, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[16] **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik,** 2007. Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü.

[17] **H.H. Knutsson and J. Nielsen,** 1995. On the modulus of Elasticity for Masonry, *Masonry International*, Vol. 9, no. 2.

[18] **ASTM E 519 – 02,** 2002. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages, *An American National Standard.*

[19] **EN 1996-1-1. Eurocode 6.,** 1996. Design of Masonry Structures.

[20] **ASTM C 1531 – 03,** 2003. Standard test method for in situ measurement of masonry mortar joint shear strength index. *An American National Standard.*

[21] **Triantafillou, Thanasis C.,** 1998. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. *Journal of Composites and Construction*, Vol. 2, No. 2, pp. 96-104.

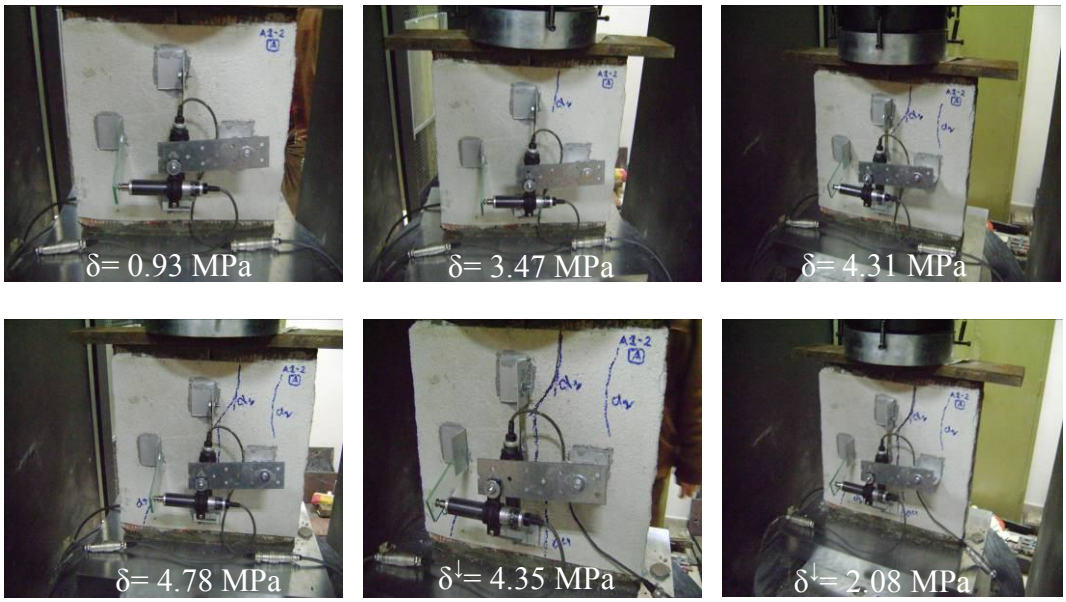
[22] **TS-EN 1052-1-c**, 2000. Kâgir - Deney Metotları- Bölüm 1: Basınç Dayanımı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

EKLER

EK A.1 : Şekiller

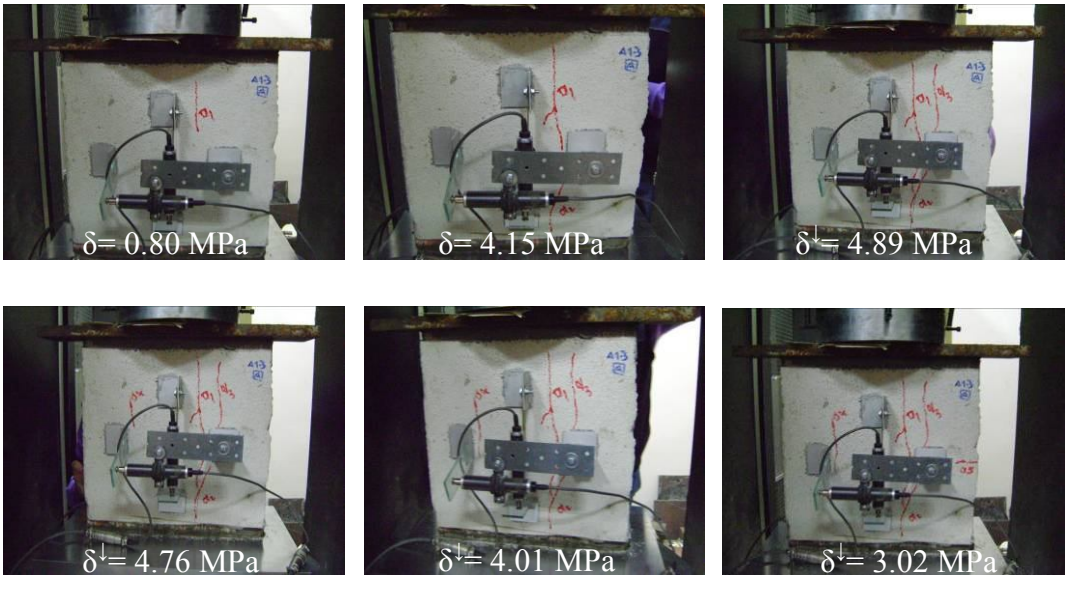
EK A.1

Şekil A.1 : A1-1 numunesi hasar gelişimi.



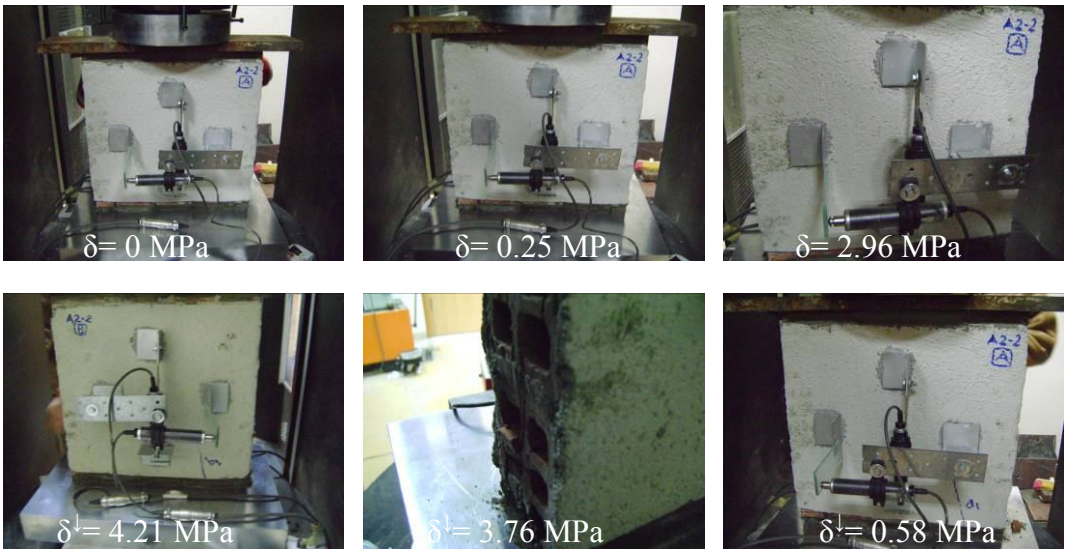
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.2 : A1-2 numunesi hasar gelişimi.



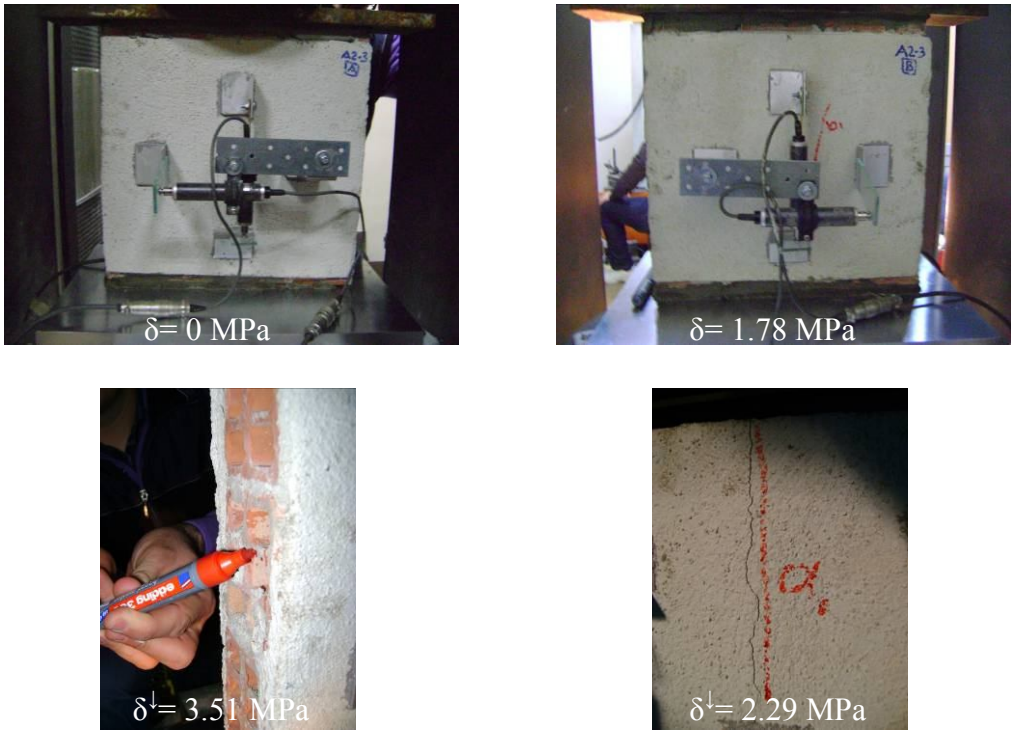
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.3 : A2-1 numunesi hasar gelişimi



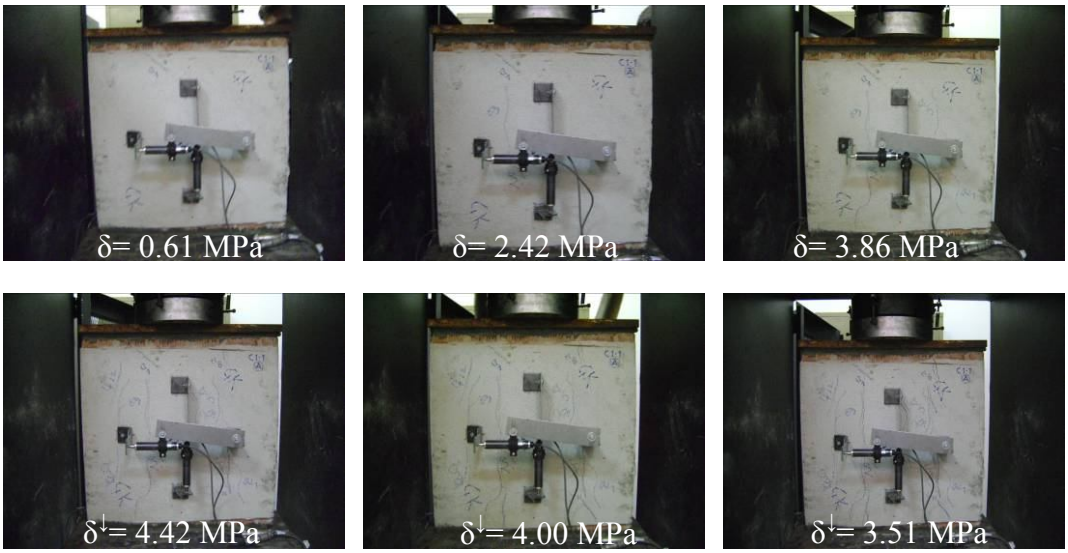
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.4 : A2-2 numunesi hasar gelişimi



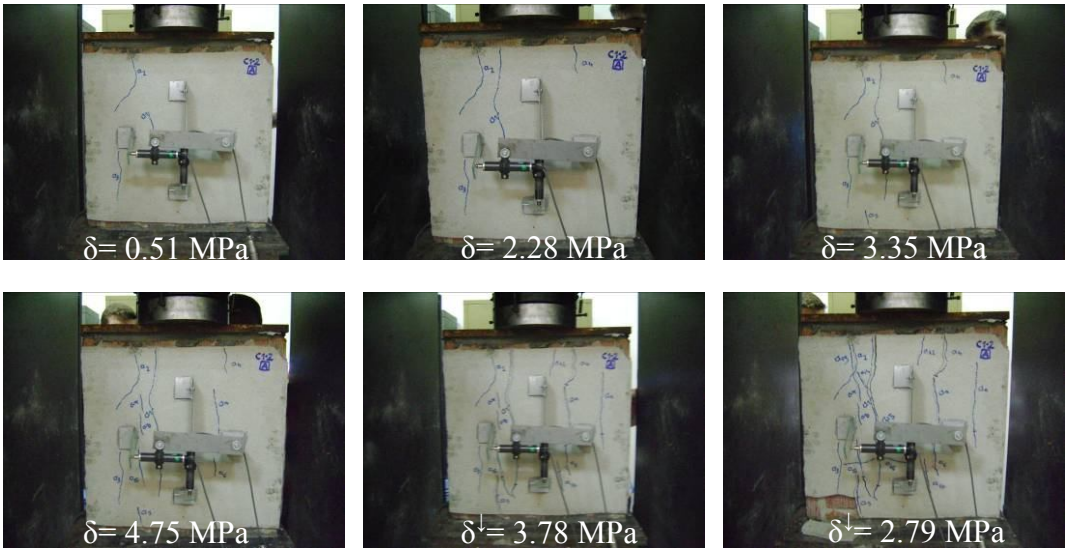
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.5 : C1-1 numunesi hasar gelişimi.



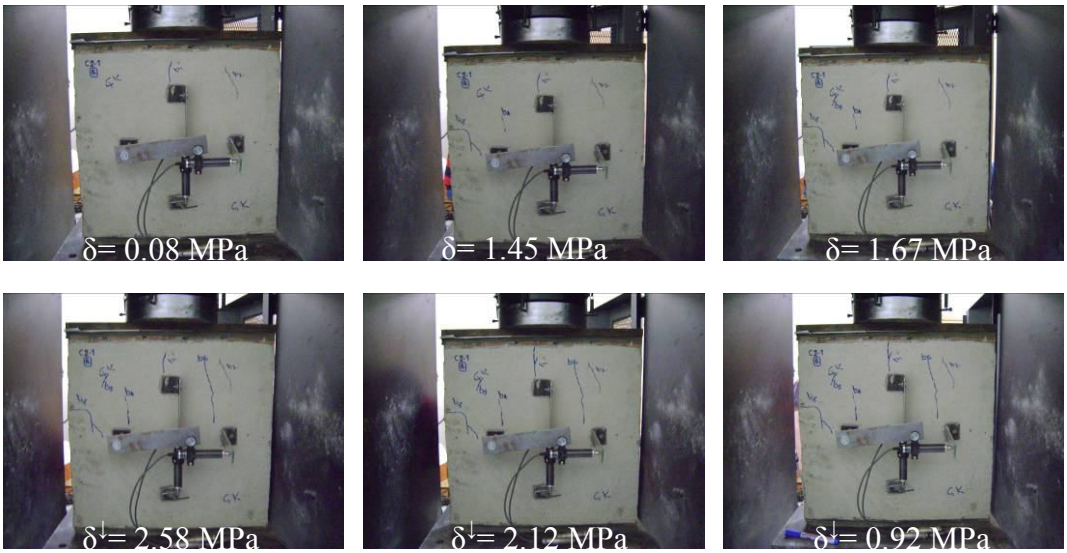
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.6 : C1-2 numunesi hasar gelişimi.



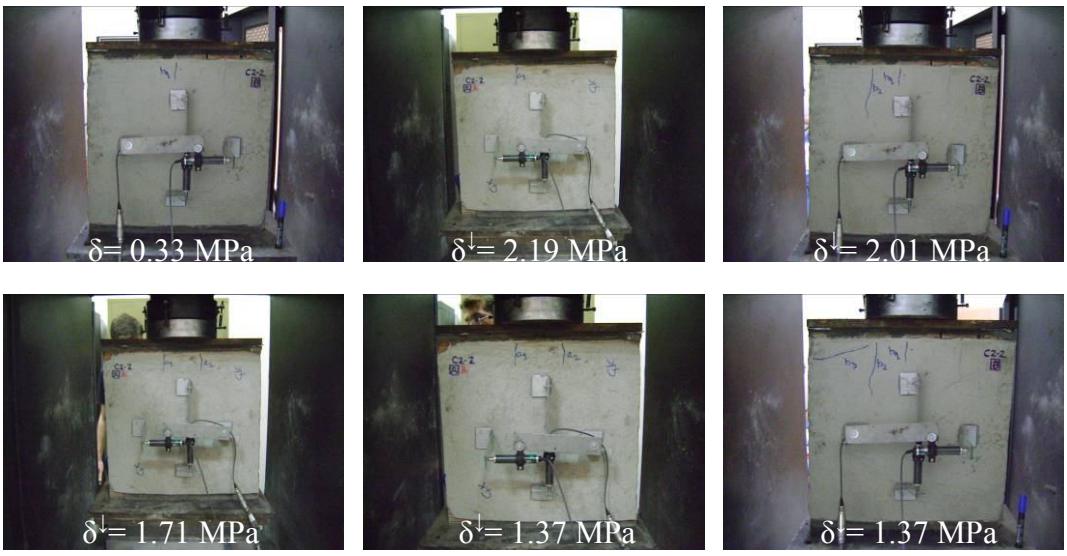
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.7 : C2-1 numunesi hasar gelişimi.



* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.8 : C2-2 numunesi hasar gelişimi.



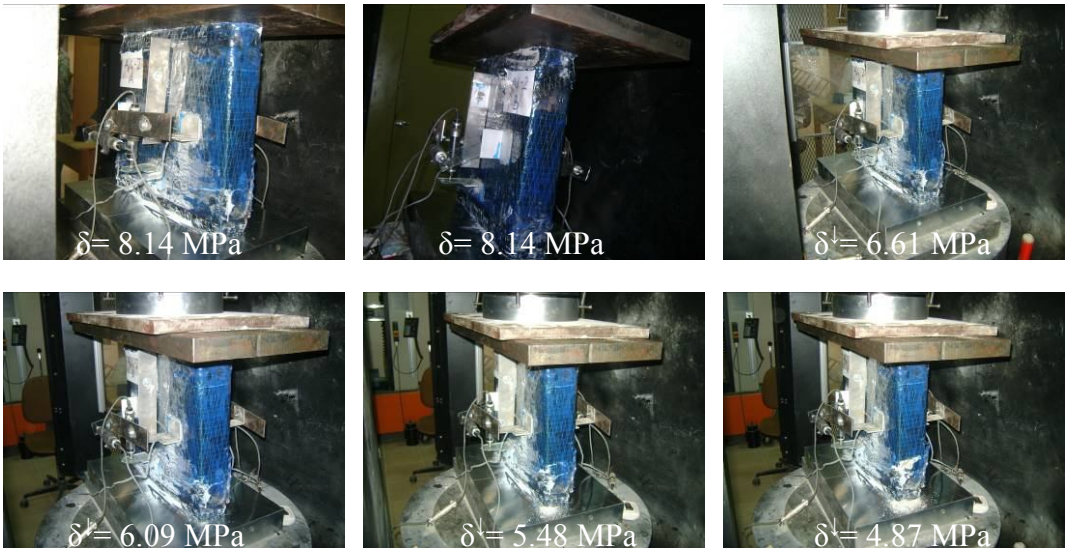
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.9 : A4-1 numunesi hasar gelişimi.



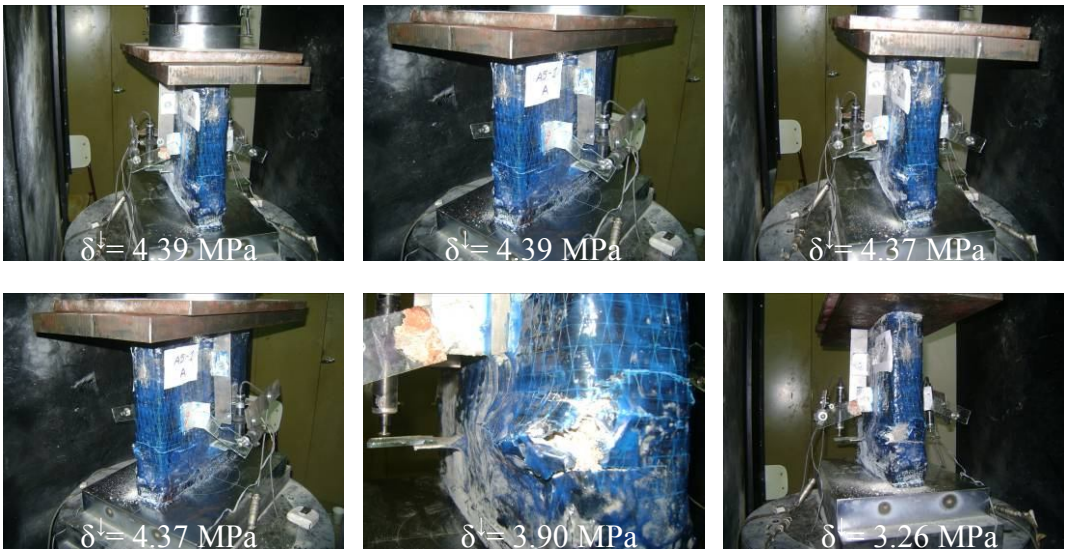
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.10 : A4-2 numunesi hasar gelişimi.



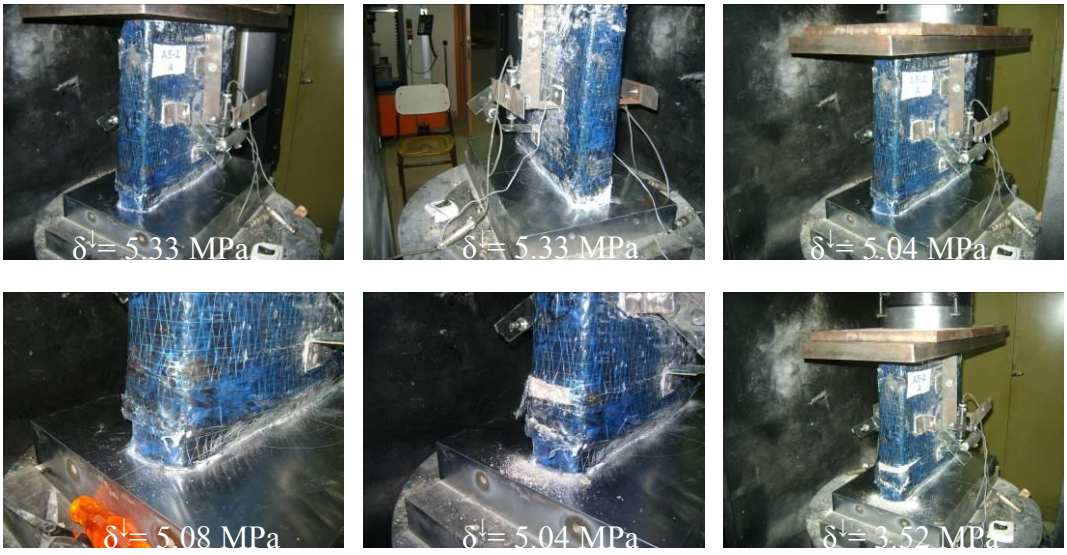
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.11 : A5-1 numunesi hasar gelişimi.



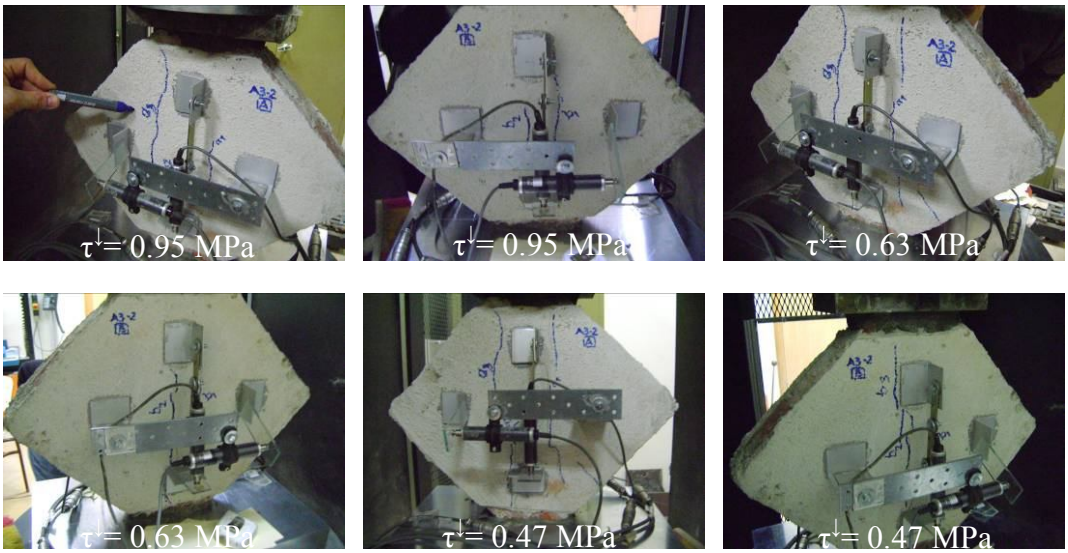
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.12 : A5-2 numunesi hasar gelişimi.



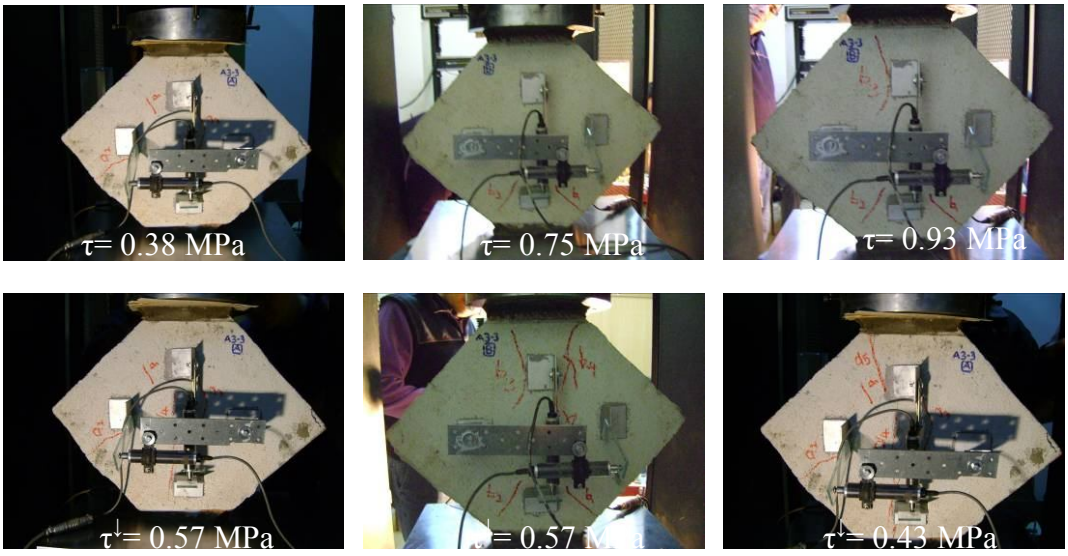
* $\delta^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.13 : A3-1 numunesi hasar gelişimi.



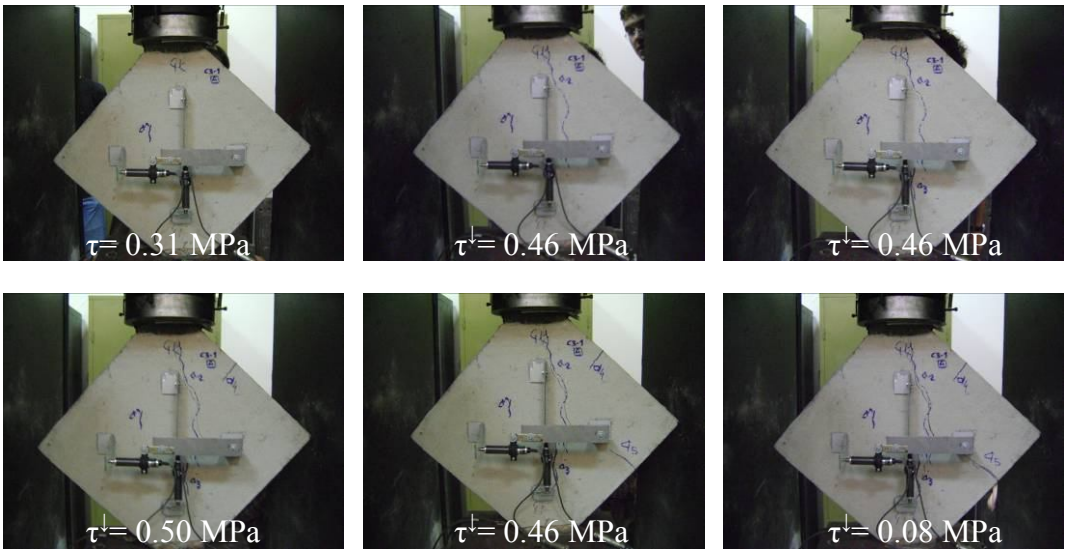
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.14 : A3-2 numunesi hasar gelişimi.



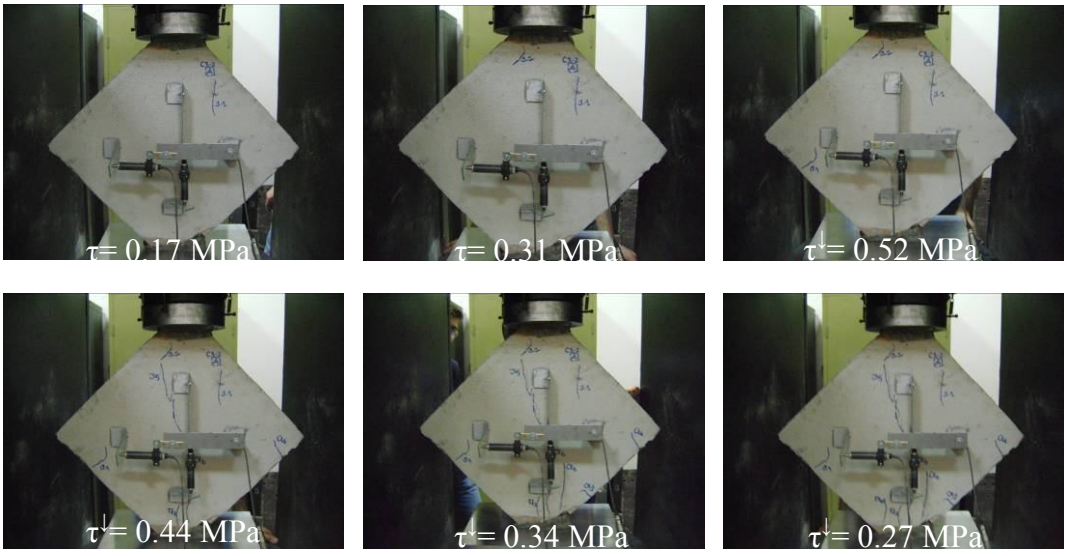
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.15 : C3-1 numunesi hasar gelişimi.



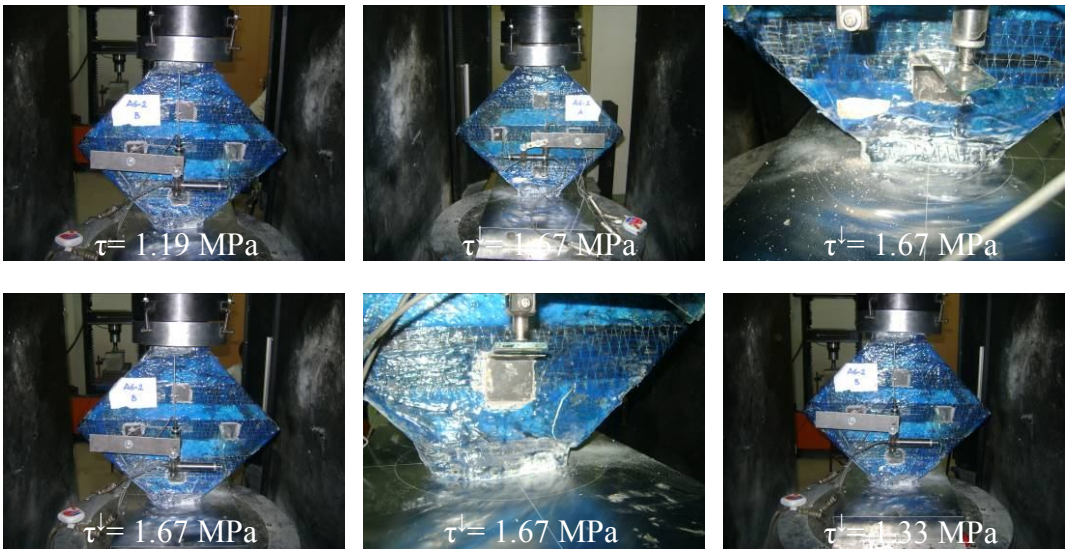
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.16 : C3-2 numunesi hasar gelişimi.



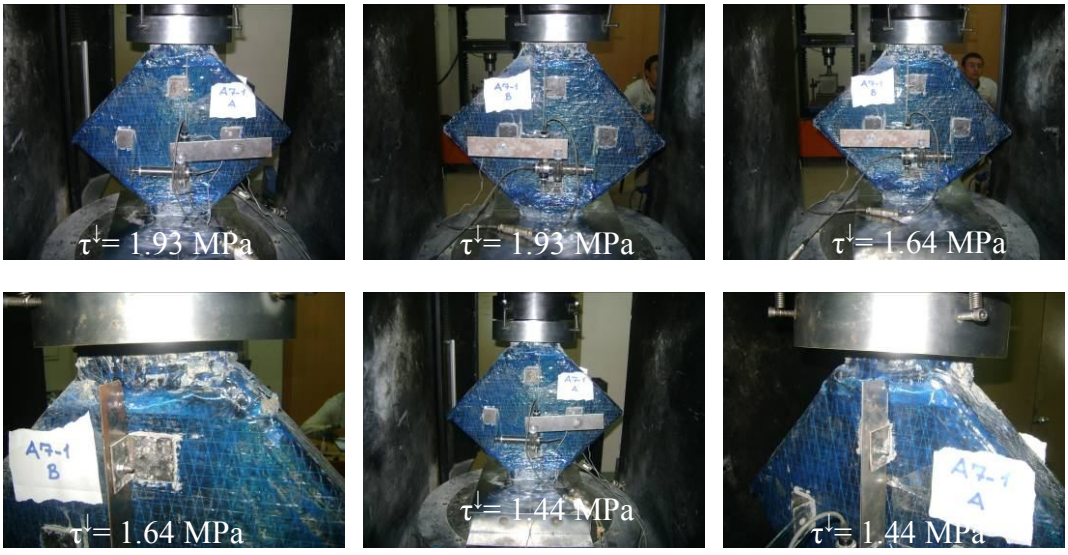
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.17 : A6-2 numunesi hasar gelişimi



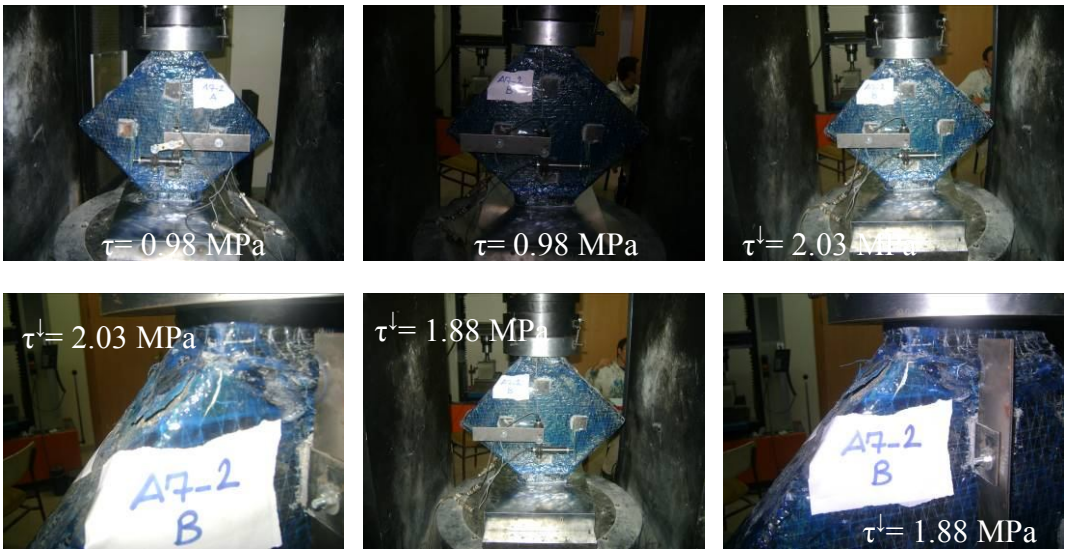
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.18 : A7-1 numunesi hasar gelişimi



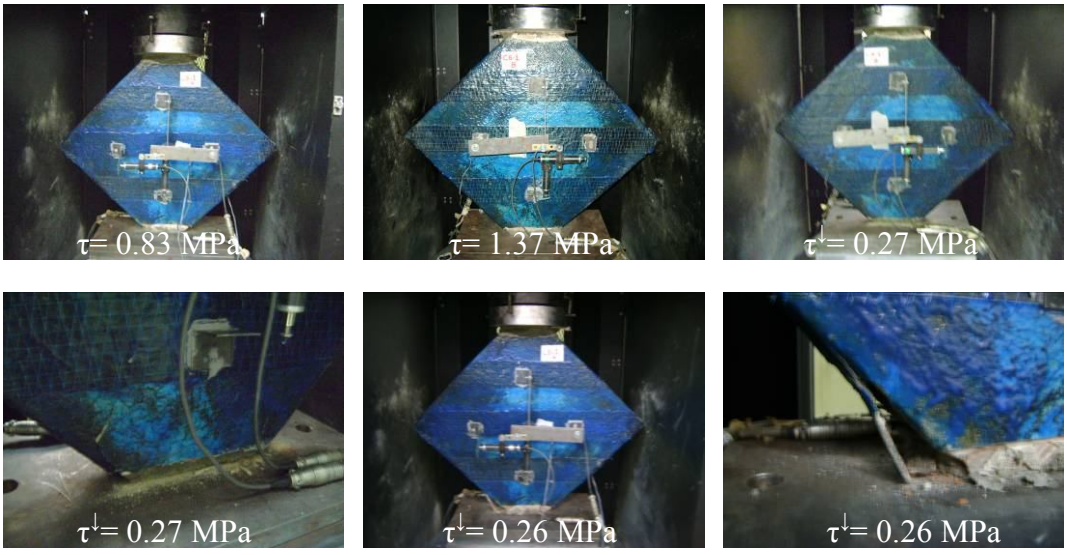
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.19 : A7-2 numunesi hasar gelişimi.



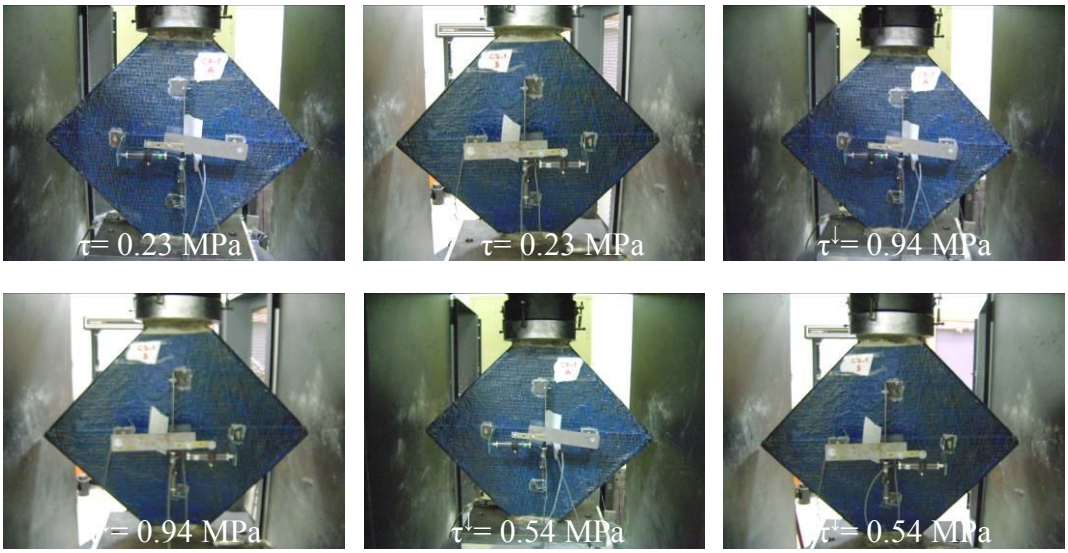
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.20 : C6-1 numunesi hasar gelişimi.



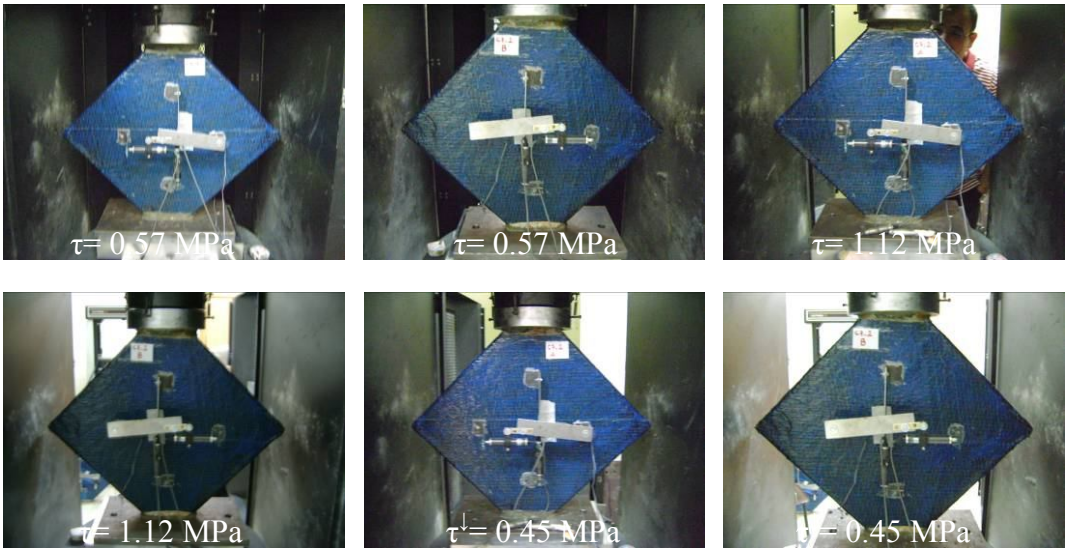
* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.21 : C7-1 numunesi hasar gelişimi.



* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

Şekil A.22 : C7-2 numunesi hasar gelişimi.



* $\tau^{\downarrow}$ gerilmenin azalan kolda olduğunu belirtmek için kullanılmıştır .

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Emre Yılmaz

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara , 30.08.1985

Adres:

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi