

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLI
BETONARME ÇERÇEVELER**

**DOKTORA TEZİ
Gülseren EROL**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

MAYIS 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLI
BETONARME ÇERÇEVELER**

**DOKTORA TEZİ
Gülseren EROL
(501012013)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Şubat 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Mayıs 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. H. Faruk KARADOĞAN (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Feridun ÇILI (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sumru PALA (İTÜ)
Prof. Dr. Gülay ALTAY (BÜ)
Prof. Dr. Özal YÜZÜGÜLLÜ (BÜ)
Prof. Dr. Muzaffer ELMAS (SÜ)
Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)**

MAYIS 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlanma fırsatını bana veren, sabır ve hoşgörü gösteren danışmanlarım sayın Prof.Dr. H. Faruk KARADOĞAN ve sayın Prof.Dr. Feridun ÇILI'ya en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

University of California, Irvine'da bulunduğum süre içerisinde yardımlarını esirgemeyen Prof.Dr. Ayman MOSALLAM'a öğrettikleri ve sunduğu fırsatlar için teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışma yapmayı kendisinden öğrendiğim Yrd.Doç.Dr. Ercan YÜKSEL'e, doktora tezim sırasındaki katkılarından dolayı teşekkür etmek isterim. Deneysel çalışmalarım sırasında danıştığım konularda bana vakit ayıran Doç.Dr. Alper İLKİ'ye teşekkürü borç bilirim. Ayrıca İTÜ Yapı ve Deprem Laboratuvarı çalışanları ve araştırma görevlilerine deneysel çalışmalarımda yardımları için sonsuz teşekkür ederim.

Bugüne kadar hep yanımda olan, maddi ve manevi bana destek veren aileme sonsuz minnetlerimi sunarım. Doktora çalışmam sırasında beni destekleyen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların bir kısmına 104M562 no'lu araştırma projesi ile katkıda bulunan ve ayrıca doktora çalışmam sırasında sağladıkları 9 aylık burs ile çalışmalarımı University of California, Irvine'da devam etme imkanı veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalara sağladıkları destekten dolayı Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve yardımları için İdil YURDAKUL PEKER'e teşekkür ederim.

Şubat 2009

Gülseren EROL

İnşaat Y. Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	V
İÇİNDEKİLER	Vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xxiii
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY	xxxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu	1
1.2 FRP ile Güçlendirme	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
1.4 Çalışmanın Düzeni	6
2. DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	9
2.1 FRP ile Güçlendirilmiş Taşıyıcı Yığma Duvarlar	9
2.2 FRP ile Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlar	13
2.3 Dolgu Duvarların Modellenmesi.....	23
2.4 Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi	26
2.5 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007	28
2.5.1 “Bilgilendirme eki 7F.3 : Dolgu duvarların lifli polimerler ile güçlendirilmesi” ve değerlendirilmesi	30
3. KÜÇÜK BOYUTLU NUMUNE DENEYLERİ	35
3.1 Malzeme Özellikleri	35
3.1.1 Tuğla malzeme özellikleri.....	35
3.1.2 Harç ve sıva malzeme özellikleri	36
3.1.3 Beton ve çelik malzeme özellikleri	37
3.1.4 FRP malzeme özellikleri	39
3.2 Basit Kayma Deneyleri	41
3.2.1 Dolgu duvar numuneleri	43
3.2.1.1 Birinci grup dolgu duvar numuneleri	43
3.2.1.2 İkinci grup dolgu duvar numuneleri.....	46
3.2.1.3 Üçüncü grup dolgu duvar numuneleri.....	47
3.2.2 Deney yükleme ve ölçüm düzeneği	52
3.2.3 Deney sonuçları.....	53
3.2.4 Dolgu duvar numunelerinin göçme şekilleri.....	60
3.2.5 Deney sonuçlarının değerlendirmesi.....	63
4. TEK KATLI-TEK AÇIKLIKLI BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ	71
4.1 Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numuneleri	71
4.1.1 N2 numunesi	75
4.1.2 N3 numunesi	78

4.1.3 N4 numunesi	80
4.2 Deney Yükleme ve Ölçüm Düzenegi	80
4.3 Deney Sonuçları	83
4.3.1 Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri	83
4.3.2 Referans numunelerin davranışları ve göçme şekilleri	87
4.3.2.1 Dolgu duvarsız numune 1	87
4.3.2.2 Dolgu duvarsız numune 2	87
4.3.2.3 Numune N1	90
4.3.3 Numune N2'nin davranışı ve göçme şekli	92
4.3.4 Numune N3'ün davranışı ve göçme şekli	96
4.3.5 Numune N4'ün davranışı ve göçme şekli	104
4.3.6 Deneysel gözlemler	108
4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	110
4.4.1 En büyük yatay yük değerleri, önerilen göçme yükü ve göçme yükü	111
4.4.2 Başlangıç rijitliği, etkin rijitlik ve tepe noktalarına karşı gelen rijitlik ...	116
4.4.3 Önerilen eşdeğer yerdeğiştirme sünekliği	119
4.4.4 Kuvvet azaltma çarpanı	122
4.4.5 Enerji yutma kapasitesi	124
4.4.6 Çevrimsel sönüm değerleri	124
4.4.7 Numunelerin davranışı	126
4.4.7.1 Güçlendirilmiş numunelerin davranışı	126
4.4.7.2 Dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin davranışı	128
4.4.7.3 Güçlendirilmiş dolgu duvarın davranışı	129
4.4.8 Hasar durumu çizelgesi	129
5. İKİ KATLI-TEK AÇIKLIKLI BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ	133
5.1 İki Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numuneleri	133
5.2 Numunelerin Güçlendirilme Aşamaları	135
5.3 Deney Yükleme ve Ölçüm Düzenegi	140
5.4 Deney Sonuçları	143
5.4.1 Numuneler BC-0 ve IC-0	143
5.4.2 Numuneler BL-0 ve IL-0	144
5.4.3 Numuneler IC-C1 ve IL-C1	145
5.4.4 Numuneler IC-C2 ve IL-C2	149
5.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	153
6. TEORİK ÇALIŞMALAR.....	157
6.1 DBYBHY (2007)'e Göre Yapısal Modelleme	157
6.1.1 Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarsız betonarme çerçeve numunesi yapısal modeli	158
6.1.2 Dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı referans numunelerin modelleri ve analitik sonuçları	164
6.1.2.1 Dolgu duvarsız referans numune 2	164
6.1.2.2 Dolgu duvarlı numune N1	165
6.1.3 Güçlendirilmiş numunelerin modelleri ve analitik sonuçları	170
6.1.4 Analitik sonuçların değerlendirilmesi	173
6.2 Kullanılan Yapısal Model	178
6.2.1 Güçlendirilmiş dolgu duvar modeli	178
6.2.1.1 Güçlendirilmiş dolgu duvarların göçme şekilleri	179
6.2.1.2 Eşdeğer basınç çubuğu	182
6.2.1.3 Eşdeğer çekme çubuğu	188

6.2.2 Analitik sonuçların değerlendirilmesi	190
7. SONUÇLAR	199
7.1 Deneysel Çalışmanın Özeti ve Sonuçları	199
7.2 Teorik Çalışmanın Özeti ve Sonuçları	207
7.3 Genel Sonuçlar ve Tartışmalar	211
KAYNAKLAR	213
EKLER.....	219
Ek A : Basit Kayma Deneyi Numunelerinin ve Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numunelerinin Hasar ve Göçme Şekilleri	221
Ek B : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Deneyleri Hasar Durumu Çizelgesi	245
Ek C : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numunelerinin Göçme Şekline Göre Yatay Yük Taşıma Kapasitesi Sınır Değerleri	251

KISALTMALAR

AFRP	: Aramid lifli polimer kompozit
CFRP	: Karbon lifli polimer kompozit
DBYBHY	: Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik
FRP	: Lifli polimer kompozit
GÇ	: Göçme sınırı
GFRP	: Cam lifli polimer kompozit
GV	: Güvenlik sınırı
LP	: Lifli polimer
LS	: Güvenlik sınırı, (FEMA 356, 2000)
LVDT	: Doğrusal yerdeğiştirme ölçer
MN	: Minimum hasar sınırı
SS	: Sıvalı dolgu duvar numunesi
W30/15/10	: Dolgu duvar numunelerinde CFRP uygulaması 300/150/100 mm genişliğinde

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çizelge 7.5 - Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranları (r_s) ve görelî kat ötemeleri oranları, (DBYBHY, 2007).	29
Çizelge 2.2 : Çeşitli tuğla türlerinden yapılan dolgu duvarları için önerilen malzeme özellikleri, (DBYBHY, 2007).	33
Çizelge 3.1 : Basit kayma deneyi numunelerinin harç ve sıva malzeme özellikleri.	38
Çizelge 3.2 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvar harç ve sıva malzeme özellikleri.	38
Çizelge 3.3 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvar harç ve sıva malzeme özellikleri.	39
Çizelge 3.4 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin beton malzeme özellikleri.	39
Çizelge 3.5 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin beton malzeme özellikleri.	40
Çizelge 3.6 : Betonarme çerçeve numuneleri donatılarının malzeme özellikleri.	40
Çizelge 3.7 : FRP malzeme özellikleri.	42
Çizelge 3.8 : Epoksi esaslı reçinenin malzeme özellikleri.	42
Çizelge 3.9 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin özellikleri.	51
Çizelge 3.10 : Dolgu duvar numunelerinin deney sonuçları.	65
Çizelge 3.11 : Dolgu duvar numuneleri iki doğrulu olarak idealleştirme değerleri. .	67
Çizelge 4.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi görelî kat ötelemesi oranı (δ/H) değerleri.	83
Çizelge 4.2 : Tek katlı-tek açıklıklı çerçeve deneylerinin sonuçları.	112
Çizelge 4.2 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı çerçeve deneylerinin sonuçları.	113
Çizelge 4.3 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	131
Çizelge 4.3 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	132
Çizelge 5.1 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerin özellikleri.	135
Çizelge 5.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi toplam kat ötelemesi oranı (δ/H_t) değerleri.	142
Çizelge 6.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri sonuçları ve artımsal itme analizi sonuçlarının karşılaştırılması.	163
Çizelge 6.2 : Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri yapısal modellerinin eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının “DBYBHY” (2007)’ye göre hesaplanan değerleri.	169
Çizelge 6.3 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin artımsal itme analizi sonuçlarının irdelenmesi.	176
Çizelge 6.4 : Yapısal modelde dolgu duvarları temsil eden eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının özellikleri.	186

Çizelge 6.5 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri analitik sonuçlarının karşılaştırılması.	191
Çizelge B.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	245
Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	246
Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	247
Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	248
Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.	249

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışı, (FEMA 356, 2000).	5
Şekil 2.1 : FRP ile güçlendirilmiş yığma duvarlar için önerilen yapısal model, (Jai ve diğ., 2000b).	12
Şekil 2.2 : CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).	16
Şekil 2.3 : Ön çalışma deney sonuçları, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).	17
Şekil 2.4 : CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesinin göçme şekli, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).	17
Şekil 2.5 : Çelik plakalar ile güçlendirilmiş yığma duvar numunesi ve göçme şekli, (Taghdi ve diğ., 2000).	28
Şekil 2.6 : Şekil 7F.2, (DBYBHY, 2007).	31
Şekil 2.7 : Yapısal modelinin itme analizinde, köşegen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları olarak idealleştirilmiş güçlendirilmiş dolgu duvarın elasto-plastik davranışı.	34
Şekil 3.1 : Yatay delikli fabrika tuğlası.	35
Şekil 3.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri donatısının gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.	41
Şekil 3.3 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunesi boyutları.	41
Şekil 3.4 : Birinci grupta yeralan sıvasız (a), sıvalı (b), harç katmanına CFRP şerit yerleştirilmiş (c), tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış (d), 300 mm genişliğinde CFRP ile güçlendirilmiş sıvasız (e) ve sıvalı (f) dolgu duvar numunelerinin ve kesitlerinin (g) şematik gösterimi.	44
Şekil 3.5 : Birinci grupta yeralan sıvasız (a), sıvalı (b), tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış sıvasız (c), 300 mm genişliğinde CFRP ile güçlendirilmiş (d) ve tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış sıvalı dolgu duvar numuneleri.	45
Şekil 3.6 : İkinci grupta yeralan 300 mm (a, b) 150 mm (c, d) ve 100 mm (e, f) genişliklerinde CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı dolgu duvar numunelerinin şematik gösterimi.	48
Şekil 3.7 : İkinci grup dolgu duvar numunelerinin güçlendirilme aşamaları.	49
Şekil 3.8 : Üçüncü grup dolgu duvar numuneleri S29, S30, S33, S34'ün (a) ve S31, S32'nin (b) şematik gösterimi.	50
Şekil 3.9 : Üçüncü grup dolgu duvar numunesi S29'un ilk güçlendirilmesi.	50
Şekil 3.10 : Basit kayma deneyi düzeneği.	52
Şekil 3.11 : Basit kayma deneyi ölçüm düzeneği.	53
Şekil 3.12 : Birinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.	54
Şekil 3.13 : İkinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.	56
Şekil 3.14 : Birinci ve ikinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.	58
Şekil 3.15 : Üçüncü grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.	58
Şekil 3.16 : S29, S30 ve S30 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri.	59
Şekil 3.17 : S28, S33 ve S34 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri.	60

Şekil 3.18 : Güçlendirilmemiş sıvasız numune S25'in (a) ve harç tabakalarına CFRP yerleştirilmiş numune S14'ün (b) göçme şekilleri.....	61
Şekil 3.19 : Sıvalı numune S17'nin (a) ve tüm yüzü CFRP kaplı sıvasız numune S7'nin (b) göçme şekilleri.	61
Şekil 3.20 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvalı numune S19'un göçme şekli.....	61
Şekil 3.21 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numuneler S5'in (a), S29'un (b) ve S33'ün (c) göçme şekilleri.	62
Şekil 3.22: 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş ankrajlı sıvalı numune S21'in göçme şekli.	62
Şekil 3.23 : 100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S27'nin (a) ve 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S28'in (b) göçme şekilleri.	63
Şekil 3.24 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin yük taşıma kapasiteleri.....	64
Şekil 3.25 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin başlangıç rijitliği değerleri.....	66
Şekil 3.26 : Dolgu duvar numunelerinin $P-\Delta$ eğrilerinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesinin şematik gösterimi.	66
Şekil 3.27 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin eşdeğer elastisite modülü (E_e) değerleri.	69
Şekil. 4.1 : Tek katlı tek açıklıklı deney numuneleri.	72
Şekil. 4.1 (devam) : Tek katlı tek açıklıklı deney numuneleri.	73
Şekil 4.2 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi boyutları ve donatı detayları.	74
Şekil 4.3 : N2 (a), N3 (b) ve N4 (c) numuneleri.	76
Şekil 4.4 : N2 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.	77
Şekil 4.5 : N3 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.	79
Şekil 4.6 : N4 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.	81
Şekil 4.7 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin yükleme düzeneği.	82
Şekil 4.8 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin deney düzeneği.	82
Şekil 4.9 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numenelerine uygulanan yerdeğiştirme değerleri.....	82
Şekil 4.10 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi ölçüm sistemi.	84
Şekil 4.11 : N2 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.	84
Şekil 4.12 : N3 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.	85
Şekil 4.13 : N4 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.	85
Şekil 4.14 : N2, N3 ve N4 numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.	86
Şekil 4.15 : Tüm numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.	86
Şekil 4.16 : 'Dolgu Duvarsız Numune 1'in ± 3.5 mm (a), ± 4.2 mm (b) ve ± 10.5 mm (c) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.	88
Şekil 4.17 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 10.5 mm (a) ve ± 14 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.	89
Şekil 4.18 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 28 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	89
Şekil 4.19 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 42 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	90
Şekil 4.20 : Numune N1'in ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.....	91
Şekil 4.21 : Numune N1'in ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	91

Şekil 4.22 : Numune N1'in ± 11 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	92
Şekil 4.23 : Numune N2'nin ± 2.8 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	93
Şekil 4.24 : Numune N2'nin ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	93
Şekil 4.25 : Numune N2'nin ± 4.9 mm(a) ve ± 5.6 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.	94
Şekil 4.26 : Numune N2'nin ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu....	95
Şekil 4.27 : Numune N2'de $+11.64$ mm yerdeğiştirme değerinde dolgu duvar üzerindeki CFRP'nin kopması.....	95
Şekil 4.28 : Numune N2'nin ± 14 mm yerdeğiştirme adımının ilk itme (a) ve çekme (b) çevrimlerinde dolgu duvar üzerindeki CFRP'lerin kopması. 95	
Şekil 4.29 : Numune N2'nin $+ 14$ mm yerdeğiştirme adımı üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.	96
Şekil 4.30 : Numune N3'ün ± 1.4 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	97
Şekil 4.31 : Numune N3'ün ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	98
Şekil 4.32 : Numune N3'ün ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	98
Şekil 4.33 : Numune N3'ün ± 7.0 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	99
Şekil 4.34 : Numune N3'ün $+ 10.5$ mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevriminde CFRP'nin kopması ve hasar durumu.	99
Şekil 4.35 : Numune N3'ün -10.5 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde hasar durumu.	100
Şekil 4.36 : Numune N3'ün -10.5 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevriminde hasar durumu.	100
Şekil 4.37 : Numune N3'ün -14 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevrimindeki hasar durumu.	101
Şekil 4.38 : Numune N3'ün $+28$ mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevrimindeki hasar durumu.	102
Şekil 4.39 : Numune N3'ün $+28$ mm yerdeğiştirme adımının ikinci itme çevrimindeki hasar durumu.	102
Şekil 4.40 : Numune N3'ün -28 mm yerdeğiştirme adımının ikinci çekme çevrimindeki hasar durumu.	103
Şekil 4.41 : Numune N3'ün $+28$ mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu (a) ve göçme şekli (b).	103
Şekil 4.42 : Numune N4'ün ± 3.5 mm (a) ve ± 4.9 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumları.	104
Şekil 4.43 : Numune N3'te -5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde CFRP'nin duvardan ayrılması.	105
Şekil 4.44 : Numune N4'ün ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu..	106
Şekil 4.45 : Numune N4'ün $+14$ mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.	107
Şekil 4.46 : Numune N4'ün göçme şekli.....	108
Şekil 4.47 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin en büyük yatay yük değerleri.	111
Şekil 4.48 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesi.....	115
Şekil 4.49 : Tüm numunelerin başlangıç rijitliği değerleri.....	118
Şekil 4.50 : Güçlendirilmiş numunelerinin başlangıç rijitliklerinin, dolgu duvarlı numune N1'in başlangıç rijitliğine oranları.	118
Şekil 4.51 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin 'Tepe noktalarına karşı gelen rijitlik' değerleri.	119

Şekil 4.52 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisinin iki doğru olarak idealleştirilmesi için farklı yaklaşımlar; (a) Priestley ve diğ. (2007), (b) Paulay ve Priestley (1992), (c) Maheri ve Akbari (2003).....	121
Şekil 4.53: Başlangıç rijitlikleri eşit doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinde (a) eşit yerdeğiştirme durumu, (b) eşit enerji durumu ve kuvvet azaltma çarpanı, (<i>R</i>).	123
Şekil 4.54 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin enerji yutma değerleri.....	125
Şekil 4.55 : Çevrimsel sönüm değerleri.....	125
Şekil 4.56 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunelerinin çevrimsel sönüm değerleri.....	126
Şekil 4.57 : Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numunelerin ortalama çevrimsel sönüm değerleri.	127
Şekil 5.1 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin boyutları ve donatı detayları, (ölçüler mm cinsindendir).....	134
Şekil 5.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin güçlendirilme detayları, (ölçüler mm cinsindendir).	136
Şekil 5.3 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerine CFRP uygulaması.....	138
Şekil 5.4 : CFRP ankrajların hazırlanması.....	139
Şekil 5.5 : Kolon düşey donatısında bindirme eki olan iki katlı-tek açıklıklı numunelerde kolon güçlendirme şeması.	139
Şekil 5.6 : Kolon düşey donatısında bindirme eki olan iki katlı-tek açıklıklı numunelerde kolon güçlendirme detayı.....	139
Şekil 5.7 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinde tek yüze CFRP uygulaması ‘C2’.....	140
Şekil 5.8 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yükleme ve ölçüm düzeneği.....	141
Şekil 5.9 : IC-0 ve BC-0’ın yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.	143
Şekil 5.10 : IC-0’ın hasar durumu.	144
Şekil 5.11 : BL-0 ve IL-0’ın yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.	145
Şekil 5.12 : IL-0’ın hasar durumu.....	146
Şekil 5.13 : IC-C1’in yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.....	146
Şekil 5.14 : IC-C1’in hasar durumu.....	147
Şekil 5.15 : IL-C1’in ilk deneyindeki hasar durumu.	148
Şekil 5.16 : IL-C1’in ikinci deneyi yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.....	149
Şekil 5.17 : IL-C1’in ikinci deneyindeki hasar durumu.	149
Şekil 5.18 : IC-C2’nin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.....	150
Şekil 5.19 : IC-C2’nin hasar durumu.....	150
Şekil 5.20 : IL-C2’nin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.....	152
Şekil 5.21 : IL-C2’nin hasar durumu.	152
Şekil 5.22 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.....	153
Şekil 6.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunenin çubuk elemanlarla kurulan yapısal modeli.	158
Şekil 6.2 : Dolgu duvarsız referans numune 2’nin farklı eğilme rijitlikleri kullanılarak kurulmuş yapısal modellerinin analitik sonuçları.....	160
Şekil 6.3 : Yapısal modelde kullanılan plastik mafsalların davranış modeli örneği.....	161

Şekil 6.4 : Dolgu duvarsız referans numune 2'nin deneysel yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinin, farklı plastik mafsalları (L_p) ile hazırlanmış yapısal modellerin analitik sonuçlarıyla karşılaştırılması...	162
Şekil 6.5 : Dolgu duvarsız numune 2'nin deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	164
Şekil 6.6 : İtme analizinde yapı modelinde, köşegen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları olarak idealleştirilmiş güçlendirilmiş dolgu duvarın elasto-plastik davranışı.....	165
Şekil 6.7 : Basit kayma etkisindeki dolgu duvarın şekildeğiştirmesi, (Binici ve diğ., 2007).....	168
Şekil 6.8 : Dolgu duvar eşdeğer basınç çubuğunda en büyük kısalmanın farklı göreceli kat ötelemesi oranlarına göre belirlendiği Numune N1'in analitik eğrileri.....	168
Şekil 6.9 : Dolgu duvarlı numune N1'in deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	170
Şekil 6.10 : Güçlendirilmiş numune N2'nin deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	172
Şekil 6.11 : Güçlendirilmiş numune N3'ün deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	172
Şekil 6.12 : Güçlendirilmiş numune N4'ün deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	173
Şekil 6.13 : Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numunelerin dolgu duvarsız yapısal modellerinin analitik yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	175
Şekil 6.14 : Güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin analitik irdelenmesi.....	177
Şekil 6.15 : Binici ve diğ. (2007) tarafından önerilen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları gerilme-şekildeğiştirme modelleri.....	183
Şekil 6.16 : El-Dakhkhni (2002) (a) ve Atmaca (2008) (b) tarafından önerilen eşdeğer basınç çubuğu gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....	184
Şekil 6.17 : Yapısal modelde kullanılan diyagonal eşdeğer basınç çubuğunun aksel yük-yerdeğiştirme modelleri.....	184
Şekil 6.18 : Numune N2 (a) ve N3'ün (b) eşdeğer basınç çubuğu için iki farklı aksel yük-yerdeğiştirme eğrisi kullanılarak hazırlanmış yapısal modellerin analitik sonuçları.....	189
Şekil 6.19 : Numune N2'nin artımsal itme analizi sonuçları.....	193
Şekil 6.20 : Numune N3'ün artımsal itme analizi sonuçları.....	193
Şekil 6.21 : Numune N4'ün artımsal itme analizi sonuçları.....	194
Şekil 6.22 : Numune N2'nin yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.....	196
Şekil 6.23 : Numune N3'ün yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.....	196
Şekil 6.24 : Numune N4'ün yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.....	197
Şekil A.1 : Güçlendirilmemiş sıvasız numuneler S25 (a), S16 (b) ve S18'in (c) göçme şekilleri.....	221
Şekil A.2 : Harç tabakalarına CFRP yerleştirilmiş numuneler S12 (a), S13 (b) ve S14'ün (c) göçme şekilleri.....	222
Şekil A.3 : 135 mm kalınlığındaki sıvalı numuneler S6 (a), S8 (b) ve 85 mm kalınlığındaki sıvalı numuneler S15 (c), S17'nin (d) göçme şekilleri.....	222
Şekil A.4 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvasız numune S7'nin göçme şekli.....	223
Şekil A.5 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvalı numune S19'un göçme şekli.....	223

Şekil A.6 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı birinci grup numuneleri S1 (a) ve S5'in (b) göçme şekilleri.	224
Şekil A.7 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı üçüncü grup numunesi S29'un göçme şekli.	224
Şekil A.8 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı ikinci grup numunesi S21 (a) ve S21r'nin (b) göçme şekilleri.	225
Şekil A.9 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı ikinci grup numunesi S10'un göçme şekli.	226
Şekil A.10 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı üçüncü grup numuneleri S33 (a) ve S34'ün (b) göçme şekilleri.	227
Şekil A.11 : 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S28'in göçme şekli.	227
Şekil A.12 : 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S24r'nin göçme şekli.	228
Şekil A.13 : 100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numuneler S27 (a) ve S26'nın (b) göçme şekilleri.	228
Şekil A.14 : Dolgu duvarsız numune 1'in çatlak rölövesi.	229
Şekil A.15 : Numune N1'in çatlak rölövesi.	230
Şekil A.16 : 'Dolgu Duvarsız Numune 1'in ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	231
Şekil A.17 : 'Dolgu Duvarsız Numune 1'in ± 4.2 mm ve ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.	232
Şekil A.18 : 'Dolgu Duvarsız Numune 1'in ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	232
Şekil A.19 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 3.5 mm ve ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.	233
Şekil A.20 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	233
Şekil A.21 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 14 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	233
Şekil A.22 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 28 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	234
Şekil A.23 : 'Dolgu Duvarsız Numune 2'nin ± 42 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	234
Şekil A.24 : Numune N1'in ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.	235
Şekil A.25 : Numune N1'in ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.	236
Şekil A.26 : Numune N1'in ± 11 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	236
Şekil A.27 : Numune N2'nin ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	237
Şekil A.28 : Numune N2'nin ± 4.2 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	237
Şekil A.29 : Numune N2'nin ± 7 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	238
Şekil A.30 : Numune N2'de $+11.64$ mm yerdeğiştirme değerinde dolgu duvar üzerindeki CFRP'nin kopması.	239
Şekil A.31 : Numune N3'ün ± 2.8 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	239
Şekil A.32 : Numune N3'ün ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.	240
Şekil A.33 : Numune N3'ün $- 10.5$ mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevriminde hasar durumu.	240

Şekil A.34 : Numune N3'ün 14 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.	241
Şekil A.35 : Numune N3'te +28 mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevrimindeki hasar durumu.	241
Şekil A.36 : Numune N3'te -28 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde hasar durumu.....	242
Şekil A.37 : Numune N4'ün ± 4.2 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	242
Şekil A.38 : Numune N3'ün -5.6 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.....	243
Şekil A.39 : Numune N4'ün deney bitirildikten sonraki hasar durumu.....	243

SEMBOL LİSTESİ

a	: Basınç dayanımı numunesi uzunluğu
A_c	: Kolon brüt kesit alanı
A_{duvar}	: Dolgu duvarın yatay kesit alanı
a_{duvar}	: Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği
A_h	: Yük-yerdeğiştirme çevrim eğrisinde stabil bir tam çevrimin içinde kalan alan
A_n	: Dolgu duvar numunesinin brüt kesit alanı
A_{sw}	: Kayma donatısı toplam kesit alanı
b	: Basınç dayanımı numunesi genişliği
b_b	: Dolgu duvar numunesi basınç bölgesi genişliği
d	: Eşdeğer basınç çubuğu için en büyük kısalma değeri
d_f	: Betonarme kesitte faydalı yükseklik
E_1	: İki doğrulu olarak idealleştirilmiş yük-yerdeğiştirme diyagramında ilk doğrunun eğimi
E_2	: İki doğrulu olarak idealleştirilmiş yük-yerdeğiştirme diyagramında ikinci doğrunun eğimi
E_c	: Çerçeve betonunun elastisite modülü
E_{duvar}	: Dolgu duvarın elastisite modülü
E_e	: Dolgu duvar numunesinin eşdeğer elastisite modülü
E_f	: Lifli polimer şeritin elastisite modülü
$(EI)_0$	: Çatlamamış kesite ait eğilme rijitliği
$(EI)_e$	: Çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitliği
E_{per}	: Tuğlaların deliklerine dik doğrultudaki elastisite modülü
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülü
F	: Dolgu duvar numunesi yaklaşık kesit alanı
f_b	: Eğilme deneyi küpleri basınç dayanımı
F_c	: Dolgu duvar ve çerçeve elemanlarının bütünleşik çalıştığı kabul edilen sistemin kesitinde çekme etkisindeki kolonun çekme dayanımı
f_{ck}	: Harç/sıva/beton basınç dayanımı
f_{ck70}	: 70 mm boyutlarındaki küp numune basınç dayanımı
f_{ck150}	: Standart silindir numune basınç dayanımı
$f_{ck(150x150x150)}$	: 150 mm boyutlarındaki küp numune basınç dayanımı
f_{cm}	: Mevcut beton dayanımı
f_{ctk}	: Harç/sıva/beton çekme dayanımı
f_{duvar}	: Dolgu duvarın basınç dayanımı
F_m	: Yük-yerdeğiştirme çevrim eğrisinde stabil bir tam çevrimdeki en büyük yük
f_{max}	: Donatı çeliğinin kopma dayanımı
f_{me}	: Dolgu duvar eşdeğer basınç dayanımı
f_{yd}	: Hasır donatı çeliğinin tasarım akma dayanımı
f_{yk}	: Donatı çeliğinin akma dayanımı
f_{yw}	: Enine donatı çeliğinin akma dayanımı
G	: Kayma modülü
g_h	: Dolgu duvar numunesinde yatay ölçüm mesafesi

g_v	: Dolgu duvar numunesinde düşey ölçüm mesafesi
H	: Kat yüksekliği
h	: Basınç dayanımı numunesi yüksekliği
h_1	: Eğilme deneyi numunesi çentik yüksekliği
h_{duvar}	: Dolgu duvar yüksekliği
h_k	: Kolon boyu
H_t	: Numune yüksekliği
I_k	: Kolonun atalet momenti
k	: 70 mm boyutundaki küp numunelerin basınç dayanımlarının, 150 mm boyutundaki küp numunelerin basınç dayanımlarına çevirme katsayısı
k_{duvar}	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel rijitliği
K_{etk}^+, K_{etk}^-	: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarındaki etkin rijitlikler
K_{int}	: Başlangıç rijitliği
$K_{int}^{dç}$	: Diyagonal çatlama göçmesine göre hesaplanmış başlangıç rijitliği
K_{int}^{hk}	: Bir harç boyunca kayma göçmesine göre hesaplanmış başlangıç rijitliği
k_t	: Eşdeğer çekme çubuğunun eksenel rijitliği
K_{tm}	: Çevrim eğrisinin tepe noktalarına karşı gelen rijitlik
L	: Eğilme deneyi numunesi mesnetler arasındaki mesafe
l_{duvar}	: Dolgu duvar uzunluğu
L_g	: Dolgu duvar numunesi ölçüm boyu
L_u	: Dolgu duvar ve çerçeve elemanlarının bütünleşik çalıştığı sistemin kesitindeki çekme ve basınç kuvvetleri arasındaki kuvvet kolu
M_{max}	: En büyük moment değeri
M_y	: Kesitin akma eğilme moment değeri
M_u	: Dolgu duvar ve çerçeve elemanlarının bütünleşik çalıştığı Kabul edilen sistemin taşıdığı moment değeri
N_D	: Kolonlarda eksenel basınç kuvveti
P	: Yük
P_{CFRP}	: Dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinde CFRP'nin yatay yüke katkısı
P_{CFRP}^*	: Dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinde CFRP'nin yük taşıma kapasitesi
$P_{dç}^b$	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi diyagonal çatlama göçmesine göre hesaplanmış ve yük yerdeğiştirme eğrisi basitleştirilmiş olan modelin en büyük yatay yük değeri
$P_{dç}^{id}$	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi diyagonal çatlama göçmesine göre hesaplanmış ve yük yerdeğiştirme eğrisi iki doğrulu olan modelin en büyük yatay yük değeri
$P_{duvarsız}^a$	: Dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvarsız yapısal modelinin analitik göçme yükü değeri
P_{G1}^+, P_{G1}	: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında en büyük yatay yükler
P_{G2}^+, P_{G2}	: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında önerilen göçme yükleri
P_{G3}^+, P_{G3}	: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında göçme yükleri
P_{gdd}	: Numunelerin en büyük yatay yük değerlerine güçlendirilmiş dolgu duvarların yaklaşık olarak hesaplanan katkısı
P_{hk}^b	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi bir harç boyunca kayma göçmesine göre hesaplanmış ve yük yerdeğiştirme eğrisi basitleştirilmiş olan modelin en büyük yatay yük değeri

P_{hk}^{id}	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi bir harç boyunca kayma göçmesine göre hesaplanmış ve yük yerdeğiştirme eğrisi iki doğrulu olan modelin en büyük yatay yük değeri
P_{max}	: Eşdeğer basınç/çekme çubuğunun eksenel akma dayanımı
$(P_{max})_{dç}$	: Eşdeğer basınç çubuğunun diyagonal çatlama göçme şekline göre hesaplanan eksenel yük kapasitesi
$(P_{max})_{hk}$	: Eşdeğer basınç çubuğunun bir harç tabakası boyunca kayarak göçme şekline göre hesaplanan eksenel yük kapasitesi
P_{ult}	: Dolgu duvar numunesi yük taşıma kapasitesi
R	: Kuvvet azaltma çarpanı
r	: Güçlendirilmiş dolgu duvarı kesitlerinin etki/kapasite oranı
r_{duvar}	: Dolgu duvarın köşegen uzunluğu
r_s	: Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranı
R_y	: Kesitin akma eğilme momentine karşı gelen dönme değeri
s	: Etriye aralığı
$duvar$	: Dolgu duvarın kalınlığı
T_f	: Lifli polimer şeritle güçlendirilmiş duvar çekme çubuğunun çekme dayanımı
t_f	: Lifli polimer kalınlığı
V_c	: Betonun kayma dayanımına katkısı
V_c'	: Kolon kayma kuvvetinde bir sınır durum değeri
V_{cr}	: Betonun kaymada çatlama dayanımı
V_{duvar}	: Dolgu duvarın kesme kuvveti dayanımı
V_{FRP}	: Diyagonal FRP şeritin çekme kapasitesinin yatay bileşeni
V_r	: Betonarme kesitin kayma dayanımı
V_T	: Dolgu duvar ve çerçeve elemanlardan oluşan sistemin sınır durum için hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesi
V_w	: Kayma donatısının kayma dayanımına katkısı
V_y	: Akma yükü
W	: Kesit mukavemet momenti
w	: Dolgu duvar numunesi genişliği
w_f	: Lifli polimer genişliği
α^+, α^-	: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında önerilen göçme yükün en büyük yatay yüke oranı
β	: Betonarme çerçevenin yatay yük dayanımının dolgu duvar yatay yük dayanımına oranı
χ	: İki doğru ile idealleştirilmiş yük-yerdeğiştirme eğrisinde Δ_I değerinin katsayısı
γ	: Kayma şekildeğiştirmesi
Δ	: Basit kayma deneyinde düşey yerdeğiştirme
$\Delta_{0.05}$	: $0.05P_{GI}$ 'e karşı gelen yerdeğiştirme değeri
$\Delta_{0.35}$	: $0.35P_{GI}$ 'e karşı gelen yerdeğiştirme değeri
Δ_I	: Eksenel basınç çubuğunun eksenel akma yerdeğiştirmesi
Δ_{I1}	: Kullanılan yapısal modelde eksenel basınç çubuğunun “ id ” eğrisine göre eksenel akma yerdeğiştirmesi
Δ_{I2}	: Kullanılan yapısal modelde eksenel basınç çubuğunun C noktasına karşı gelen yerdeğiştirme
$\Delta_{eşdy}^+, \Delta_{eşdy}^-$	: Sırasıyla, itme ve çekme adımları için eşdeğer akma yerdeğiştirmesi

$\Delta_{G1}^+, \Delta_{G1}$	: Sırasıyla, P_{G1}^+ ve P_{G1}^- 'e karşı gelen yerdeğiştirme değerleri
$\Delta_{G2}^+, \Delta_{G2}$	: Sırasıyla, P_{G2}^+ ve P_{G2}^- 'ye karşı gelen yerdeğiştirme değerleri
$\Delta_{G3}^+, \Delta_{G3}$	: Sırasıyla, P_{G3}^+ ve P_{G3}^- 'e karşı gelen yerdeğiştirme değerleri
ΔH	: Dolgu duvar numunesinde yatay yerdeğiştirme
Δ_m	: Yük-yerdeğiştirme çevrim eğrisinde stabil bir tam çevrimdeki en büyük yerdeğiştirme
Δ_{max}	: Eşdeğer basınç çubuğunun yapacağı en büyük kısalma
Δ_{max}^f	: Eşdeğer çekme çubuğunun en büyük yerdeğiştirme değeri
Δ_u	: Göçme sınırındaki yerdeğiştirme değeri
Δ_{ult}	: Yük taşıma kapasitesinde olan düşey yerdeğiştirme
ΔV	: Dolgu duvar numunesinde düşey yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
δ	: Kat yerdeğiştirmesi
δ_t	: İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesinde ikinci katın yerdeğiştirmesi
δH	: Göreli kat ötelemesi oranı
δ/H_t	: Toplam kat ötelemesi oranı
ϵ_l	: Eksenel basınç çubuğunun akma şekildeğiştirmesi
ϵ_{max}	: Dolgu duvar numunesinde en büyük gerilme değerine karşı gelen şekildeğiştirme
ϵ_{max}^f	: Eşdeğer çekme çubuğunun en büyük şekildeğiştirme değeri
ϵ_{su}	: Donatı çeliğinin kopma şekildeğiştirmesi
η	: Kullanılan yapısal modelde eşdeğer basınç çubuğunun B noktasına karşı gelen yük değerinin katsayısı
λ_{duvar}	: Eşdeğer basınç çubuğu katsayısı
λh	: Dolgu duvar-çerçeve elemanı temas yüzeyi uzunluğu parametresi
μ	: Süneklik
μ_2^+, μ_2^-	: Sırasıyla, itme ve çekme adımları için 2 noktasına göre yerdeğiştirme sünekliği
$\mu_{eşd}^+, \mu_{eşd}^-$	: Sırasıyla, itme ve çekme adımları için eşdeğer yerdeğiştirme sünekliği
μ_{G1}^+, μ_{G1}^-	: Sırasıyla, itme ve çekme adımları için en büyük yatay yüke karşı gelen yerdeğiştirme sünekliği
θ	: Eşdeğer basınç çubuğunun yatay ile olan açısı
ρ	: Kullanılan yapısal modelde eşdeğer basınç çubuğunun BC doğrusunun eğim değerinin katsayısı
ρ_{sh}	: Duvarda yatay gövde donatılarının duvar brüt alanına oranı
σ	: Basınç gerilmesi
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{duvar}	: Dolgu duvarın kayma dayanımı
τ_{max}	: Dolgu duvar numunesinin en büyük kayma gerilmesi
τ_{me}	: Dolgu duvar numunesinin eşdeğer kayma dayanımı
τ_{oe}	: Harç çekme çekme dayanımı
ξ_{el}	: Elastik sönüm
ξ_{eq}	: Eşdeğer viskoz sönüm
ξ_{hyst}	: Çevrimsel sönüm

KARBON LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLI BETONARME ÇERÇEVELER

ÖZET

Betonarme binaların yatay deprem etkisinde taşıyıcı sistem hesapları yapılırken, dolgu duvarlar taşıyıcı olmayan elemanlar olarak düşünülmektedir. Dolgu duvarların bu hesaplarda sadece ağırlık ve kütle olarak gözönüne alınması, sistemin yatay rijitlik ve dayanım gibi mekanik özelliklerine katkılarının gözardı edilmesi genel bir yaklaşımdır. Homojen olmayan ve genellikle farklı malzemelerden üretilen dolgu duvarlarının yapısal modelleri kurulurken birçok faktörün etkili olmasının getirdiği zorluk nedeni ile yapılan bu varsayım, sistem davranışının yeterince doğru olarak belirlenememesine yol açmaktadır. Ülkemizde meydana gelen önemli depremlerden sonra yapılan incelemeler ve farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar, taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yatay rijitlikleri ve dayanımlarının, binanın titreşim özellikleri ve yatay yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

Deprem sırasında dolgu duvarların taşıyıcı sisteme getirdiği etkileri, duvarın hasar görerek taşıma kapasitesini yitirmesi ile ortadan kalkmaktadır. Dolgu duvarlar ve betonarme çerçevelerin deprem açısından güçlendirilmesi ile duvarların binaya getirdiği katkılarından deprem sarsıntısının sonuna kadar yararlanılabilmesi, taşıyıcı sistem ve duvarların bir bütün olarak çalışmasının sağlanabilmesi etkin bir güçlendirme yöntemi olacaktır. Bu tip bir güçlendirmenin lifli polimer kompozitler (FRP) kullanılarak yapılması son yıllarda araştırmacıların dikkatini çeken bir inceleme konusu olmuştur.

Bu çalışmada, ülkemizde yaygın olarak kullanılan gevrek ve taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yüzeylerine karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) yapıştırılarak özellikle yatay yük taşıyıcı hale getirilmesi, göçme biçiminin kontrolü ve bu yolla betonarme çerçeve sistemlerin depreme karşı güçlendirilmesi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanılan CFRP'nin sistem davranışına katkısı, farklı uygulama şekillerinin ve bağlantı detaylarının etkisi deneysel çalışma ile araştırılmış ve deney sonuçları teorik çalışmalar ile açıklanmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, 31 adet dolgu duvar numunesinin basit kayma deneyleri yapılmıştır. Küçük ölçekli bu deneylerin amacı, CFRP'nin sıvalı veya sıvasız dolgu duvar üzerine uygulanmasının etkisini gözlemlemek, CFRP ile güçlendirmenin dolgu duvarın kayma dayanımına ve rijitliğine katkısını anlamak, farklı CFRP güçlendirme şekillerinin etkinliğini karşılaştırmaktır. Basit kayma deneyleri sonuçlarına göre CFRP'nin sıvalı dolgu duvar üzerine uygulanmasının kolay ve etkin olduğu ve güçlendirilmiş numunelerin yük taşıma kapasitelerini etkileyen en önemli faktörün CFRP genişliği olduğu görülmüştür. CFRP ile güçlendirme, göçme şekilleri üzerinde etkilidir. Numunelerin deneysel verileri değerlendirilmiş ve düşey yük-yerdeğiştirme ile kayma gerilmesi-

kayma şekildeğiştirmesi eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin, kayma modülü, eşdeğer elastisite modülü, eşdeğer basınç dayanımları ve eşdeğer kayma dayanımları hesaplanmıştır. Bunlar DBYBHY’de önerilmiş olan değerlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Dolgu duvar numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrileri iki doğru ile ifade edilmiş ve bu şekilde tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yapısal modellerinin kurulması aşamasında faydalanılması amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiştir. İlk kısımda altı adet ½ ölçekli tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yapılmıştır. İki adet dolgu duvarsız betonarme çerçeve ve bir adet sıvalı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri referans numunelerdir. Diğer üç sıvalı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi farklı CFRP uygulama ve bağlantı şekilleri kullanılarak güçlendirilmişlerdir. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ve yapılan gözlemler değerlendirilerek numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri elde edilmiş, davranışları ile hasar durumları incelenmiş ve göçme şekilleri verilmiştir. Dolgu duvarların bu şekilde güçlendirilmesi ile duvar-çerçeve arasındaki yük aktarımının ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar devam ettiği gözlenmiştir. Dolgu duvarın iki yüzüne yapıştırılan CFRP şeritleri birbirine bağlayan CFRP ankrajlar deney sonuna kadar çok iyi çalışmışlardır. CFRP şeritlerin çerçeveye iki farklı şekilde yapılan bağlantısı deney sonuna kadar başarı ile sağlanmıştır. CFRP ile bu çalışmada yapıldığı gibi güçlendirmenin, sistemin taşıdığı en büyük yatay yük değerini attırdığı gözlenmiş ve bu artış oran olarak ifade edilmiştir. Numunelerin başlangıç rijitliği, çevrim eğrisinin tepe noktalarına karşı gelen rijitliği ve etkin rijitlik değerleri, eşdeğer süneklik değerleri, kuvvet azaltma çarpanları, enerji yutma kapasiteleri ve çevrimsel sönüm oranları hesaplanmış ve karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri iki doğrulu olarak idealleştirilmiş ve bu eğriyi tanımlayan özel noktalar belirlenmiştir. Son olarak, güçlendirilmiş numunelerin hasar adımları bir çizelgede toplanarak bir hasar durum çizelgesi hazırlanmıştır.

İkinci kısımda sekiz adet ½ ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yer almaktadır. İki katlı-tek açıklıklı numunelerin deneyleri, NATO Sfp-977231 no’lu projesi kapsamında yapılmıştır. Bu numunelerin bir grubunda kolon düşey donatıları sürekli, diğer grupta ise kat seviyelerinde bindirmeli eklidir. Sıvalı dolgu duvarlı numunelerde, dolgu duvarın iki yüzüne birer kat ve tek yüzüne iki kat olacak şekilde iki farklı CFRP güçlendirme şekli uygulanmıştır. Numunelerin yatay yük-tepe yatay yerdeğiştirmesi diyagramları, yatay rijitlik ve taşınan en büyük yatay yük değerleri açısından karşılaştırılarak sunulmuştur. CFRP güçlendirilmesinin dolgu duvarın tek yüzüne iki kat yapıldığı numunelerde, bu tür uygulamanın oldukça etkili olduğu görülmüştür. Deneysel gözlemler, CFRP ankrajların uygulamasının özenli yapılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Çalışmanın teorik bölümünde, sınırlı sayıdaki deneysel çalışmanın sonuçlarını genelleyeabilmek amacıyla, güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrilerine teorik yoldan da ulaşılmaya çalışılmıştır. Dolgu duvarlı CFRP ile güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunelerin yapısal modelleri hazırlanmış, artımsal itme analizi sonuçları, deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Numunelerin yapısal modelleri hazırlanırken, basit kayma deneyleri ve tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneylerinden elde edilen sonuçlardan da yararlanılmıştır. Yapısal modelde,

DBYBHY’de verilmiş olan esaslar temel alınmış, fakat deneysel sonuçlar ve gözlemlere bağlı olarak bazı değışiklikler yapılmış, bunlar detaylı olarak anlatılmış ve tartışılmıştır. Kullanılan yapısal modelin taşıyan en büyük yük değeri ve başlangıç rijitliği açısından deneysel sonuçlara yakın değerler verdiği görölmüş ve bunlar sayısal olarak ifade edilmiştir.

SEISMIC STRENGTHENING OF INFILLED REINFORCED CONCRETE FRAMES BY CFRP

SUMMARY

Neglecting the effects of non-structural brittle infill walls on dynamic characteristics of structures, such as lateral strength and stiffness, is a common assumption during the design and sometimes during the assessment stages of reinforced concrete (RC) structures subjected to lateral loads. This assumption is due to the fact that the infill walls are made of various and non-uniform materials leading to difficulty in the modeling. On the other hand, the field observations after the recent major earthquakes in Turkey and many researches throughout the world showed that this kind of approach leads to the misprediction of the real behavior of RC infilled structures under lateral loads.

The contributions of infill walls to lateral strength, stiffness and energy dissipation of RC structures, may be lost due to the premature damage during an earthquake. It would be an effective strengthening technique to keep the non-structural infill walls in place by strengthening the infill and RC frame elements together and forcing them to work as a whole until the end of the earthquake. Using Fiber Reinforced Polymer Composites (FRP) for this kind of strengthening has recently been an appealing area for the researchers. It is important that extensive experimental data covering various parameters should be obtained from different researches in order to improve the relatively new analytical background of this strengthening technique.

The objective of this thesis is to evaluate seismic strengthening of non-structural brittle infilled RC frames by CFRP in terms of lateral strength, stiffness and mechanical characteristics. For this purpose, the effects of CFRP strengthening to the overall behavior of the system and the effects of different application techniques and connection details were investigated experimentally and theoretically.

Experimental work of this thesis consists of two major parts. The first part is the diagonal tension tests of 31 masonry wall panel specimens. These tests were conducted in order to observe the effects of CFRP application on plastered and non-plastered wall panel specimens and the contributions of different CFRP types and applications on initial stiffness, shear strength and failure modes. Experimental results showed that CFRP application over plastered wall was easy and efficient and the major factor affecting the load carrying capacity of the specimens was the CFRP width. CFRP strengthening was also effective on the failure modes. The vertical load-displacement curves and the shear stress-shear strain curves of the specimens were obtained from the experimental data. Shear modulus, equivalent modulus of elasticity, equivalent compressive strength and equivalent shear strength of the specimens were calculated. These values were evaluated comparatively with the corresponding values recommended at Seismic Code of Turkey. The vertical load-displacement curves obtained from the diagonal tension tests were represented by bi-linear curves, which were intended to be used in the structural modeling of one story-

one bay infilled RC frame specimens. While establishing a structural model for infilled RC frames, infill walls may be replaced with one or more equivalent struts. Some of the infill wall characteristics that would be needed for these equivalent struts, were derived from the experimental results of diagonal tension tests as well.

In the second part of experimental work, one story-one bay and two story-one bay reinforced concrete frame specimens were tested under the cyclic in-plane lateral loads. Six one story-one bay RC frame specimens were $\frac{1}{2}$ scaled. Out of these six specimens, two bare frame specimens and one infilled frame specimen were the reference frames. The other three specimens were strengthened with different CFRP application types and connection details. The lateral load-top displacement hysteresis curves and the failure modes of specimens were obtained from experimental data and observations. The load transfer between infill wall and peripheral frame elements were achieved successfully by CFRP strengthening. The CFRP anchors connecting the CFRP diagonals applied on two sides of infill wall worked properly until failure. Frame element – diagonal CFRP connection were also successful for both of the connection details. The lateral load capacity and the initial stiffness values were increased by CFRP strengthening application and the percentage of the increase was proposed. Initial stiffness, peak-to-peak stiffness, effective stiffness, equivalent displacement ductility, strength reduction factors, energy dissipation capacities and hysteretic damping ratios were calculated and evaluated comparatively. Envelopes of the lateral load-top displacement curves were idealized and special coordinates of this bilinear curves were estimated. Finally, behavior of the specimens was inspected closely and a collective damage index was prepared for the CFRP strengthened specimens.

Eight $\frac{1}{2}$ scaled two story-one bay RC frame specimens were tested under cyclic in-plane lateral loads as a second group. Two story-one bay RC frame tests were a part of NATO project SFP-977231. Half of the specimens had continuous vertical reinforcements at their columns, while the other half had insufficient lap-splice lengths at the story levels. Two different CFRP strengthening scheme namely two sided one layer and one sided two layered applications were investigated. The lateral load-top displacement curves of the specimens were evaluated comparatively in terms of the lateral stiffness and the lateral load carrying capacities. It was observed that one sided two layered application was quite effective. Experimental observations showed that CFRP anchor application should be performed very carefully as it may affect the overall behavior of the specimen.

In the theoretical part of the thesis, structural models of the CFRP strengthened infilled one story-one bay RC frame specimens were established in order to achieve the generalisation of experimental results of limited number of tests. Analytical pushover curves and experimental results were compared. Diagonal tension and one story-one bay RC frame test results and experimental observations were also utilized in this process. Structural modeling was based on the principals that were given in the Seismic Code of Turkey, with some modifications made according to the experimental data and observations. These modifications were explained and discussed thoroughly. Analytical results compared well with the experimental results in terms of lateral load capacity and initial stiffness.

1. GİRİŞ

1.1 Konu

Betonarme binaların yatay deprem etkisinde taşıyıcı sistem hesapları yapılırken, dolgu duvarlar taşıyıcı olmayan elemanlar olarak düşünülmektedir. Dolgu duvarların bu hesaplarda sadece ağırlık ve kütle olarak gözönüne alınması ve sistemin yatay rijitlik ve dayanım gibi mekanik özelliklerine katkılarının gözardı edilmesi genel bir yaklaşımdır. Homojen olmayan dolgu duvarların yapısal modelleri kurulurken birçok faktörün etkili olmasının getirdiği zorluk nedeni ile yapılan bu varsayım, sistem davranışının yeterince doğru olarak belirlenememesine yol açmaktadır. Ülkemizde meydana gelen önemli depremlerden sonra yapılan incelemeler ve farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar, taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yatay rijitlikleri ve dayanımlarının, binanın titreşim özellikleri ve yatay yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

Dolgu duvarların sistemin dinamik karakteristiklerine olan etkisi gerçek binalarda yapılan titreşim ölçümlerinden tespit edilebilmektedir, (Ersin ve diğ., 1998 ve Chaker ve Cherifati, 1999). Her iki çalışmada da, dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı özdeş binalarda titreşim ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre dolgu duvarlı binanın doğal titreşim periyodunun çıplak çerçeveye göre daha küçük, yatay rijitliğinin ise daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, taşıyıcı sistem yapısal modellerinin kurulmasında dolgu duvarların da modellere sistemin yapısal modeline eklenmesinin doğru bir yaklaşım olacağını açıkça ortaya koymaktadır. Dolgu duvarların yatay yükler etkisindeki bina davranışına etkilerinin daha iyi ve güvenilir biçimde tanımlanabilmesi, hesaplarda gözönüne alınması amacıyla yatay rijitlik ve dayanımlarının ayrıntılı olarak incelenmesi ve güvenilir biçimde saptanması gerekmektedir.

Deprem sırasında dolgu duvarların taşıyıcı sisteme getirdiği etkiler, duvarın hasar görerek taşıma kapasitesini yitirmesi ile ortadan kalkmaktadır. Dolgu duvarlar ve betonarme çerçevelerin deprem açısından güçlendirilmesi ile duvarların binaya

getirdiği katkılarından deprem sarsıntısının sonuna kadar yararlanılabilmesi, taşıyıcı sistem ve duvarların bir bütün olarak çalışmasının sağlanabilmesi etkin bir güçlendirme yöntemi olacaktır. Bu tip bir güçlendirmenin lifli polimer kompozitler (FRP) kullanılarak yapılması son yıllarda araştırmacıların dikkatini çeken bir inceleme konusu olmuştur.

Bu çalışmada, ülkemizde yaygın olarak kullanılan gevrek ve taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yüzeylerine karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) yapıştırılarak yatay yük taşıyıcı hale getirilmesi, göçme biçiminin kontrolü ve bu yolla betonarme çerçeve sistemin depreme karşı güçlendirilmesi incelenmiştir.

1.2 FRP ile Güçlendirme

İlk olarak uçak mühendisliği ve savunma teknolojilerinde kullanılan FRP, geleneksel güçlendirme tekniklerine bir alternatif olarak inşaat mühendisliği alanında da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır, (ACI 440, 2001 ve FIB Bulletin 14, 2001). FRP, polimer esaslı reçine ile yapıştırılan liflerden oluşmaktadır. FRP sistemlerde cam (GFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP) olmak üzere üç tip lif kullanılabilmektedir. Diğer güçlendirme tekniklerine oranla çeşitli üstünlüklere sahiptir. Hafif bir malzeme olan FRP, yapının ağırlığını pratik olarak değiştirmemektedir. Ayrıca lifleri doğrultusunda yüksek çekme dayanımına ve rijitliğe sahiptir, korozyona karşı dayanıklıdır. İnşaat alanına nakliyesi kolay olan ve istenilen boyutlarda kesilebilen FRP'nin tüm yüzeylere uygulanması, betonlamaya oranla, temiz ve kolaydır. FRP ile güçlendirme tekniğinin uygulanması için harcanan zamanın ve uygulama esnasında binada yaşayanlara verilen rahatsızlığın diğer güçlendirme teknikleriyle karşılaştırıldığında çok daha az olması da önemli bir özelliktir.

FRP sistemlerin en önemli dezavantajı sıcaklığa karşı düşük dayanımlarının olmasıdır, (ACI 440, 2001 ve FIB Bulletin 14, 2001). FRP'deki reçinenin fiziksel ve mekaniksel özellikleri sıcaklığa duyarlıdır. Cam-transisyon sıcaklıklarının üzerine çıkıldığında reçinenin moleküler yapısında değişme olduğundan elastisite modülleri ve mekaniksel özellikleri azalmaktadır. Cam-transisyon sıcaklığı her bir FRP sistemde reçine çeşidine bağılı olarak farklılık göstermekte ve 60 ile 82°C arasında değişmektedir. Liflerin termal özellikleri reçineye oranla daha iyi olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda birbirine reçine ile bağılı lifler arasındaki kuvvet transferinde

azalma olacağından bütün sistemin çekme kapasitesi de düşecektir. Yangın gibi durumlarda yüksek sıcaklığa maruz kalan FRP'nin dayanımını tamamen kaybettiği varsayılmaktadır. Bu sebeple yapı güçlendirilirken taşıyıcı sistemin, yangın esnasında etkiyen yükleri FRP'nin katkısı olmadan da karşılayabilmesi sağlanmalıdır.

Birçok FRP sistemin mekanik özellikleri; değişken sıcaklık, yüksek nem, alkalilik, tuzlu su, kimyasallar, ultraviyole, donma-çözülme, yüksek sıcaklık gibi çevresel koşullar etkisinde değişmektedir, (ACI 440, 2001). Bu değişimin büyüklüğü, çevresel etkinin süresi, reçine ile lif çeşitleri ve kür metodu gibi faktörlere bağlıdır. Örneğin reçine ortamdaki nemi absorbe eder, böylece cam-transisyon sıcaklığının düşmesine ve reçinenin sertleşmesine yol açar. Epoksi reçinelerde bu iki etki de suyun kurutularak ortadan kaldırılması ile kısmi olarak geri çevrilebilir, (FIB Bulletin 14, 2001). Nemin FRP tarafından emilme miktarı, reçine çeşidine ve su sıcaklığına bağlıdır. FRP ile yapı elemanlarının ara yüzeyindeki yük transferi, nemin varlığı nedeniyle azalmakta ve FRP'nin yüzeyden erken ayrılmasına veya donma-çözülme çevrimlerinde çatlamaya neden olmaktadır, (Lin ve diğ., 2006). Güçlendirme yapılırken FRP'nin maruz kalacağı çevre koşulları dikkatlice incelenmeli ve yapısal hesaplarda yeralmalıdır. Çevresel faktörlerden meydana gelecek olumsuzluklar, FRP'nin uygun bir koruyucu tabaka ile kaplanması ile en aza indirilmelidir. Ayrıca FRP'nin, her ne kadar büyük şekildeğiştirmeler yapsa da göçmeye kadar doğrusal elastik davranış gösterdiği dikkate alınmalıdır.

FRP'nin pahalı bir malzeme olması da bir diğer dezavantajdır. Fakat FRP sistemler ile diğer güçlendirme tekniklerinin maliyetleri karşılaştırılırken sadece malzeme fiyatını karşılaştırmak yanıltıcıdır. Bu karşılaştırma, güçlendirmenin tüm aşamalarının toplam maliyeti üzerinden yapılmalıdır.

Betonarme yapılara dıştan bağlanmış FRP sistemlerin iki farklı uygulama yöntemi vardır. Bunlar ıslak uygulama ve önceden hazırlanmış elemanların uygulamasıdır. Bu çalışmada ıslak uygulama yöntemi kullanılmıştır. Islak uygulama yönteminde, öncelikle FRP uygulanacak yüzey mekanik olarak düzeltilir ve mevcut boşluklar epoksi esaslı harç ile doldurulur. FRP yapıştırılacak alana yapıştırıcı epoksi reçinesi fırça ile sürülür. İstenilen boyutlarda kesilen FRP şeritler yapıştırıcının üstüne yayılır ve özel rulo ile boşluklar alınarak yüzeye iyice yapışması sağlanır. Üstüste birkaç kat

FRP uygulanacağı zaman, her kata epoksi reçinesi sürülür ve yeniden rulo ile düzeltilir. FRP uygulaması yapıldıktan bir hafta sonra prizini almaktadır.

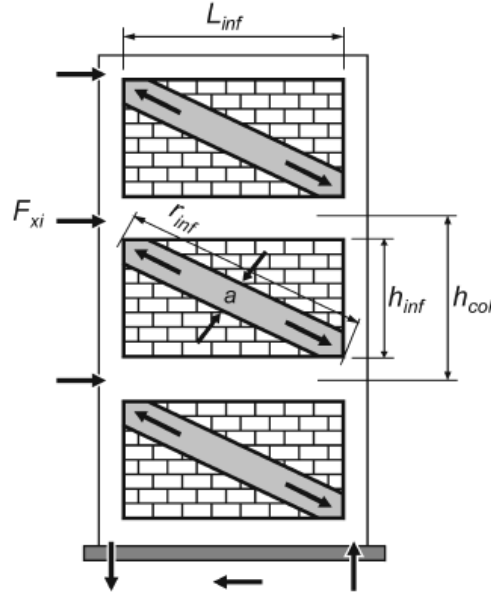
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde, ülkemizde yaygın olarak kullanılan gevrek ve taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yüzeylerine karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) yapıştırılarak özellikle yatay yük taşıyıcı hale getirilmesi, göçme biçiminin kontrolü ve bu yolla sistemin depreme karşı güçlendirilmesinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda, dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanılan CFRP'nin sistem davranışına katkısı, farklı uygulama şekillerinin ve bağlantı detaylarının etkisi iki aşamalı bir deneysel çalışma ile araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiş ve deneysel veriler teorik çalışmalar ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

Betonarme çerçeveler içinde oluşturulmuş dolgu duvarlar, yatay yükün yönüne bağlı olarak bir diyagonal doğrultusunda basınç gerilmelerine, diğeri doğrultusunda ise çekme gerilmelerine maruz kalırlar, Şekil 1.1. Çekme dayanımı ihmal edilebilecek kadar küçük olan dolgu duvarların, çekmeye çalışan diyagonalleri doğrultusunda çekme dayanımı yüksek olan CFRP yapıştırılarak güçlendirilmesi sözkonusudur. Yön değiştiren deprem yükleri nedeni ile duvarın her iki diyagonaline de yapıştırılması gerekli olan CFRP uygulaması ile sistemin yatay yük dayanımı arttırılmakta, yerdeğiştirmeleri sınırlanmakta ve böylece duvardaki hasar azalmaktadır.

Bu deneysel çalışmada aşağıdaki konular araştırılmıştır;

- CFRP ile güçlendirmenin dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yük taşıma, rijitlik, yerdeğiştirme sünekliği, kuvvet azaltma çarpanı, çevrimsel sönüm ve enerji yutma özelliklerine olan etkisinin anlaşılması ve göçme şekillerinin deneysel yöntemler ile belirlenmesi,
- Farklı CFRP uygulama yöntemlerinin etkinlikleri,
- Çerçeve ve dolgu duvarın bütünleşerek çalışmasının sağlanması ve CFRP'nin duvar yüzeyinden ayrılmasını engelleyerek, güçlendirmenin olumlu etkilerinden mümkün olduğu kadar yararlanılması,



Şekil 1.1 : Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışı, (FEMA 356, 2000).

- Bunun için duvarın her iki yüzündeki CFRP tabakalarının birbirlerine ve çerçeveye ankre edilmesi için uygun çözümler bulunması,
- Yön değiştiren yatay yükler nedeni ile ardışık çekme ve basınca maruz kalan ve epoksi bağlayıcı ile yapıştırıldıktan sonra gevrekleşen CFRP şeritlerinin burkulma nedeni ile erken göçmeye maruz kalıp kalmadığının incelenmesi ve varsa bu istenmeyen davranışın giderilmesi için yeni bir uygulama yöntemi geliştirilmesi,
- Dolgu duvar numunelerinin basit kayma deneyleri ile CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yapısal modelinin kurulması aşamasında gerekli olan büyüklüklerin deneysel olarak elde edilmesi,
- Teorik çalışma sonucunda elde edilecek yapısal modelin deneysel veriler ile karşılaştırılması ve farklı parametrelerin etkilerinin incelenmesi.

Deneysel çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, dolgu duvar numunelerin basit kayma deneyleri yapılmıştır. Küçük ölçekli bu deneylerin amacı, CFRP'nin sıvalı veya sıvasız dolgu duvar üzerine uygulanmasının etkisini gözlemlemek, CFRP ile güçlendirmenin dolgu duvarın kayma dayanımına ve rijitliğine katkısını anlamak, farklı CFRP güçlendirme şekillerinin etkinliğini karşılaştırmaktır. Dolgu duvar numunelerinin basit kayma deneylerinden elde edilen

deneysel verilerden, dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin yapısal modellerinin kurulması aşamasında faydalanılmıştır.

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiştir. İlk kısımda altı adet ½ ölçekli tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yapılmıştır. Dolgu duvarsız betonarme çerçeve ve dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri referans numunelerdir. Diğer üç dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi farklı CFRP uygulama ve bağlantı şekilleri kullanılarak güçlendirilmişlerdir. Deneysel gözlemler ile veriler belirlenen parametrelere göre değerlendirilmiş ve karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

İkinci kısımda sekiz adet ½ ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiştir. İki katlı-tek açıklıklı numunelerin deneyleri, NATO SİP-977231 no'lu projesi kapsamında yapılmıştır. Bu numunelerin bir grubunda kolon düşey donatıları sürekli, diğer grupta ise kat seviyelerinde bindirmeli eklidir. Dolgu duvarlı numunelerde iki farklı CFRP güçlendirme şekli uygulanmıştır. Numunelerin yatay yük-tepe yatay yerdeğiştirmesi diyagramlarının yatay rijitlik ve yatay yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırılarak sunulmuştur.

Deneysel çalışmadan elde edilen veriler, teorik çalışmada kurulan yapısal modelin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yapısal modelleri hazırlanmış ve artımsal itme analizi sonuçları, deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

1.4 Çalışmanın Düzeni

Bu çalışmada ilk bölümde konu, FRP ile güçlendirme ve özellikleri, çalışmanın amaç ve kapsamı verilmiştir. İkinci bölümde daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmanın ilk aşaması olan 'Basit kayma deneyleri' de bu bölümde yer almaktadır.

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasını oluşturan tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri dördüncü bölümde, iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve

deneyleri ise beşinci bölümde sunulmuştur. Her iki bölümde de deney numuneleri, deney yükleme ve ölçüm düzenekleri anlatılmış, elde edilen deney sonuçları ve bunların seçilen parametrelere göre değerlendirilmesi detaylı olarak verilmiştir.

Altıncı bölümde teorik çalışma anlatılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve tartışmalar yedinci bölümde özetlenmiştir.

2. DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

2.1 FRP ile Güçlendirilmiş Taşıyıcı Yığma Duvarlar

Yatay yük etkisindeki taşıyıcı yığma duvarların lifli kompozit polimerler (FRP) ile güçlendirilmesi araştırmacıların uzun zamandır ilgisini çeken bir konudur. Birer kültürel miras olan tarihi yapıların büyük bir kısmının yığma yapı olması ve dünyada meydana gelen büyük depremlerin ardından bu yapılarda oluşan önemli hasarların incelenmesi, yığma yapıların doğru bir biçimde güçlendirilmesinin önemine dikkat çekmiştir. Yığma yapıların ve dolgu duvarların FRP ile güçlendirilmesi, diğer güçlendirme tekniklerine karşı sahip olduğu üstünlükler nedeniyle sıkça tercih edilen bir teknik olmuştur, (Triantafillou, 2001).

Dolgu duvarlı betonarme yapıların yatay yükler etkisindeki davranışı taşıyıcı yığma duvarlardan farklı olmasına rağmen, FRP ile güçlendirilmiş taşıyıcı yığma duvarlar için yapılmış araştırmaların deneysel sonuçlar ve gözlemlerinin iyi anlaşılması, dolgu duvarlı betonarme yapıların FRP ile güçlendirilmesinin incelenmesi için oldukça yararlı olacaktır.

Yığma yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde FRP kullanılmasını ilk olarak 1995 yılında Schwegler önermiştir, (Schwegler, 1995). Çok katlı yığma yapılarda en büyük deprem yüklerine maruz kalan alt katlardaki yığma duvarların FRP ile güçlendirilmesini incelemiştir. Bu tip bir güçlendirme sonucunda hedeflenen; sistemin sünekliğini ve yatay yük taşıma kapasitesini arttırmak, duvarın tümünde düzgün bir çatlak dağılımı olmasını sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda birebir ölçekli yedi adet yığma duvar numunesi, düzlemiçi yatay çevrimsel yükler altında denenmiştir. FRP, numunelerin duvarlarının bir yüzüne veya iki yüzüne birden uygulanmıştır. İki tip kompozit malzeme kullanılmıştır. CFRP'den ince şeritler duvara diyagonal şeklinde yapıştırılmış ve döşeme ile tavana çeşitli şekillerde ankre edilmiştir. GFRP uygulanan numunelerde ise tüm yüzey kaplanmıştır fakat çevreye ankre edilmemiştir. Deneysel sonuçlar, artan yükler altında duvar yüzeyinden ayrılan FRP'nin uygun bir şekilde çevre elemanlara bağlanması halinde, duvardan ayrı bir eleman olarak yük taşımaya devam ettiğini göstermiştir. Yerdeğiştirmeler artmasına

rağmen yatay yük dayanımında önemli bir düşüş olmamış ve FRP ile güçlendirme duvarların dayanımını oldukça yükseltmiştir. Tek yüze güçlendirme uygulanması durumunda yatay yük dayanımındaki artım farkının küçük olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş yığma yapıda sistemin sünekliği ve yük taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerin; güçlendirme malzemesinin karakteristik özellikleri ve uygulanma şekli olduğu ortaya konulmuştur.

Priestley ve Seible (1995), taşıyıcı yığma duvarlarda yatay yükler altında oluşan diyagonal kayma çatlaklarının genişliklerini sınırlamak amacı ile FRP'nin yatay doğrultuda uygulanmasını araştırmıştır. Bu durum için beton için geçerli olan denklemlerin yığma elemanlara uyarlanması ile elde edilen basit denklemlerin kullanılabileceğini gösterilmiştir. Beş katlı birebir ölçekli bir yığma duvar numunesi yatay yük altında denendikten sonra ilk iki kattaki duvarlar, lifleri yatay doğrultuda yapıştırılan FRP ile güçlendirilmiştir. Bu duvarların alt köşeleri de FRP ile takviye yapıldıktan sonra yeniden deneye tabii tutulmuştur. FRP'nin bu şekilde uygulanması ile çatlak kontrolü açısından etkili olmadığı gözlenmiştir. Bu konuda yapılan ilk deneysel çalışmalardan biri olması açısından önemli olan araştırmada, FRP'nin sadece ilk iki kata uygulanması, lif doğrultularının yatay olması ve bu katlardaki tüm duvar yüzeylerinin kaplanması ile ekonomik olmayan bir güçlendirme yöntemi seçilmiştir. Çalışmadaki bu olumsuzluğun yanında bu alanda yapılacak çalışmaları yönlendirebilecek önemli tespitlerde bulunulmuştur. Çekme dayanımı yüksek olan FRP'nin yük aktarmasındaki sınırın, yığma elemanın çok daha az olan çekme dayanımı tarafından belirlendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca taşıyıcı yığma duvarlarda görülen köşe kırılması göçme modunun, o bölgenin FRP ile sarılması ile önlenebileceği de belirtilmiştir.

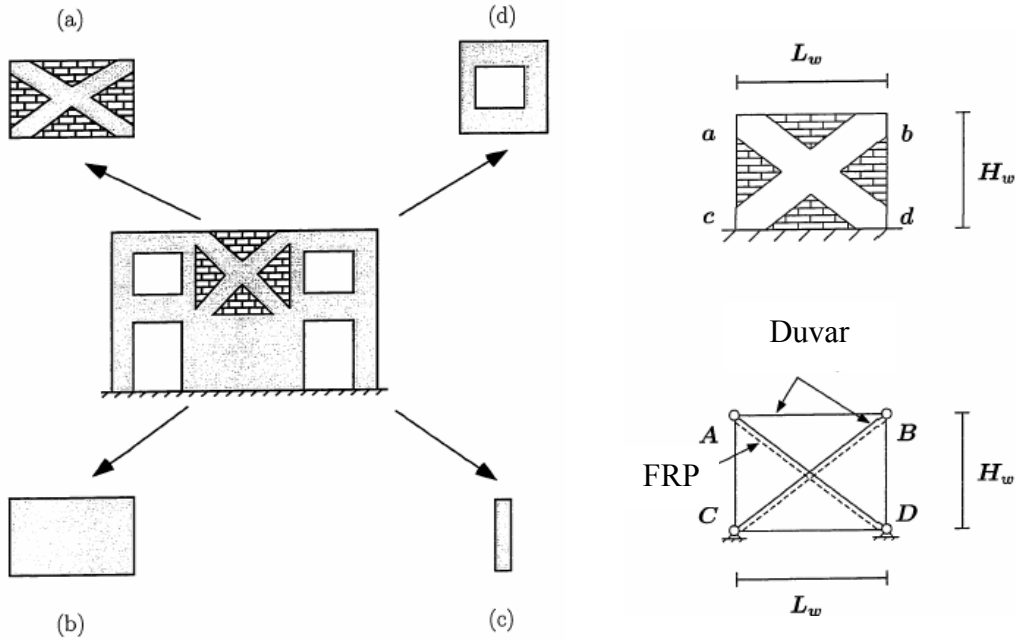
Reinhorn ve Madan (1995), iki yüzü farklı türde FRP ile güçlendirilmiş yığma duvar numunelerini yatay yükler altında denemiş ve yığma duvarın asimetric olarak güçlendirilmesinin etkisini incelemişlerdir. FRP ile güçlendirme yönteminin yığma duvarın yatay yük taşıma ve enerji yutma kapasitelerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu deneysel çalışmanın en önemli katkısı, FRP ile güçlendirme yönteminin faydalarını ve eksikliklerini tespit etmesidir. Bu yöntemin faydaları olarak FRP'nin çatlakların genişlikleri sınırlı tutarak, yığma duvarın gevrek göçmesini ertelemesi ve duvar göçtükten sonra birarada kalmasını sağlayarak çevreye zarar vermesini önlemesi sayılabilir. Bu yöntemde gözlenen eksiklikler ise

ileri yük adımlarında duvardan ayrılan FRP'nin, duvara bağlantısının sürdüğü ara yüzeyde zayıf bölge oluşması ve bu bölgede FRP'nin gevrek kırılmasıdır. FRP kırıldıktan sonra yükler duvara aktarılmış ve duvarı kayma göçmesine götürmüştür.

Triantafillou (1998), normal kuvvet ve kayma kuvveti etkisindeki yığma duvar panellerinin FRP ile güçlendirilmesi için betonarme sistemlerde kullanılan denklemleri temel alarak denklemler çıkarmıştır. Duvarın güçlendirilmesinde ince FRP şeritler yatay ve düşey doğrultuda yapıştırılarak duvar üstünde hasır oluşturulmuştur. Önerilen denklemlerde panellerin göçme şeklinin etkisi dikkate alınmamıştır ve deneysel verilerle kalibrasyona gidilmeden kullanılmasının uygun olmadığı düşünülmektedir.

Jai ve diğ. (2000a ve 2000b), FRP ile güçlendirilmiş dolu veya boşluklu yığma duvarların düzlemiçi yatay ve normal kuvvetler altındaki yük-yerdeğiştirme, göçme yükü ve göçme anındaki yerdeğiştirmesini tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Yapılan deneyler ile bu modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırma, bu konuda modelleme üzerine yapılan ilk ve en kapsamlı çalışmadır. Modelleme yapılırken dolu ya da boşluklu duvarların tüm yüzeyinde veya diyagonalleri doğrultusunda şeritler halinde FRP uygulanması durumları ayrı ayrı incelenmiştir, Şekil 2.1. Modellerde FRP'nin duvarın tek yüzüne veya her iki yüzüne birden uygulanma durumları ele alınabilmektedir. Bir yığma duvar modellenirken, duvar çeşitli parçalara ayrılarak ayrı ayrı incelenmektedir. Bu parçaların modelleri uygun biçimde birleştirilerek kullanılabilir. Tüm yüzeyi FRP ile kaplı veya diyagonalleri doğrultusunda FRP yapıştırılmış olan dolu duvarlar için sekiz adet çubuktan oluşan bir kafes sistem modeli kurulmuştur. Modelin denklem sisteminin kurulması, sistemdeki hasar durumuna göre aşamalı olarak yapılmaktadır. Dört ayrı hasar durumu tanımlanmıştır. Yapılan deneyler ve model analizlerinin karşılaştırılması sonucunda, duvarın FRP ile tamamen kaplanması ile diyagonalleri doğrultusunda iki adet FRP şerit yapıştırılması halleri için yük taşıma kapasiteleri arasında büyük fark olmadığı görülmüştür. Diyagonal doğrultuda FRP uygulanmasının, duvarın aynı zamanda tamamen kaplanmayarak nefes alması, nemin dışarı çıkmasına izin vermesi açısından daha uygun bir çözüm olduğu belirtilmiştir. Önerilen model, göçme yükleri ve bu yükteki yerdeğiştirme hakkında deney sonuçları ile uygun sonuçlar vermesine rağmen, doğrusal olmayan davranışı doğru bir şekilde belirlememektedir. Modeldeki bu eksikliğe karşın, dolgu duvarların

modellenmesi aşamasında, modelin kurulması ve yaklaşım açısından örnek alınabilecek önemli bir çalışmadır.



Şekil 2.1 : FRP ile güçlendirilmiş yığma duvarlar için önerilen yapısal model, (Jai ve diğ., 2000b).

ElGawady ve diğ. (2002), $\frac{1}{2}$ ölçekli bir yığma duvarı dinamik yatay yükler altında denemiş ve daha sonra bir yüzünün tamamına GFRP uygulayarak güçlendirmiş, yeniden sarsma tablası deneyine tabii tutmuşlardır. Bu deneylerden elde edilen veriler de GFRP ile güçlendirmenin etkili olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın asıl önemi, bu konuda yapılan az sayıdaki dinamik deneylerden biri olmasıdır.

Corradi ve diğ. (2002), Umbria’da 1997-1998 yıllarında meydana gelen depremlerde hasar görmüş ve hasarsız yığma binaların değişik teknikler ile güçlendirilmesini ve davranışlarını incelemek için gerçek binalarda çeşitli testler yapmışlardır. Foligno ve Sellano şehirlerindeki değişik yığma yapı elemanı ve harç türüne sahip yedi yığma binada 15 adet duvar parçası elmas uçlu aletler ile kesilmiş ve çevresindeki duvardan izole edilerek yerinde, basınç, diyagonal basınç ve kayma ile basınç deneylerine tabii tutulmuştur. İncelenen güçlendirme teknikleri deprem sonrası oluşan boşluklara hidrolik grobeton enjeksiyonu ve FRP ile güçlendirmedir. FRP ile güçlendirilmiş numunelerin diyagonal testlerinden, bu tip güçlendirmenin en zayıf noktasının duvar ve FRP’nin arasındaki bağ olduğunu göstermiştir. Farklı yığma eleman ve örme tekniklerine sahip duvar panellerine FRP uygulanmasının kayma dayanımlarına

etkisi açıklanmıştır. Bazı numunelerde FRP'nin, duvarın kayma dayanımlarını arttırdığı ve yük arttıkça duvar yüzeyinden ayrıldığı görülmüştür. Bu araştırma, gerçek binalarda yürütüldüğü için önemli kaynaklardan biridir.

Valuzzi ve diğ. (2002), yığma duvarların FRP ile güçlendirilmesini incelemek amacı ile 9 adet referans ve 24 adet güçlendirilmiş duvar numunesinin basit kayma deneyini yapmıştır. Güçlendirme için üç tip FRP diyagonal ve hasır olarak numunelere farklı şekillerde uygulanmışlardır. Deneysel sonuçlar, duvarların tek yüzüne FRP uygulamanın çok etkili olmadığını ama iki yüze uygulamada kayma dayanımının oldukça arttığını göstermiştir. Duvara diyagonal olarak yapıştırılan FRP şeritlerin, hasıra göre kayma kapasitesi açısından daha etkili olmasına rağmen, hasır FRP uygulaması durumunda çatlakların duvar üzerinde daha yaygın olduğu gözlenmiştir. Önceki çalışmalarda önerilen denklemler, deneysel veriler ile karşılaştırılarak etkinlikleri tartışılmıştır. Yapılan gözlemler ve elde edilen sonuçlar, bu çalışmada yeralan dolgu duvarların basit kayma deneyleri için önemli bir örnektir.

2.2 FRP ile Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlar

Saadatmanesh (1997), GFRP kullanılarak betonarme ve yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesini incelediği çalışmada, dolgu duvarlı çerçevelerin düzlemdışı ve düzlemiçi davranışlarını iyileştirmek amacı ile dolgu duvar ve çerçeve üzerine yapılabilecek bir GFRP uygulaması adım adım tarif etmiştir. İlk olarak bu çalışmada verilmiş olan yönteme göre GFRP ile duvarın tüm yüzeyi kaplanmakta ve GFRP çerçeve üzerinde de devam ettirilmektedir. Gerekli görülürse, GFRP tabakanın çelik korniyer veya plaka kullanılarak çerçeveye ankre edilebileceğine de değinilmiştir.

Haroun ve Ghoneam (1997), birebir ölçekli iki betonarme çerçeve numunesinin dolgu duvarlarının GFRP ile güçlendirilmesi ve onarımı halinde duvarın çevrimsel yatay yükler etkisindeki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Birinci numunede tuğla dolgu duvarın her iki yüzü de GFRP ile güçlendirilmiştir. İkinci numunenin dolgu duvarı beton elemanlardan örülmüştür ve bu numune öncelikle güçlendirilmeden denenmiş, deneyin sonunda hasarlı numunenin dolgu duvarı GFRP ile güçlendirilerek bir daha test edilmiştir. GFRP'nin, taşıyıcı yığma duvarlarda olduğu gibi dolgu duvardaki çatlak oluşumunu ve diyagonal çekme göçmesi ile bir derz boyunca kayma göçmesini önlediği gözlenmiştir. Güçlendirilmiş numunede göçme, dolgu duvarlarda oluşan köşe kırılmasını takiben kolonlardaki kayma

kırılması ile olmuştur. Kolonların bu şekilde gevrek göçmesinin engellenmesi için kolon kayma dayanımının dolgu duvar yatay dayanımından daha yüksek olmasına dikkat edilmesi önerilmiştir. Deneysel çalışmanın devamında, bu tip sistemler için sonlu elemanlar ile doğrusal olmayan bir analiz yapılmıştır. Analiz ile deney sonuçları karşılaştırılarak göçme mekanizmasını ve sistemin yük-yerdeğiştirme özelliklerini iyi tahmin ettiği gösterilmiştir. Önerilen analiz yöntemi, dolgu duvar köşelerinde kırılma olduktan sonraki davranışı yansıtamadığından sınırlıdır. Çalışmada, daha kolay analiz yöntemi olarak dolgu duvarın eşdeğer çubuk olarak modelleneyeceği bir makromodel kurulmasının uygun olduğu söylenmiştir.

Hakam (2000), GFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çelik çerçeve sistemlerin düzlemiçi yatay yükler etkisindeki davranışını incelemiştir. Çalışmanın deneysel kısmı iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde 64 adet küçük numune, dolgu duvarların farklı bölgelerini temsil etmek için değişik açılarla etkililmiş düzlemiçi yükler altında denenmiştir. Bu numunelerin yarısı GFRP ile güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde ise bir adet dolgu duvarsız ve dört adet dolgu duvarlı çelik çerçeve numunesi diyagonalleri doğrultusunda düşey yük etkisinde denenmiştir. Bütün numuneler 1/3 ölçektedir ve dolgu duvarlar beton yığma elemanlarla üretilmiştir. Duvar ile çerçevenin birbirine göre rijitliklerinin farklı olduğu iki numune cinsi kullanılmıştır. Herbir numune cinsinden bir adet güçlendirilmemiş referans numunesi ve bir adet dolgu duvarları GFRP ile güçlendirilmiş numune üretilmiştir. Lifleri iki doğrultulu olan GFRP, dolgu duvarların her iki yüzüne de bir kat olarak uygulanmış ve çerçeveye bağlantı yapılmamıştır. Deney sonuçlarına göre küçük duvar numunelerinin GFRP ile güçlendirilmesi sonucunda göçme şekillerinin değiştiği ve yükleme açısına bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Dolgu duvarlı çelik çerçeve numunelerde ise güçlendirilmiş numunelerin yük taşıma kapasiteleri, güçlendirilmemişlere oranla artmıştır ve artış oranı farklı duvar-çerçeve rijitlik parametrelerine göre 2.11 ve 1.21 olarak değişmektedir. Ayrıca güçlendirilmiş numunelerin başlangıç rijitlik değerlerinin de, duvar-çerçeve rijitlik parametresinden bağımsız olarak iki kat arttığı belirtilmiştir. Son olarak GFRP ile güçlendirmenin göçme şekillerini ‘köşe kırılması’ olarak değiştirdiği kaydedilmiştir. Deneysel çalışma ve bazı sonuçları Hamid ve diğ. (2005) ve El-Dakhakhni ve diğ. (2006)’de verilmiştir.

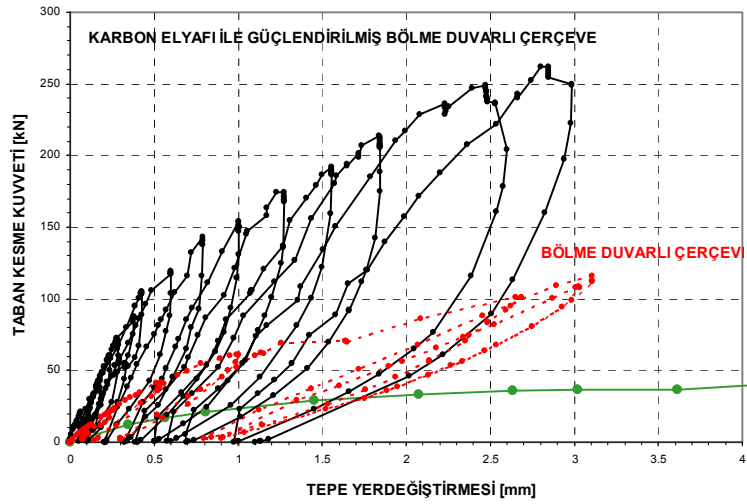
Aynı çalışmanın sayısal kısmında ise GFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çelik çerçeve numunelerinin analizi için bir makromodel önerilmiştir. Bu modelde, dolgu duvar, sadece basınç taşıyan bir adet eşdeğer diyagonal çubuk ile temsil edilmiştir. Dolgu duvarın doğrusal olmayan davranışı, yükleme adımlarına göre değişken olan eşdeğer çubuk alanını sabit tutarak ve çubuğun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi olarak duvarın doğrusal olmayan malzeme eğrisini tanımlayarak ifade edilmiştir. Bu doğrusal olmayan malzeme gerilme-şekildeğiştirme eğrileri, çalışmanın deneysel bölümde yeralan küçük numune deneyi sonuçlarının, beş doğru ile idealleştirilmesinden elde edilmiştir. İdealleştirilmiş eğrilerde güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş dolgu duvarlar için verilen gerilme ve şekildeğiştirme sınırları farklıdır ve bu şekilde GFRP ile güçlendirilmenin malzeme davranışına etkisi dikkate alınmaktadır. Öncelikle güçlendirilmemiş numunelerin analiz ve deney sonuçları karşılaştırılarak önerilen modelin uygunluğu gösterilmiştir. Güçlendirilmiş numunelerin analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında büyük fark olduğu gözlenmiştir. Bunun en önemli nedeni olarak, duvar ile çerçeve arasındaki temas uzunluğunun güçlendirilmiş numunelerde daha büyük olduğu, fakat eşdeğer çubuk kesit alanının hesabında kullanılan denklemlerin yapısı gereği bunun modele yansıtılmadığı belirtilmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için güçlendirilmiş numune modellerinde eşdeğer çubuk alanlarının hesabında temas uzunluğu değerleri deney sonuçlarına göre kalibre edilmiş modifikasyon katsayıları ile çarpılmıştır. Sınırlı sayıda deney verisiyle yapılmış olan bu kalibrasyon sonucu elde edilen modelin kullanılmasının sağlıklı olmadığı düşünülmektedir.

Li ve diğ. (2001), dolgu duvarlı çerçevelerin FRP ile güçlendirilmesini inceleyen bir deney çalışması yürütmüşler ve üç adet numune denemişlerdir. Numunelerden biri güçlendirilmemiş referans numunesidir. Diğer iki numuneden biri düşey yerleştirilmiş FRP çubuklar ile, ikincisi ise yatay yerleştirilmiş FRP çubuklar ile güçlendirilmiştir. Yığma duvar numuneleri, betonarme veya çelik bir çerçeve içerisine örülmemiştir. Dolgu duvar davranışını yansıtması istenen duvar numunesindeki bu sorun, deney düzeneğindeki çeşitli modifikasyonlarla aşmaya çalışılmıştır. Yine de deney numunelerinin, dolgu duvar yerine taşıyıcı yığma duvar davranışını temsil ettiği ve deney sonuçlarının buna göre değerlendirilmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.

CFRP ile dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin güçlendirilmesi çeşitli yönleriyle İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda ele alınmakta olan bir konudur. Gerçekleştirilen ön çalışmada tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme bir çerçeve, çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiş ve daha sonra çerçevede gerekli onarım yapıldıktan ve dolgu duvarın her iki yüzüne yapıştırılan CFRP ile güçlendirilmesinden sonra yeniden test edilmiştir, (Karadoğan ve Yüksel, 2001). Bu ön numunenin uygulamasında, öncelikle CFRP şeritlerin yapıştırılacağı bölgelerdeki sıva kaldırılmıştır. Daha sonra CFRP dolgu duvarın yüzeyine diyagonalleri doğrultusunda tek kat olarak uygulanmıştır, Şekil 2.2. CFRP'nin yapıştırılmasında epoksi reçinesi kullanılmıştır. Ayrıca köşelere iki kat kare CFRP tabakaları yapıştırılarak, malzemenin dolgu duvara yeterince mesnetlenmesi sağlanmıştır. Bu ön deneyin sonuçları Şekil 2.3'teki diyagramda özetlenmiştir. Görüldüğü gibi dolgu duvarın CFRP ile güçlendirildiği durumda sistemin yatay yük taşıma kapasitesinde önemli miktarda artış olmaktadır. CFRP yapıştırılmış dolgu duvarlı çerçevenin yatay rijitliği, dolgu duvarsız çerçeve ve dolgu duvarlı çerçeveye göre çok yükselmektedir. Güçlendirilmiş numune, yatay yükün artması ile tuğlaların çekme dayanımı düşük olan yan yüzlerinin CFRP ile birlikte duvardan ayrılmasıyla göçmüştür, Şekil 2.4. Elde edilen sonuçlar, farklı parametrelere sahip numunelerin hazırlanması ve ön numunede gözlenmiş olan olumsuzlukların ortadan kaldırılması için çözümler tasarlanması için teşvik edici olmuştur.



Şekil 2.2 : CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).



Şekil 2.3 : Ön çalışma deney sonuçları, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).



Şekil 2.4 : CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesinin göçme şekli, (Karadoğan ve Yüksel, 2001).

Hanoğlu (2002), delikli kil tuğlalardan üretilmiş dolgu duvarların, sünek ve sünek olmayan betonarme çerçevelerin rijitlik ve dayanımlarına etkisini incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda, 1/3 ölçekli numuneler çevrimsel deprem yükleri etkisinde denenmiştir. Tek katlı-tek açıklıklı numuneler, alçak katlı dolgu duvarlı bir betonarme binanın en alt katında iç açıklıktaki bir çerçeve parçası prototip alınarak modellenmiştir. Dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız olmak üzere üretilen numunelerin dört adedi sünek, dört adedi ise sünek olmayan betonarme çerçevedir. Güçlendirilmek için seçilen numunelerde, GFRP ve CFRP olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, dolgu duvarları GFRP ve CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin dayanımının güçlendirilmemiş dolgu duvarlı numunelere göre arttığını göstermiştir. Güçlendirilmiş numunelerin yerdeğiştirme kapasiteleri ise düşmüştür. Çalışmanın teorik kısmında bir sonlu elemanlar çözüm yöntemi geliştirilmiş ve önerilen yöntem ile deney numuneleri için artımsal itme eğrileri elde

edilmiştir. Numunelerin artımsal itme eğrileri ile deneysel veriler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

El-Dakhkhni (2002), beton tuğla dolgu duvarları GFRP ile güçlendirilmiş çelik çerçevelerin tekrarlı yatay yükler etkisindeki davranışını 1/1 ölçekli numuneler kullanarak araştırmıştır. Çalışmanın deneysel bölümünde, öncelikle bir kısmı GFRP ile güçlendirilmiş 57 adet küçük dolgu duvar numunesi farklı yükleme şekillerinde denenmiştir. Bu numune deneylerinde, seçilmiş olan parametreler araştırılmış, sayısal çalışma için gerekli veriler toplanmış ve yapılmış olan gözlemlere göre sayısal çalışmada kullanılacak varsayımlar belirlenmiştir. Bu adımda araştırılmış olan parametreler, FRP tipi, uygulanan FRP katı sayısı ve FRP lif doğrultusudur. Bir sonraki aşamada 6 adet birebir ölçekli numune düzlemiçi tekrarlı yatay yükler etkisinde yer değiştirme kontrollu olarak denenmiştir. Bir adet numune dolgu duvarsız referans numunedir. Üç adet dolu dolgu duvarlı numuneden biri güçlendirilmemiş, birinin dolgu duvarının iki yüzü, diğerinin dolgu duvarının tek yüzü GFRP ile güçlendirilmiştir. Geri kalan iki numunenin dolgu duvarında simetrik yerleştirilmiş boşluk bulunmaktadır ve bunlardan biri güçlendirilmemiş diğeri ise GFRP ile güçlendirilmiştir. GFRP uygulaması, tüm duvar yüzeyine iki adet tek doğrultulu GFRP tabakanın üstüste yapıştırılması şeklindedir ve duvar üzerindeki GFRP'nin çerçeve ile bağlantısı yoktur. Deneysel sonuçlara göre GFRP ile güçlendirmenin kayma ve çekme şeklinde olan göçme modlarını önlediği gözlenmiştir. GFRP ile bu şekilde güçlendirmenin numunelerin yatay yük taşıma kapasitelerini arttırdığı ve duvarın stabilizasyonunu sağlayarak yük taşıma kapasitesi aşıldıktan sonraki davranışını geliştirdiği belirtilmiştir. Dolu dolgu duvarlarda iki yüzüne GFRP uygulamış numunenin yatay yük taşıma kapasitesi, güçlendirilmemiş numuneye göre %39 artmışken, boşluklu numunelerde bu artış %23 olmuştur. Çalışmanın deneysel bölümü ve bazı sonuçları El-Dakhkhni ve diğ. (2004)'de verilmiştir. Çalışmanın sayısal bölümünde, GFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çelik çerçeve numunelerin tekrarlı yükler etkisindeki davranışını analiz edebilmek için bir makromodel önerilmiştir. GFRP ile duvarları güçlendirilmiş numunelerde sadece 'köşe kırılması' göçme şeklini olduğu gözlemine dayanarak önerilen modelde, bu göçme şekline uygun hesaplama yöntemi açıklanmış ve sistemde diğer göçme şekillerinin engellenmesi için gerekli hesap ve kontrol adımları da verilmiştir. Modelde çelik çerçeve elemanları birer elastik çubukla, çerçeve düğüm noktaları

dönel yaylar ile ve dolgu duvarlar sadece basınç kuvveti taşıyan, doğrusal olmayan bir eşdeğer diyagonal çubuk ile modellenmiştir. Dolgu duvarı modelleyen eşdeğer çubuk için dört doğrusal kısımdan oluşan malzeme gerilme-şekildeğiştirme eğrisi önerilmiştir. Bu eğrideki gerilme ve şekildeğiştirme sınır değerleri duvarın GFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş olmasına bağlı olarak, deney sonuçlarına ve gözlemlerine göre tanımlanmıştır. Eşdeğer diyagonal çubukların gerilme ve şekildeğiştirme değerleri hesaplanırken, öngörülen “köşe kırılması” göçme şekline uygun olacak şekilde duvarın ortotropik özellik gösterdiği kabul edilmiştir. Buna göre değerlerin yüklenme yönüne uygun olarak açısız dönüşümü yapılması önerilmiştir.

Al-Chaar ve Lamb (2002), FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yük etkisindeki dayanım ve rijitliklerini tahmin etmek için bir hesap yöntemi önermişlerdir. Çalışmada öncelikle geometrik ve malzeme özelliklerini belirlemek için izlenecek yöntem açıklanmıştır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve elemanlarının hesabına değinilmiştir. Düzlemiçi yatay yük etkisindeki FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin artımsal itme analizi için bir hesap yöntemi önerilmiştir. Artımsal itme analizinde izlenecek adımlar ve bu adımlarda yapılacak varsayımlar açıklanmıştır. Analiz tam ve boşluklu dolgu duvarlar için yapılabilmektedir. Dolgu duvarlar uçları mafsallı eşdeğer çubuk olarak modellenmektedir. Eşdeğer çubuklar, çerçeve elemanları arasında eksantrik yerleştirilerek, taşıdıkları yük sadece kolonlara aktarılmaktadır. Eşdeğer çubuğun genişliği, duvar ile çerçevenin geometrik ve malzeme özelliklerine göre literatürde bulunan denklemler ile (Strafford-Smith ve Carter, 1969 ve Mainstone, 1971) hesaplandıktan sonra katsayılar ile modifiye edilerek kullanılmaktadır. Üç ayrı modifikasyon katsayısı kullanılmaktadır. Birinci katsayı ile duvardaki hasar durumu, ikinci katsayı ile ise duvarda boşluk bulunup bulunmaması dikkate alınmaktadır. Duvarın FRP ile güçlendirilmesinin etkisini eşdeğer çubuk genişliği hesabına yansıtan üçüncü katsayı ise FRP uygulama tipine ve tabaka sayısına bağlı olarak verilen çizelgeden seçilmektedir. Bu değerler sınırlı sayıdaki dolgu duvar numunesinin tekrarlı yükler altında denemesi ile elde edilmiştir. Eşdeğer çubuğun modelde kullanılan yük-değiştirme eğrisi için duvarın basınç ve kayma kırılması yük değerleri hesaplanarak, bunlarda küçük olanı seçilmektedir. Kayma kırılması yük değeri belirlenirken FRP ile güçlendirme etkisi katsayı ile gözönüne alınmaktadır. Bu

yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç kısmı, FRP ile gclendirme etkisi için hesaplanmış başka bir katsayı değeri ile modifiye edilerek kullanılmaktadır. Dolgu duvarların sadece bir eşdeğer çubuk ile modellenmesi halinde gerçek sisteminden daha esnek olacağı ve tam olarak ifade edemeyeceği gözönüne alınarak, analiz sonucu elde edilen artımsal itme eğrisini düzeltmek için bir yöntem verilmiştir. Bu yönteme göre artımsal itme eğrisi öncelikle iki doğru ile idealleştirilmekte ve daha sonra bu iki doğrunun eğimleri belirlenmiş yöntemlere göre deneysel sonuçlara uygun hale getirilmektedir. Yapılan düzeltme, eşdeğer çubuk genişliklerinin yeniden başka denklemler ile hesaplanması ve modelin en baştan bir kez daha kurulup üzülmesini gerektiği için oldukça zaman alan bir yöntemdir. Çalışmada nerilen artımsal itme analiz yöntemi uygulanması kolay bir yöntemdir. Ancak yöntemin bu tip sistemlerin analizinde genel olarak kullanılabilmesi için yapılan varsayımların dikkatlice incelenmesinin ve katsayıların gerekli deneyler yapılp yeniden hesaplanmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.

Akgüzel (2003), dolgu duvarları CFRP şeritler ile gclendirilmiş beş adet 1/3 ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme ereve numunesini yatay yükler etkisinde denemiştir. Ülkemizdeki yaygın yapısal kusurları temsil etmek amacı ile numunelerinin beton basınç dayanımları düşüktür, kat seviyelerinde kolon düşey donatıların eklerinde bindirme boyu problemi vardır ve yatay donatı düzenlenmesi yetersizdir. CFRP ile gclendirilmiş numunelerde yatay yük dayanımı ve enerji yutma kapasiteleri artmıştır. Gclendirilmiş numunelerde önemli bir rijitlik artışı gözlenmemiştir. Deneysel sonuçlara göre bu şekilde gclendirilmiş numuneler için göreli kat ötelemesi oranlarının %0.35-0.50 arasında sınırlandırılması gerektiği söylenmiştir.

Özcebe ve diğ. (2003), betonarme yapıların tuğla dolgu duvarlarının tümünün veya bir kısmının CFRP kullanılarak gclendirilmesini araştırmıştır. 1/3 ölçekli, iki katlı-tek açıklıklı yedi adet numune yatay yükler etkisinde denenmiştir. Numunelerde dolgu duvar elemanı olarak 1/3 ölçekli tuğlalar kullanılmıştır. Numuneler değişik CFRP uygulamaları ile gclendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, mevcut yapıların deprem güvenliklerinin arttırılması açısından irdelenmiştir.

Erol ve diğ. (2004), İT Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda betonarme yapıların farklı malzemelerden üretilen dolgu duvarlar ile gclendirilmesi amacı ile başlatılmış ve devam etmekte olan deneysel çalışmanın ikinci kısmını sunmuşlardır.

Bu çalışmada, $\frac{1}{2}$ ölçekli tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri çevrimsel yatay yükler altında denenmiştir. Ülkemizde betonarme yapılarda uygulamada sıkça rastlanan yapısal kusurlara sahip olan numunelerin dolgu duvarları farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Bir pilot numunenin dolgu duvarına CFRP ile güçlendirme yapılmıştır, Şekil 2.2. Diğer numunelerde ise dolgu duvarlar ile çerçeve arasında iki farklı yöntemle kayma kaması oluşturularak güçlendirme yapılmıştır. Numunelerin yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin yapısal modellenmesinde dolgu duvarların karakteristik özelliklerini deneysel olarak elde etmek için basit kayma deneyleri yapılmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı numunelerin dolgu duvarlarında kullanılan gevrek fabrika tuğlası ve yüksek mukavemetli tuğlalardan yapılmış duvar panelleri basit kayma etkisinde denenmiştir. Gevrek fabrika tuğlasından yapılmış duvar panelleri CFRP ile çeşitli şekillerde güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmanın devamında, bu çalışmanın deneysel bölümünde yeralan, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların basit kayma deneyleri ve dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneylerinin ilk aşaması yapılmıştır. Bu deneysel çalışmaların ilk aşamalarının ön sonuçları Karadoğan ve diğ. (2005) ve Erol ve diğ. (2005)'te özetlenmiştir. Bu çalışmaların devamında yeralan dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneylerinin ilk aşamalarının ön sonuçları Yüksel ve diğ. (2005) ve Erol ve diğ. (2006)'da sunulmuştur.

Erdem ve diğ. (2006), 2 adet $\frac{1}{3}$ ölçekli iki katlı-üç açıklıklı betonarme çerçeve numunesini çevrimsel yatay yükler etkisinde denemişlerdir. Numunelerden biri betonarme dolgu duvarlar ile güçlendirilirken, diğer numunenin gevrek fabrika tuğlası dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiştir. Numunelerin deneysel olarak elde edilen yatay yük taşıma kapasiteleri, rijitlik ve görelî kat ötelemesi oranı değerleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. İki güçlendirme yönteminin de etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca CFRP ankrajların miktarının ve etkinliğinin, CFRP ile güçlendirilmiş numunede yatay yük taşıma kapasitesini etkileyen önemli faktör olduğu söylenmiştir.

Binici ve Özcebe (2006), çeşitli deneysel çalışmalardan elde edilmiş verileri birlikte değerlendirmiş ve dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin sayısal hesabı için bir yapısal model önermişlerdir. Bu yapısal modele göre

güçlendirilmiş dolgu duvarlar bir diyagonal basınç ve bir diyagonal çekme çubuğu ile ifade edilmektedir. Bu şekilde modellenen betonarme çerçeve numunelerinin artımsal itme analizi eğrileri ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve önerilen modelin sistemin rijitlik, dayanım ve deformasyon kapasitesini belirlemede etkin olduğu söylenmiştir. Bu çalışmanın devamında Binici ve diğ. (2007), önceki çalışmada önerilmiş olan analitik modeli geliştirmiş ve dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş betonarme binaların yerdeğiştirme bazlı hesabında kullanılmak için basitleştirilmiş bir yapısal model önermişlerdir. Önerilen yapısal model ile örnek bir bina çözülerek, sonuçlar tartışılmıştır.

Almusallam ve Al-Salloum (2007), dolgu duvarları GFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve numunelerin çevrimsel düzlemiçi yatay yükler etkisindeki davranışını deneysel bir çalışma ile incelemiş ve elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Dolgu duvarları beton tuğla elemanlar ile örülmüş olan iki numuneden biri GFRP ile güçlendirilmiştir. İkinci numune önce dolgu duvarda diyagonal çatlaklar gözleninceye kadar denenmiş, daha sonra çatlaklara epoksi enjeksiyon uygulanması ve GFRP şeritler ile güçlendirilerek göçmeye kadar yeniden yüklenmiştir. Dolgu duvarların iki yüzüne GFRP şeritler yatay olarak uygulanmış ve GFRP şeritler ile çerçeve elemanlar arasında bağlantı yapılmamıştır. Deney sonuçlarına göre bu şekilde yapılan güçlendirmenin yatay yük kapasitesini ve sünekliği arttırdığı ve çerçeve ile dolgu duvarın bir bütün olarak davranmasını sağladığı söylenmiştir.

6 Mart 2007 tarihinde yürürlüğe giren "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik" in 7F maddesinde dolgu duvarların güçlendirilmesi için yöntemler verilmiştir, (DBYBHY, 2007). 7F maddesinin üçüncü başlığında 'dolgu duvarların lifli polimerler ile güçlendirilmesi' ile ilgili esaslar bulunmaktadır. Burada 'lifli polimer' olarak isimlendirilen malzeme FRP'dir. Bu tip güçlendirmenin uygulanma esasları ve yapısal modelde temsili açıklanmıştır. Yönetmeliğin ilgili güçlendirme yöntemi için verdiği bilgilerin ve sınırlamaların özeti ve tartışması Bölüm 2.5'te verilmiştir.

Atmaca (2008), on adet 1/3 ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesini çevrimsel yatay yükler etkisinde denemiştir. Numunelerin dolgu duvarları CFRP ile çeşitli şekillerde güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmada dolgu duvarın genişliğinin yüksekliğine oranındaki değişimin, güçlendirilmiş ve

güçlendirilmemiş numunelerin rijitlik, dayanım, enerji yutma kapasitesi ve sünekliğine etkisi incelenmiştir. CFRP ile güçlendirmenin yatay yük taşıma kapasitesini ve enerji yutma kapasitesini önemli miktarda arttırdığı söylenmiştir. Çalışmanın teorik kısmında, eşdeğer basınç çubukları ile modellenen dolgu duvarlar için bir gerilme-şekildeğiştirme modeli önerilmiş ve deney verileri ile kalibre edilmiştir.

Altın ve diğ. (2008), 1/3 ölçekli dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş 10 adet betonarme çerçeve numunesini çevrimsel yatay yükler etkisinde denemiştir. Tek katlı-tek açıklıklı numunelerde dolgu duvarların *genişlik/en* oranı 1.73'tür. Bu deneysel çalışmada CFRP şeritlerin genişliklerinin ve farklı uygulama şekillerinin etkisi araştırılmıştır. Buna göre üç farklı genişlikteki CFRP çapraz şeritler dolgu duvarların sadece iç yüzüne, sadece dış yüzüne ve her iki yüzüne de olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmıştır. Deney sonuçları yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve göreceli kat ötelemesi oranlarına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. CFRP ile güçlendirmenin yatay yük kapasitesini ve rijitliği önemli miktarda arttırdığını ve dolgu duvarın iki yüzüne CFRP uygulanmasının tek yüze uygulamaya göre daha etkili olduğunu söylenmiştir. Gözlenen göçme şekilleri ve bunlara karşı gelen sınır değerler de verilmiştir.

2.3 Dolgu Duvarların Modellenmesi

Dolgu duvarların modellenmesi konusunda yapılmış bir çok araştırma vardır. Bu çalışmaların tarihi 1950'lere dayanmaktadır. Taşıyıcı sistem elemanlarının birer çubuk ile temsil edildiği makromodellerde, duvarı çerçeve içinde eşdeğer bir veya daha çok sayıda çubuk ile modellemek sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Duvar eşdeğer çubuğunun yapısal modelinin kurulması için gerekli karakteristik parametrelerin belirlenmesi için yapılmış birçok öneri vardır. Duvar ve çerçevenin geometrik özellikleri, birbirlerine göre rijitlik oranları, malzeme özellikleri gibi değişkenler bu parametreleri etkilemektedir. Dolgu duvarın iki ucu mafsallı bir çubuk ile temsil edilmesi halinde duvar-çerçeve arasında kayma kuvvetleri ve moment aktarımının doğru modellenemediği araştırmacıların dikkatini çekmiş ve bu kuvvet aktarımlarının da modellere yansıtılması için çalışmalar yapılmıştır.

Düzlemi içinde yatay yüklere maruz dolgu duvarların eşdeğer çubuk ile modellenmesini ilk olarak Polyakov (1956) önermiştir. Benjamin ve Williams

(1958), deneysel çalışma ile dolgu duvarların genişliklerinin yüksekliklerine oranının sistemin yatay yük taşıma ve rijitlik değerleri üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Dolgu duvarların eşdeğer çubuk olarak modellenmesi için bilinmesi gereken en önemli özelliği eşdeğer çubuğun genişliğidir. Dolgu duvar eşdeğer çubuk genişliği bir çok deneysel ve teorik çalışmada incelenmiştir. Bu değerlendirmelerde üç tip yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda eşdeğer çubuk genişliği dolgu duvarın diyagonal boyuna bağlı ifade edilmiştir. Holmes (1961), eşdeğer çubuk genişliğini duvar diyagonal boyunun üçte birine, Paulay ve Priestley (1992) ise diyagonal boyun dörtte birine eşit almışlardır. Diğer iki yaklaşımda eşdeğer çubuk genişliği, dolgu duvar ve çerçeve elemanların arasında olan temas yüzeyi uzunluğuna bağlı hesaplanmaktadır.

İkinci yaklaşımda Stafford-Smith (1962 ve 1966) ve Stafford-Smith ve Carter (1969) dolgu duvar-çerçeve temas yüzeyi uzunluğu için bir denklem geliştirmişlerdir. Bu denkleme göre temas uzunluğu, duvarın ve çerçeve elemanın elastisite modüllerine, duvarın yüksekliğine, kalınlığına ve diyagonalinin yatayla yaptığı açıya bağlıdır. Bu çalışmalarda eşdeğer çubuk genişliği de duvarın genişlik ve yükseklik oranına (Stafford-Smith, 1962) ve temas uzunluğuna (Stafford-Smith, 1966) bağlı ifade edilmiştir. Sözü edilen bu çalışmalarda geliştirilen dolgu duvar-çerçeve elemanı temas uzunluğu denklemi bundan sonra gelen birçok çalışmada temel alınmıştır. Mainstone (1971) yaptığı deneysel çalışmanın sonuçlarından yola çıkarak eşdeğer çubuk genişliği için ampirik denklemler önermiştir. Halen kullanılmakta olan bu denklemlerde, Stafford-Smith ve Carter (1969) tarafından geliştirilen temas uzunluğu parametresi ' λh ' yeralmaktadır. Hendry (1981), dolgu duvar ile kolon ve kiriş elemanlar için ayrı ayrı elde edilen temas uzunluklarını değerlendirerek hesapladığı eşdeğer çubuk genişliği denkleminde yine ' λh ' parametresini kullanmıştır. Flanagan (1999) ise Stafford-Smith ve Carter (1969) tarafından verilen temas uzunluğu denklemini geliştirerek hesaba ampirik bir çarpan eklemiştir.

Dolgu duvar eşdeğer çubuk genişliği hesabında üçüncü yaklaşımda, Saneinejad ve Hobbs (1995), dolgu duvar-çerçeve elemanı temas uzunluğu için çerçeve elemanlarının moment taşıma kapasitesi, duvar kalınlığı ile yüksekliği ve dolgu duvar basınç dayanımına bağlı bir denklem geliştirmiştir. Eşdeğer çubuğun genişliği temas uzunluğu ve dolgu duvar geometrisine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Çalışmada ayrıca deney sonuçlarına ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerine

dayalı olarak geliştirilmiş bir analiz yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, düzlemiçi yatay yükler etkisindeki beton veya yığma dolgu duvarlı çelik çerçevelerin analizi için kullanılmaktadır. Önerilen modelde, dolgu duvarın sınırlı sünekliği dikkate alınarak, dolgu duvarlı çerçevelerin dayanımını, rijitliğini ve dolgu duvarların diyagonal çatlama yükü tahmin edilebilmektedir. Ayrıca dolgu duvar-çerçeve elemanı ara yüzeyinde dikdörtgen gerilme blokları etkiltilerek duvar-çerçeve elemanı kuvvet aktarımı hesaba alınmaktadır.

Bu çalışma daha sonra yapılmış olan birçok araştırma için de kaynak olmuştur. Madan ve diğ. (1997), dolgu duvarı sadece basınç taşıyan iki eşdeğer çubuk olarak alan bir makromodel önermişlerdir. Duvarın gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, Saneinejad ve Hobbs (1995) tarafından yapılmış çalışmaya dayanan iki yük ve iki rijitlik parametrelerine bağlı olarak iki doğru ile idealleştirilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan hesabın bilgisayar programı kullanılarak yapılması için bir yük-şekildeğiştirme eğrisi modeli önerilmiştir. Yük-şekildeğiştirme eğrisinde dolgu duvarın akmadan sonra yük kapasitesi ile rijitliğindeki azalma ve duvardaki çatlakların açılıp kapanma etkileri de hesaplanabilmektedir.

El-Dakhkhni ve diğ. (2003), ise beton yığma duvarlı çelik çerçevelerde duvarı üç adet eşdeğer çubuk ile modelleme yoluna gitmişlerdir. Dolgu duvarın tek bir çubuk ile temsil edilmesi halinde, çerçevedeki eğilme momentleri ve kayma kuvvetlerinin temsili açısından yetersiz kaldığı düşüncesinden geliştirilen modelde, çok katlı çok açıklıklı sistemlerde, duvarların birbirleri ile etkileşimini de dikkate alınabildiği söylenmiştir. Eşdeğer dolgu duvar çubuklarının özellikleri Saneinejad ve Hobbs (1995) tarafından önerilen denklemler kullanılarak geliştirilmiştir.

Yığma duvarlar ile dolgu duvarların FRP ile güçlendirilmesini deneysel çalışmalar ile ve tüm yapı sistemini modelleyen makromodeller ile inceleyen çalışmaların yanısıra, bu tip sistemleri eleman düzeyinde modelleyen mikromodellerinin önerildiği araştırmalar da mevcuttur. Marfia ve Sacco (2001), FRP ile güçlendirilmiş donatılı yığma elemanların davranışlarını mikromekaniksel inceleyen bir boyutlu elasto-plastik hasar modeli önermişlerdir. Çalışmada donatılı yığma yapı elemanın davranışını inceleyebilmek için bir homojenleştirme tekniği geliştirilmiştir. FRP'nin gevrek göçmesi dikkate alınarak, artan yükler altında yığma elemandan ayrılması da modellenmiştir. Donatılı yığma kirişlerin davranışın incelenmesi için uygun olan bu model aynı zamanda donatılı yığma duvarların iki veya üç boyutlu modellenmesi için

fikir vermektedir. Önerilen model, dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde dolgu duvarın sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi durumunda uygulamak için seçilebilir.

Gabor ve diğ. (2006), FRP ile güçlendirilmiş duvarların basit kayma etkisindeki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir. Farklı şekilde güçlendirilmiş üç adet duvar numunesinin basit kayma deneyleri yapılmış ve deney sonuçları sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların sonlu elemanlar ile modellenmesi durumunda önemli bir kaynaktır.

2.4 Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Taşıyıcı yığma duvarların yatay yük dayanımının, sünekliğinin ve rijitliğinin artırılmasını sağlamak için FRP ile güçlendirilmesi konusu detaylı şekilde araştırılmıştır. Bu tip sistemlerin göçme şekillerinin belirlenmesi, değişik FRP uygulama şekillerinin etkisi, FRP'nin ankraj şekilleri bir çok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmiştir. Güçlendirilmiş sistemin davranışını modelleyebilmek için farklı modeller önerilmiştir. Bu çalışmaların değerlendirilmesi ile FRP ile güçlendirilen yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin ve rijitliklerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Çatlak genişlikleri sınırlı kalmakta ve duvarın gevrek göçmesi önlenmektedir. Ayrıca duvar göçtüktan sonra bile FRP, duvarın dağılmasını sağlayarak çevreye zarar vermesini engellemektedir. Artan yük adımlarında FRP duvardan ayrılmakla birlikte yük taşımaya devam etmektedir. FRP'nin çevre elemanlara uygun şekilde ankre edilmesi ile bu özelliğinden yararlanılabileceği açıktır. FRP ile güçlendirilmiş yığma duvarlarda en zayıf bölge, duvar ile FRP'nin ara yüzeyidir. FRP'nin yük aktarma sınırını duvarın düşük çekme dayanımı belirlemektedir. Duvar yüzeyinden ayrılan FRP ile FRP'nin duvara bağlantısının sürdüğü bölge arasındaki kesit gevrek kopmaya sebep olabilmektedir.

Dolgu duvarlı çerçevelerde duvarların FRP ile güçlendirilmesi ise hala yeterince araştırılmamış bir konudur. Taşıyıcı yığma duvarlar için yapılmış araştırmalarından elde edilen bilgi ve önerilerden yararlanılarak, çalışma prensibi farklı olan dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük dayanımını, rijitliği ve sünekliği arttıran etkin ve ekonomik FRP uygulama yöntemleri ve bu yöntemlerin hesap modellerinin incelenmesi gerekmektedir.

Dolgu duvarlar ve taşıyıcı yığma duvarlar arasındaki bir diğer fark ise kullanılan tuğla elemanlardır. Ülkemizde dolgu duvarlarda yaygın olarak kullanılan ince cidarlı delikli tuğlalar, yığma duvarlarda ve farklı ülkelerde dolgu duvarlar için yapılmış araştırmalarda kullanılan tuğlalara göre daha gevrek ve basınç dayanımları düşüktür. Güçlendirilmiş dolgu duvarların yapısal modellerinin kurulmasında bu tip tuğlalar ile üretilmiş duvarlar için de deneysel veriler çoğaltılmalıdır.

Uygulamada dolgu duvarların çerçeve ile bağlantısına özen gösterilmemektedir. Duvar yüzeyine FRP uygulamak için mevcut sıvanın kaldırılması halinde tuğlaların ince olan cidarları hasar görmektedir. Bu sebeple FRP uygulamasının sıva üzerine yapılması daha gerçekçi bir çözüm olacaktır.

Özetlenen araştırmalar ve ön çalışmadan elde edilen sonuçlar, bu çalışmanın yönlendirilmesinde incelenecek değişkenlerinin seçilmesinde yol gösterici olmuştur. CFRP ile dolgu duvarlı çerçevelerin güçlendirilmesinde önemli etkenlerden birinin göçme şekli olduğu görülmektedir. Ön deneyde göçmenin tuğlaların düşük kayma dayanımları tarafından kontrol edildiği ve yatay yük artarken CFRP'nin duvardan ayrıldığı gözlenmiştir, Şekil 2.4. CFRP çekme kapasitesinin hepsinin kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Bu güçlüğün aşılabilmesi için CFRP'nin taşıdığı yükü kiriş ve kolonlara uygun bir şekilde aktarması gerekmektedir. Betonarme çerçeve ile duvarın bütünleştirilmesi ve dolgu duvarın her iki yüzüne yapıştırılan CFRP tabakalarının birbirine ankre edilerek, duvar yüzeyinden ayrılmadan çalışmasının sağlanması önemlidir. Bu amaçla CFRP tabakaları birbirlerine ve betonarme çerçeveye uygun detaylar ile bağlanması araştırılmıştır.

CFRP ile güçlendirme tekniğinde yaşanan bir diğer zorluk ise yön değiştiren yatay yükler etkisinde hem çekme hem de basınç kuvvetlerine maruz kalmalarıdır. Taghdi ve diğ. (2000)'nin büyük ölçekli beton ve tuğla yığma duvarların diyagonalleri doğrultusunda yerleştirilen çelik plakalar ile güçlendirilmesini incelediği deneysel çalışma, bu çekme ve basınç kuvvet çevrimlerinin etkisinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. Kullanılan malzeme farklı olmasına rağmen, güçlendirme tekniği burada önerilen çalışmaya çok yakındır. 220 mm enindeki çelik plakalar duvara kısa aralıkta, dübeller ile bağlı olmasına karşın, plakaları duvara bağlayan dübellerin arasında kalan açıklıklarda burkulma problemi olmuş ve göçme şeklini burkulma kontrol etmiştir, Şekil 2.5. CFRP uygulamasında şeritler epoksi ile duvara tam olarak bağlandığından dolayı burkulma problemi çelik plakalara göre çok

daha az olsa da, karbon lifler epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldığında gevrek özellik kazanmaktadır. Bu sebepten ileri yük adımlarında CFRP'nin duvardan ayrıldığı bölgeler zayıf noktalar yaratmaktadır. Bu da incelenmesi gereken bir konudur.



Şekil 2.5 : Çelik plakalar ile güçlendirilmiş yığma duvar numunesi ve göçme şekli, (Taghdi ve diğ., 2000).

2.5 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007

Bu bölümde “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de dolgu duvarların lifli polimerler ile (FRP) güçlendirilmesi hakkında yeralan düzenlemeler özetlenmiştir.

Betonarme binaların güçlendirilmesi başlığında dolgu duvarların güçlendirilmesi; “bodrum hariç en fazla üç katlı binalarda uygulanmak üzere, temel üstünden yukarıya kadar üst üste süreklilik gösteren betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarlarının rijitliği ve kesme dayanımının tanımlanan güçlendirme yöntemleri ile artırılması” olarak tanımlanmıştır.

İlgili yönetmelikte öncelikle, “Bölüm 7-Mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi”nde, depremde bina performansının doğrusal elastik olan ve olmayan yöntemler ile belirlenmesi kısmında, güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranları (r_s) ve görelî kat öteleme oranları verilmiştir, Çizelge 2.1.

Doğrusal elastik yöntem ile betonarme sünek elemanların hasar düzeylerinin belirlenmesinde, güçlendirilmiş dolgu duvarı kesitlerinin etki/kapasite oranları (r)

olarak ifade edilen sayısal değerler kullanılacaktır. l_{duvar} dolgu duvar uzunluğu ve h_{duvar} dolgu duvar yüksekliği olmak üzere, l_{duvar}/h_{duvar} oranı aralığı 0.5-2.0 olan güçlendirilmiş dolgu duvarların etki/kapasite oranı, deprem etkisinde hesaplanan kesme kuvvetinin kesme dayanımına oranıdır. Köşegen çubuklar ile modellenen güçlendirilmiş dolgu duvarlarında oluşan kesme kuvvetleri, çubuğun eksenel kuvvetinin yatay bileşeni olarak gözönüne alınacaktır. Güçlendirilmiş dolgu duvarlarının kesme kuvveti dayanımı hesabı ‘Bilgilendirme Eki 7F’de verilmiştir, (Bknz. Bölüm 2.5.1). Hesaplanan etki/kapasite oranları (r) Çizelge 2.1’de verilen sınır değerler (r_s) ile karşılaştırılarak elemanların hangi hasar bölgesinde olduğuna karar verilecektir. Betonarme binalardaki güçlendirilmiş dolgu duvarlarının hasar bölgelerinin belirlenmesinde ayrıca Çizelge 2.1’de verilen görel kat ötelemesi oranı sınırları da gözönüne alınacaktır. Görel kat ötelemesi oranı, ilgili katta hesaplanan en büyük görel kat ötelemesinin kat yüksekliğine bölünmesi ile elde edilecektir.

Çizelge 2.1 : Çizelge 7.5 - Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranları (r_s) ve görel kat ötelemeleri oranları, (DBYBHY, 2007).

l_{duvar}/h_{duvar} oranı aralığı 0.5-2.0	Hasar Sınırı		
	MN	GV	GÇ
Etki/Kapasite Oranı (r_s)	1	2	-
Görel Kat Ötelemesi Oranı	0.0015	0.0035	-

Depremde bina performansının doğrusal elastik olmayan yöntemlerle belirlenmesi durumunda ise güçlendirilen dolgu duvarlarda artımsal itme analizi ile görel kat ötelemeleri cinsinden hesaplanan şekildeğiştirme istemleri, 7.6.10’da tanımlanan şekildeğiştirme kapasiteleri ile karşılaştırılacaktır. Buna göre güçlendirilen dolgu duvarlarının, kendilerini çevreleyen kolon ve kirişlerle birlikte 7.6.4.6’ya göre modellenerek yapılan itme analizi sonucunda elde edilen görel kat ötelemesi oranları için izin verilen sınır değerler (kapasiteler) Çizelge 2.1’in ikinci satırında verildiği gibidir. 7.6.4’te verilen “Doğrusal elastik olmayan davranışın idealleştirilmesi” bölümüne göre güçlendirilen herhangi bir dolgu duvarı, ileriki bölümde gösterileceği üzere, kendisini çevreleyen kolon ve kirişlerle birlikte iki ucu mafsallı köşegen eşdeğer basınç ve/veya çekme çubuğu olarak idealleştirilecektir. Sadece eksenel kuvvet altında plastik şekildeğiştirme yapan elemanların plastik şekildeğiştirme

bölgelerinin uzunluğu, ilgili elemanın serbest boyuna eşit alınacaktır. İtme analizinde elasto-plastik (pekleşmesiz) bir eleman olarak modellenecek olan eşdeğer çubuğun başlangıçtaki doğrusal elastik davranışına ilişkin eksenel rijitliği ile eksenel akma dayanımı Bilgilendirme Eki 7F'e göre belirlenecektir. Duvar için tanımlanan kesme dayanımı, köşegen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel akma dayanımının yatay bileşenidir. Gereği durumunda, köşegen eşdeğer çekme çubuğunun akma dayanımı denklem (7F.6)'dan alınacaktır, (Bknz denklem (2.5)).

2.5.1 “Bilgilendirme eki 7F.3 : Dolgu duvarların lifli polimerler ile güçlendirilmesi” ve değerlendirilmesi

Bilgilendirme Eki 7F.3'te, (DBYBHY, 2007), uzunluğunun yüksekliğine oranı 0.5 ile 2.0 arasında olan dolgu duvarlarının rijitliği ve kesme dayanımının, duvar yüzüne uygulanan lifli polimerler (LP/FRP) ile arttırılabileceği söylenmiştir. İlgili bilgilendirme ekinde verilmiş olan açıklamalar aşağıda özetlenmiş ve değerlendirilmiştir.

“Mevcut çerçeve içinde basınç çubuğu oluşumu sağlanmalı ve çerçeveye yük aktarımı için gerekli ankrajlar düzenlenmelidir. Bunun için uygulamanın yapılacağı duvar yüzü ile çerçeve elemanlarının dış yüzü arasında en az 30 mm derinliğinde boşluk olması gerektiği, aksi halde bu tür duvar güçlendirmesi uygulanamayacağı söylenmiştir.”

Bu noktada hemen belirtmek gereklidir ki, mevcut binalarda mekandan ve sıva malzemesinden kazanç olması için dolgu duvarlar genel olarak çerçeve elemanın bir yüzüne sıfır (hemyüz) örülmektedir. Bu durumda mevcut binalarda böyle dolgu duvarların LP (FRP) ile güçlendirilmesi, dolgu duvarın yıkılıp bir daha üretimi koşulu dışında, mümkün olmayacaktır. Dolgu duvarın yıkılıp yeniden örülmesi halinde ise güçlendirme için lifli polimerlerin (FRP) seçilmesinin en önemli sebepleri olan kolay uygulama, kısa sürede güçlendirme ve bina sakinlerine en az rahatsızlık verme avantajları ortadan kaldırılmış olmaktadır.

“Yönetmeliğe göre köşegen lifli polimer şeritlerin detaylandırılması Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Köşe bölgelerde yük dağılımını sağlayabilmek ve betonarme çerçeve ile LP şeritler arasında yeterli sayıda ankraj

olmayacaktır. Ankraj deliğinin çapı 10 mm'den, derinliği ise 150 mm'den küçük olmayacaktır. Buna göre hazırlanan bir ankrajın çekme dayanımı olarak, 20 kN veya silikon çubuk etrafına sarılan LP'nin çekme kapasitesinin %30'undan küçük olanı olarak alınacaktır.”

Bu bölümde LP bulonların nasıl üretileceği detaylandırılmamıştır. Ayrıca LP ankrajların üretim detayları yeterince açık değildir ve yetersizdir. Örneğin hem LP bulonlar hem de LP ankrajlar için duvar üzerinde yelpaze şeklinde açılarak yayılması gereken uçların boyu için en küçük sınır verilmesi önemlidir.

Lifli polimerler ile güçlendirilen duvarlar aşağıda verilen esaslara göre yapı modeline katılacaktır, (DBYBHY, 2007). Lifli polimerler ile güçlendirilmiş dolgu duvarları yapı modelinde köşegen basınç ve çekme çubukları çifti ile temsil edilecektir. Basınç çubuklarının kalınlığı güçlendirilmiş dolgu duvarının kalınlığına eşittir. Genişliği (a_{duvar}) ise;

$$a_{duvar} = 0.175 (\lambda_{duvar} h_k)^{-0.4} r_{duvar} \quad (2.1)$$

ile hesaplanacaktır. Burada h_k kolon boyu, r_{duvar} dolgu duvar köşegen uzunluğudur. λ_{duvar} ;

$$\lambda_{duvar} = \left[\frac{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}{4E_c I_k h_{duvar}} \right]^{1/4} \quad (2.2)$$

ile hesaplanacaktır. Burada E_{duvar} dolgu duvar elastisite modülü, E_c çerçeve betonu elastisite modülü, t_{duvar} ve h_{duvar} güçlendirilmiş duvarın kalınlığı ve yüksekliği, I_k kolonun atalet momenti ve θ köşegenin yatay ile olan açısıdır. Köşegen basınç çubuk elemanının eksenel rijitliği (k_{duvar});

$$k_{duvar} = \frac{a_{duvar} t_{duvar} E_{duvar}}{r_{duvar}} \quad (2.3)$$

olarak hesaplanacaktır.

Kesme dayanımı; köşegen çubuğun eşdeğer basınç kuvveti dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilecektir. Yatay kesit alanı A_{duvar} , basınç dayanımı f_{duvar} ve

kayma dayanımı τ_{duvar} olan güçlendirilmiş dolgu duvarının kesme kuvveti dayanımı (V_{duvar});

$$V_{duvar} = A_{duvar}(\tau_{duvar} + f_{yd} \cdot \rho_{sh}) \leq 0.22 A_{duvar} f_{duvar} \quad (2.4)$$

ile hesaplanacaktır. Burada f_{yd} hasır donatının tasarım akma dayanımı, ρ_{sh} duvardaki yatay gövde donatılarının duvar brüt kesit alanına oranıdır.

Yukarıda verilen denklemlerde E_{duvar} , f_{duvar} ve τ_{duvar} için çeşitli tuğla türlerinden yapılan dolgu duvarlarında önerilen değerler Çizelge 2.2’de özetlenmiştir. Elastisite modülünün, basınç ve kesme dayanımlarının hesaplanmasında güçlendirilmiş duvarın kompozit kesit yapısı dikkate alınabilir.

Çizelge 2.2 : Çeşitli tuğla türlerinden yapılan dolgu duvarları için önerilen malzeme özellikleri, (DBYBHY, 2007).

	E_{duvar} (MPa)	f_{duvar} (MPa)	τ_{duvar} (MPa)
Boşluklu Fabrika Tuğlası	1000	1.0	0.15
Harman Tuğlası	1000	2.0	0.25
Gazbeton Blok	1000	1.5	0.20

Çekme çubuğunun çekme dayanımı (T_f);

$$T_f = 0.003 E_f w_f t_f \quad (2.5)$$

ile hesaplanacaktır. Çekme çubuğunun kesme dayanımı, çekme dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilecektir.

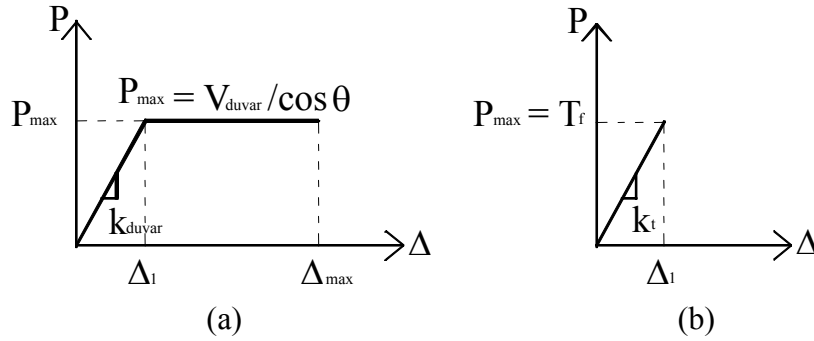
Çekme çubuğunun eksenel rijitliği (k_t);

$$k_t = \frac{w_f t_f E_f}{r_{duvar}} \quad (2.6)$$

olarak hesaplanacaktır. Bu denklemlerde E_f , w_f ve t_f sırasıyla lifli polimer şeritin elastisite modülü, genişliği ve kalınlığıdır. w_f değeri denklem (2.1) ile hesaplanan genişlikten daha büyük alınamaz.

İtme analizinde oluşturulan yapısal modelde, köşegen eşdeğer çubuk olarak idealleştirilmiş olan güçlendirilmiş dolgu duvarın elasto-plastik davranışının yukarıdaki açıklamalara göre temsili gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir. Burada P_{max}

eşdeğer basınç veya çekme çubuğunun aksenal akma dayanımını, Δ_I eşdeğer basınç veya çekme çubuğunun aksenal akma yerdeğiştirmesini ve Δ_{max} eşdeğer basınç çubuğunun en büyük kısalma yerdeğiştirmesini göstermektedir.



Şekil 2.7 : Yapısal modelinin itme analizinde, köşegen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları olarak idealleştirilmiş güçlendirilmiş dolgu duvarın elasto-plastik davranışı.

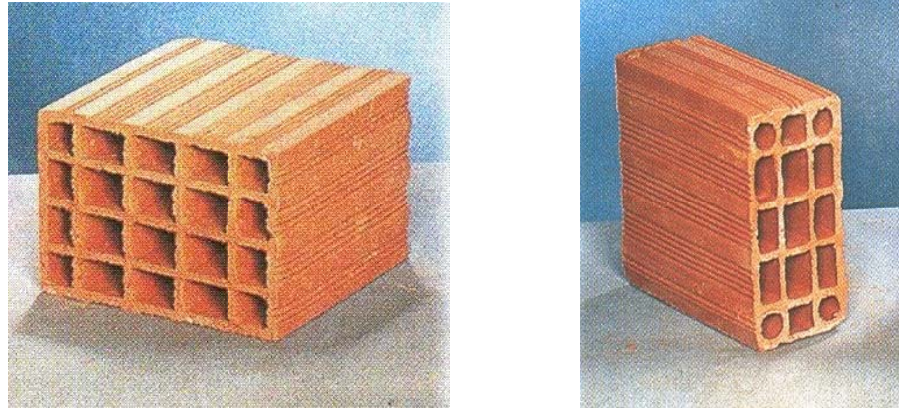
3. KÜÇÜK BOYUTLU NUMUNE DENEYLERİ

3.1 Malzeme Özellikleri

Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin ve dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin malzeme özellikleri bu bölümde verilmiştir.

3.1.1 Tuğla malzeme özellikleri

Dolgu duvar numunelerinin üretiminde TS EN 771-1 (2005) standartına uygun ‘Yatay delikli fabrika tuğlası’ kullanılmıştır. İnce cidarlı bu tip tuğlalar Türkiye’de dolgu duvarlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Numunelerinin üretimi için 135 mm ve 85 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta tuğla çeşidi seçilmiştir, Şekil 3.1. Boşluk oranları %60 olan tuğlaların diğer iki boyutu 190 mm, cidar kalınlıkları ise yaklaşık olarak 15 mm’dir. Üretici tarafından, tuğlaların deliklerine dik doğrultudaki basınç dayanımı yaklaşık 2.5 MPa, delikleri doğrultusundaki basınç dayanımı yaklaşık 10 MPa olarak verilmektedir. Basit kayma deneyi numunelerinde ve tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinde dolgu duvarlar, tuğlaların delikleri yatay harç tabakalarına paralel olacak şekilde üretilmiştir. İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinde ise 135 mm kalınlığındaki tuğlalar deliklerine dik doğrultuda ikiye kesilmiş ve dolgu duvarlar tuğlaların delikleri yatay harç tabakalarına dik olacak şekilde üretilmişlerdir.



Şekil 3.1 : Yatay delikli fabrika tuğlası.

3.1.2 Harç ve sıva malzeme özellikleri

Dolgu duvar numunelerinde harcın su:çimento:kireç:kum hacimsel karışım oranı 1:1:0.5:4.5'tir. Dolgu duvarlar yatay ve düşey harç kalınlıkları yaklaşık olarak 10 mm olmasına önem gösterilerek profesyonel işçiler tarafından üretilmiştir.

Basit kayma deneyleri numunelerinin bir kısmında ve tüm betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvarlarında sıva bulunmaktadır. Sıvanın su:çimento:kireç:kum hacimsel karışım oranları 1.25:1:0.5:4.5'dir. Tüm numunelerde sıva kalınlığı yaklaşık olarak 10 mm'dir.

Harç ve sıvaların basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla, dolgu duvar üretimi aşamasında her bir karışımdan küp numuneleri ve üçer adet standart silindir numunesi alınmıştır. Küp numuneler 70 mm x 70 mm x 70 mm boyutlarında ve silindir numuneler 300 mm yüksekliğinde, 150 mm çapındadır. Küp numunelerin deneysel olarak elde edilen basınç dayanımları aşağıda verilmiş olan denklemler kullanılarak 150 mm x 150 mm x 150 mm boyutlarındaki küp numunesi basınç dayanımı değerlerine çevrilmiştir.

$$k_1 = 0.56 + 0.697 / (0.00656a + (h/b)) , \quad k = k_1 \quad k_1 > k_2 \quad (3.1a)$$

$$k_2 = 0.56 + 0.697 / (0.00656b + (h/a)) , \quad k = k_2 \quad k_2 > k_1 \quad (3.1b)$$

$$f_{ck(150x150x150)} = f_{ck70} / k \quad (3.2)$$

Burada h numunenin yüksekliğini, a uzunluğunu ve b genişliğini mm cinsinden ifade etmektedir.

Bunlara ek olarak, üç noktalı eğilme deneyleri ile harç çekme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme deneylerinin sonucunda ikiye ayrılan numunelerin parçaları basınç etkisinde yeniden denenmiş ve bu sonuçlar harç ve sıva basınç dayanımlarının hesabına uygun şekilde ilave edilmiştir. Harç ve sıva numunelerinin üç noktalı eğilme deneyinden çekme dayanımı aşağıda verilmiş olan denklemler ile hesaplanmıştır.

$$W = (bh^2)/6 \quad (3.3)$$

$$M_{max} = (PL)/4 \quad (3.4)$$

$$f_{ctk}^* = M_{max} / W \quad (3.5)$$

$$h' = h - h_l \quad (3.6)$$

Burada P yükü, M_{max} en büyük moment değerini, b yükün etkidiği kesitin genişliğini, h numunenin yüksekliğini, h_l çentik yüksekliğini, W kesitin mukavemet momentini, L mesnetler arasındaki mesafeyi ve f_{ctk}^* çekme dayanımını ifade etmektedir.

Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar basit kayma deneyi numuneleri için Çizelge 3.1 ve tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri için, sırasıyla, Çizelge 3.2 ve 3.3'te sunulmuştur. Bu çizelgelerdeki f_{ck70} ; 70 mm boyutlu küp numunelerinin basınç dayanımını, f_{ck150} standart silindir numunelerin basınç dayanımlarını, f_b eğilme deneyi küplerinin basınç dayanımlarını ve f_{ck} ise bu değerler kullanılarak hesaplanmış olan numune basınç dayanımını göstermektedir. Ayrıca deneylerin üretimden itibaren kaçınıcı günde yapılmış olduğu ve standart sapma değerleri de verilmiştir.

3.1.3 Beton ve çelik malzeme özellikleri

Betonarme çerçeve numunelerinin üretimi aşamasında beton karışımlarından standart silindir numuneleri alınmış ve yukarıda anlatılan prosedür ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri için elde edilen malzeme deneyi sonuçları, sırasıyla, Çizelge 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerin üretiminde S220 sınıfı düz donatı kullanılmıştır. Bu numunelerde kolon ve kiriş boyuna donatılarının çapı 16 mm, kiriş tablasındaki boyuna donatılarının çapı 10 mm, etriyelerin çapı ise 6 mm'dir. Donatıların çekme deneylerinden elde edilen malzeme özellikleri Çizelge 3.6'da özetlenmiştir. Burada f_y ve f_{max} , sırasıyla, donatının akma ve kopma dayanımını, E_s elastisite modülünü ve ε_{su} kopma şekildeğiştirmesini göstermektedir.

İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin üretiminde kiriş ve kolonlarda 12 mm çapında S220 sınıfı düz donatı kullanılmıştır. Bu malzemenin deneysel elde edilen gerilme-şekildeğiştirme değerleri Şekil 3.2'de, karakteristik değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Basit kayma deneyi numunelerinin harç ve sıva malzeme özellikleri.

		Küp numuneler		Standart silindir numuneler		Eğilme küp numuneleri		BASINÇ DAYANIMI	
	Numune Adı	Deney günü	f_{ck70} [MPa]	Deney günü	f_{ck150} [MPa]	Deney günü	f_b [MPa]	Standart sapma	f_{ck} [MPa]
Harç	S1	664	9.94	-	-	664	12.28	0.82	8.56
	S2	652	7.02	-	-	-	-	0.33	5.75
	S3-S4	424	8.68	659	14.81	424	8.57	1.12	6.94
	S5-S6	671	9.80	671	12.81	671	8.34	1.80	6.55
	S7-S8	701	9.40	675	12.89	701	10.61	1.70	7.16
	S9-S10	641	5.85	653	8.53	641	6.46	0.89	4.80
	S11-S12	634	7.80	632	6.75	634	6.05	0.91	5.82
	S13-S14	752	7.20	752	11.08	-	-	2.17	4.44
	S15-S16-S17	695	14.85	695	13.29	695	13.29	0.93	11.50
	S18	736	8.96	736	12.40	736	7.40	1.59	6.21
	S19-S20	681	12.68	681	12.02	681	11.07	1.18	9.28
	S21-S22-S23	566	7.20	566	16.66	566	12.65	3.86	5.18
	S24-S25	292	6.00	292	7.79	292	5.47	1.05	3.93
	S26-S27	551	5.48	551	9.80	-	-	2.91	2.71
	S28	661	2.08	-	-	-	-	0.24	1.70
	S29-S30-S31	28	5.61	28	4.86	-	-	0.21	4.60
	S32-S33-S34	28	4.87	28	4.56	-	-	0.54	3.87
Sıva	S1-S15-S17-19	448	22.45	471	11.44	448	16.42	2.71	14.59
	S2-S8	632	12.54	-	-	632	9.37	1.70	8.22
	S5	463	11.52	-	-	463	8.72	1.37	6.58
	S6	155	10.26	160	6.90	-	-	1.18	7.27
	S10-S23-S26	137	5.15	137	8.85	137	3.98	1.36	2.98
	S27-S28	137	5.15	137	8.85	137	3.98	1.36	2.98
	S21-S22-S24	152	6.45	152	9.95	152	4.63	1.85	3.23
	S29-S30-S31	28	3.73	28	3.83	-	-	0.50	3.20
	S32-S33-S34	28	3.15	28	3.27	-	-	0.61	2.49

Çizelge 3.2 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvar harç ve sıva malzeme özellikleri.

	Numune Adı	Numune Adı							
		Numune N1		Numune N2		Numune N3		Numune N4	
		Harç	Sıva	Harç	Sıva	Harç	Sıva	Harç	Sıva
Küp numuneler	f_{ck70} [MPa]	2.67	4.90	4.95	4.87	-	2.88	4.17	3.42
	Deney günü	28	28	529	28	-	201	700	28
Standart silindir numuneler	f_{ck150} [MPa]	7.01	-	-	-	10.62	5.44	-	-
	Deney günü	28	-	-	-	28	201	-	-
Eğilme küp numuneleri	f_b [MPa]	-	28	6.00	-	-	3.30	4.10	-
	Deney günü	-	4.06	529	-	-	201	700	-
BASINÇ DAYANIMI	f_{ck} [MPa]	4.34	3.37	4.12	3.95	10.05	2.25	3.36	1.30
	Standart sapma	1.33	0.48	0.94	0.62	0.44	0.98	0.49	0.70
EĞİLME DAYANIMI	f_{ctk*} [MPa]	-	1.21	1.5	-	2.17	0.51	0.76	-
	Deney günü	-	448	529	-	760	201	700	-

Çizelge 3.3 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin dolgu duvar harç ve sıva malzeme özellikleri.

Numune Adı		Küp numuneler		Standart silindir numuneler		BASINÇ DAYANIMI	
		Deney günü	f_{ck70} [MPa]	Deney günü	f_{ck150} [MPa]	Standart sapma	f_{ck} [MPa]
IC-0	Harç	28	2.03	28	1.96	0.31	1.73
	Sıva	28	5.90	28	5.11	0.16	4.90
IL-0	Harç	28	4.66	28	4.88	0.81	3.84
	Sıva	28	2.05	28	2.39	0.59	1.64
IC-C1	Harç	28	1.56	28	1.60	0.31	1.21
	Sıva	28	2.38	28	3.07	0.89	1.93
IL-C1	Harç	28	3.29	28	3.26	0.45	2.67
	Sıva	28	3.09	28	2.65	0.08	2.54
IC-C2	Harç	28	1.98	28	1.90	0.22	1.61
	Sıva	28	3.36	28	3.36	0.90	2.21
IL-C2	Harç	28	3.07	28	3.36	0.49	3.45
	Sıva	28	1.50	28	1.66	0.28	1.30

Çizelge 3.4 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin beton malzeme özellikleri.

Numune Adı	Deney günü	Numune Sayısı	Standart Sapma	Basınç Dayanımı f_{ck} [MPa]
Dolgu Duvarsız Numune-1	28	3	0.26	11.61
	713	3	1.00	12.15
Dolgu Duvarsız Numune-2	28	1	-	14.23
	178	3	0.89	16.27
Dolgu Duvarlı Numune N1	28	3	0.06	15.78
	513	3	0.40	17.61
Numune N2	7	3	0.92	10.28
	28	3	1.78	10.77
Numune N3	7	3	2.02	9.80
	28	3	2.68	12.99
Numune N4	28	3	0.98	16.70
	726	3	0.52	20.50

3.1.4 FRP malzeme özellikleri

Dolgu duvar numunelerinin güçlendirilmesinde üç tip karbon lifli elyaf (CFRP) kullanılmıştır. CFRP tiplerinin üretici firma tarafından verilmiş olan mekanik özellikleri toplu olarak Çizelge 3.7’de verilmiştir.

CFRP şeritler, dolgu duvar numunelerinin üzerine epoksi esaslı reçine kullanılarak yapıştırılmıştır. Epoksi reçinesi iki farklı bileşenden oluşmaktadır. A ve B adı verilen

bu bileşenler üreticinin belirttiği oranlarda karıştırılıp hazırlanmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan iki tip epoksi esaslı reçinenin üretici firma tarafından verilmiş olan mekanik özellikleri Çizelge 3.8’de özetlenmiştir.

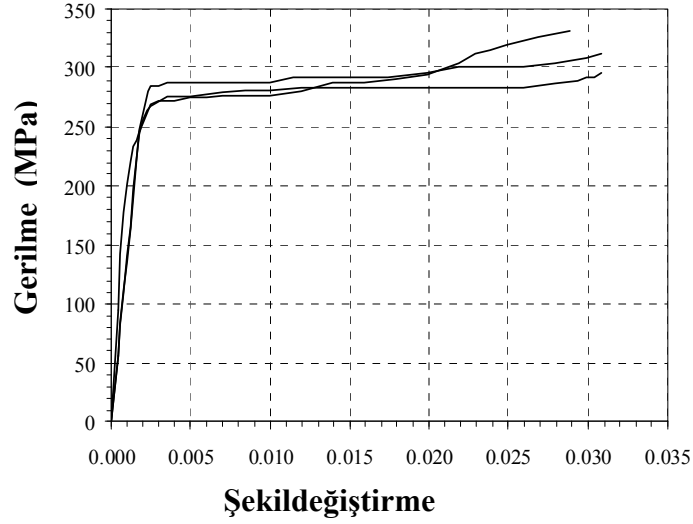
CFRP ile güçlendirme uygulamasında, öncelikle numunelerin yüzeyleri temizlenmiş ve uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Epoksi yapıştırıcısı karıştırılarak hazırlanmış ve CFRP şeritlerinin yapıştırılacağı yüzeye sürülmüştür. CFRP şeritler duvar yüzeyine yerleştirilmiş ve özel rulo ile düzeltilerek, epoksi reçinesinin lifler arasına tam olarak yayılması ve hava boşluklarının çıkarılması sağlanmıştır. Son bir kat epoksi reçinesi daha sürülerek uygulama tamamlanmış ve kürünü alması için uygun koşullarda 7 gün bırakılmıştır.

Çizelge 3.5 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin beton malzeme özellikleri.

Numune Adı	Deney günü	Numune Sayısı	Standart Sapma	Basınç Dayanımı f_{ck} [MPa]
BC-0	28	3	1.42	13.96
	412	1	-	20.53
BL-0	28	3	0.53	8.62
	377	2	0.32	10.69
IC-0	7	3	0.31	9.03
	28	3	0.18	11.30
IL-0	28	3	2.68	11.60
	189	3	2.73	18.39
IC-C1	7	3	0.55	8.34
	28	3	0.55	10.03
IL-C1	28	3	0.53	8.62
	377	2	0.32	10.69
IC-C2	7	3	1.45	24.20
	28	3	3.27	21.55
IL-C2	28	3	2.36	12.16
	189	3	0.83	21.71

Çizelge 3.6 : Betonarme çerçeve numuneleri donatılarının malzeme özellikleri.

Donatı Çapı	f_{yk} [MPa]	f_{max} [MPa]	ϵ_{su}	E_s [MPa]
$\phi 6$	324.5	480.5	0.35	86500
$\phi 10$	290.0	450.0	0.30	70000
$\phi 12$	273.4	437.3	0.29	143752
$\phi 16$	270.0	420.0	0.25	50000

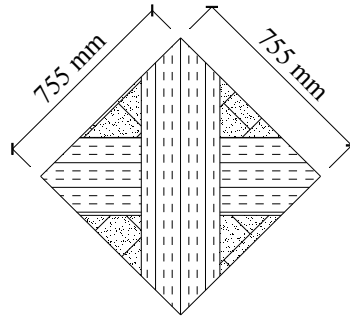


Şekil 3.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri donatısının gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.

3.2 Basit Kayma Deneyleri

Basit kayma deneylerinde, dolgu duvar numuneleri 45° döndürülerek düşey basınç kuvveti etkisinde monotonik olarak yüklenmiştir, Şekil 3.3. Numuneler göçmeye kadar zorlanmış ve doğrusal olmayan bölgede kayma dayanımlarının ve duvar kayma rijitliklerinin değişimi saptanmıştır.

Tek katlı ve iki katlı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerin üretimi için parametrelerin seçiminde ve yapısal modellerinin kurulması aşamasında dolgu duvarlar için gerekli büyüklüklerin bu deneysel verilerden ve gözlemlerden faydalanılarak elde edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.3 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunesi boyutları.

Çizelge 3.7 : FRP malzeme özellikleri.

CFRP Tipi	CFRP Ticari Adı	Lif Tipi	Lif Doğrultusu	Dokuma Ağırlığı $\pm \%10$ (g/m ²)	Lif Yoğunluğu (g/cm ³)	Dokuma Tasarım Kalınlığı (mm)	Liflerin Çekme Dayanımı (Nominal) (MPa)	Liflerin Çekme E-Modülü (Nominal) (MPa)	Kopmadaki Uzama (Nominal) (%)
CFRP No.1	SikaWrap-230C	Orta mukavemetli karbon lifleri	0° (Tek yönlü)	230	1.76	0.131	4300	238000	1.8
CFRP No.2	SikaWrap-200C			200	1.79	0.111	3900	230000	1.5
CFRP No.3	SikaWrap-100C (VP)			100	1.79	0.056	3900	230000	1.5

Çizelge 3.8 : Epoksi esaslı reçinenin malzeme özellikleri.

Epoksi Reçinesi Tipi	Ticari Adı	Karışım Oranı A:B (ağırlıkça)	Viskozite (23° C'da)	Uygulama Sıcaklığı (yüzey ve ortam sıcaklığı)	Çekme Mukavemeti (MPa) (23°C'de 7 günlük)	E-Modülü		Kopmadaki Uzama (%)
						Eğilme (MPa)	Çekme (MPa)	
Epoksi-1	Sikadur-330	4:1	~6000 mPas (Kesme oranı 50/s)	+10° C - +35° C	30	3800	4500	0.9
Epoksi-2	Sikadur-331 WVP IL	59:41	~46.3 mPas (Kesme oranı 5/s)	+10° C - +30° C	4	1500	1000	0.4

3.2.1 Dolgu duvar numuneleri

Basit kayma deneylerinde 31 adet dolgu duvar numunesi farklı parametrelerin incelendiği 3 grup halinde denenmiştir. Boyutları 755 mm x 755 mm olan dolgu duvar numunelerinin tuğla, harç ve sıva malzeme özellikleri Bölüm 3.1.1 ve 3.1.2’de açıklanmıştır. Bütün basit kayma deneyi numunelerinde dolgu duvarlar, tuğlaların delikleri yatay harç tabakalarına paralel olacak şekilde üretilmiştir.

3.2.1.1 Birinci grup dolgu duvar numuneleri

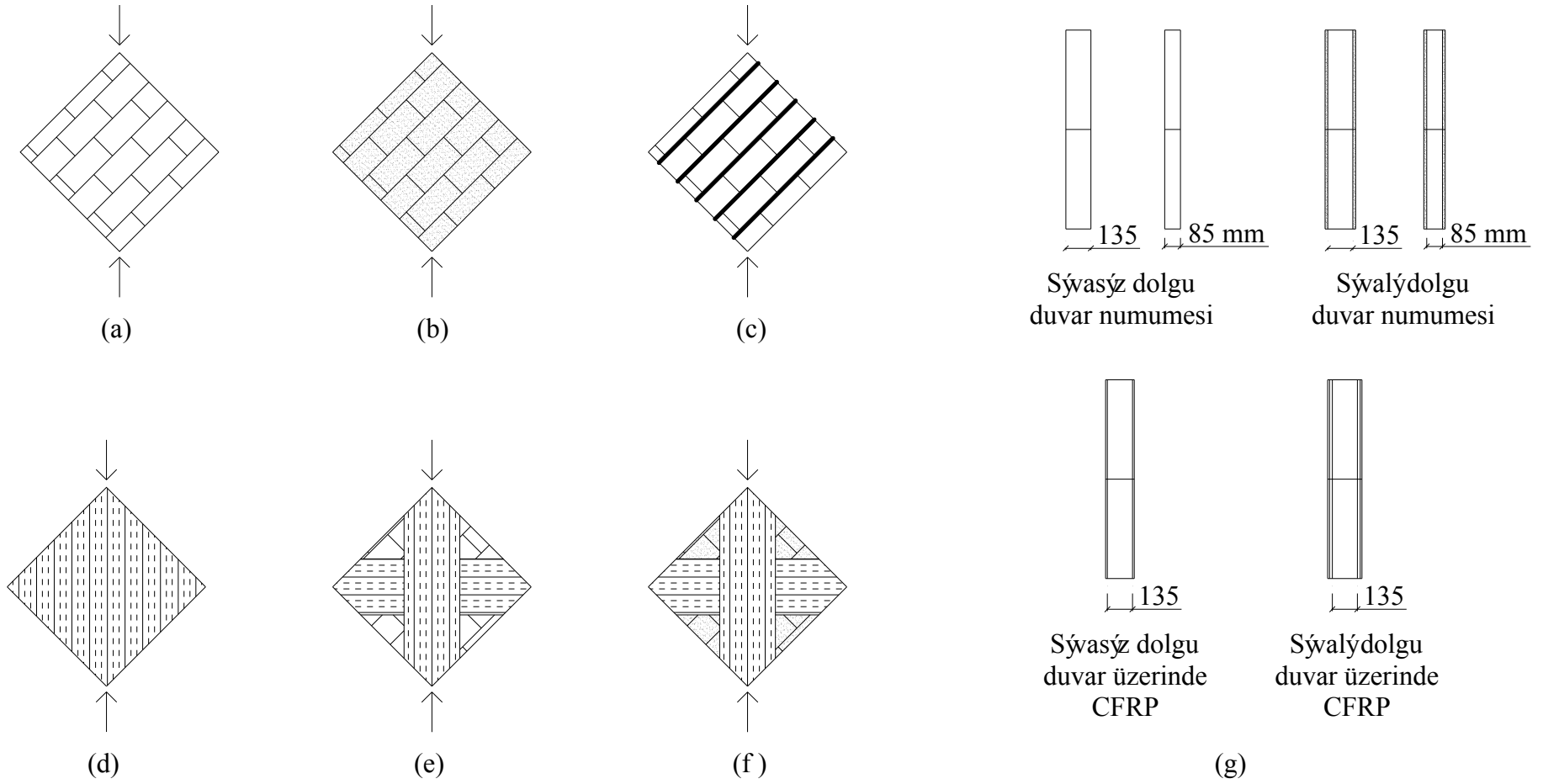
Basit kayma deneylerinin birinci grubunda 20 adet dolgu duvar numunesi denenmiştir. Numune üretimi aşamasında öncelikle üç parametre seçilmiştir. Birinci parametre dolgu duvar kalınlığıdır. Bu amaçla numune üretiminde 135 mm ve 85 mm olmak üzere iki farklı kalınlıktaki tuğla tipi kullanılmıştır, Şekil 3.1.

Uygulama esnasında gevrek ince cidarlı tuğlalar ile örülmüş dolgu duvar üzerindeki mevcut sıvanın kaldırılması halinde yaşanan güçlükler dikkate alınarak, CFRP şeritlerin sıvasız ve sıvalı duvar yüzeyine uygulanması ikinci parametre olarak seçilmiştir. Bu grup dolgu duvar numunelerinin bir kısmında CFRP güçlendirmesi sıvasız, diğerlerinde ise sıvalı numune yüzeylerine uygulanmış ve etkisi araştırılmıştır.

Üçüncü parametre CFRP şeritlerin numune üzerine uygulandığı yüzey alanıdır. Bu grupta iki farklı yüzey alanı seçilmiştir. İlk uygulamada numunenin tüm yüzeyi CFRP ile kaplanırken, ikincisinde dolgu duvar yüzeyine yapıştırılan CFRP şerit 300 mm genişliğindedir.

Numunelerin güçlendirmesinde, CFRP şeritler dolgu duvar numunelerinin her iki yüzeyine de uygulanmıştır. CFRP şeritler, dolgu duvar numunelerinin iki diyagonalı üzerine birer kat olmak üzere, lifleri diyagonal doğrultuda olacak şekilde yapıştırılmıştır. Ayrıca bir kısım numunede üretim aşamasında CFRP şeritler sürekli olan harç katmanının içerisine yerleştirilmiştir.

Birinci grup dolgu duvar numunelerinin güçlendirilmesinde CFRP No.1 ve Epoksi-1 kullanılmıştır, Çizelge 3.7 ve 3.8. Bu grup numunelerinin özelliklerinin şematik gösterimi Şekil 3.4 ve numune çeşitlerinden örneklerin fotoğrafları Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Birinci grupta yeralan sıvasız (a), sıvalı (b), harç katmanına CFRP şerit yerleştirilmiş (c), tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış (d), 300 mm genişliğinde CFRP ile güçlendirilmiş sıvasız (e) ve sıvalı (f) dolgu duvar numunelerinin ve kesitlerinin (g) şematik gösterimi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.5 : Birinci grupta yeralan sıvasız (a), sıvalı (b), tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış sıvasız (c), 300 mm genişliğinde CFRP ile güçlendirilmiş (d) ve tüm yüzeyine CFRP yapıştırılmış sıvalı dolgu duvar numuneleri.

3.2.1.2 İkinci grup dolgu duvar numuneleri

Birinci grup dolgu duvar numunelerinin deney verilerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) eğrileri ve göçme şekilleri incelenerek, 7 adet numuneden oluşan ikinci grup dolgu duvar numunesi üretilmiştir.

Birinci grup numunelerin deney sonuçlarına göre CFRP şeritlerin harç tabakasına yerleştirildiği güçlendirmenin yük taşıma kapasitesine önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Bu sebepten ikinci grup dolgu duvar numunelerinde bu güçlendirme şekli uygulanmamıştır.

İlk grup deney sonuçları sıvalı numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve başlangıç rijitliklerinin sıvasız numunelere göre oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. Buna göre ikinci ve üçüncü grup dolgu duvar numunelerinin hepsinin yüzeyi sıvanmıştır ve CFRP sıva üzerine yapıştırılmıştır.

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin ön deneyinde, sistemin göçme modunu kontrol eden ana etmenin ince cidarlı tuğla elemanların gevrek davranışı olduğu gözlenmiştir. Bu numunede tuğla elemanların cidarlarında kayma dayanımına ulaşıldıktan sonra CFRP şeritler duvar yüzeyinden ayrılmış ve sistem göçmeye gitmiştir. CFRP'nin duvar yüzeyinden ayrılmasını engellemek ve sistem göçmeye gidene kadar olumlu etkilerinden yararlanabilmek amacı ile daha sonra üretilen betonarme çerçeve numunelerde dolgu duvarın her iki yüzündeki CFRP şeritler birbirlerine CFRP'den yapılmış ankrajlar ile bağlanmıştır. CFRP ankrajların etkinliğini incelemek için ikinci grup dolgu duvar numunelerinde CFRP ankrajların varlığı ilk parametre olarak seçilmiştir.

Bu grupta incelenen ikinci parametre CFRP şeritlerin genişliğidir. Dolgu duvar numuneleri güçlendirilirken 300 mm, 150 mm ve 100 mm olmak üzere üç farklı genişlikte CFRP şeritler uygulanmış ve ekonomik, etkin bir çözüm bulmak amacıyla etkileri incelenmiştir. Herbir genişlik için iki numune üretilmiş ve bunlardan birinde iki yüzdeki CFRP şeritler birbirine CFRP ankrajlar ile bağlanmıştır.

CFRP ankraj kullanılan dolgu duvar numunelerinde ankrajları yerleştirmek için öncelikle duvara beş adet delik delinmiş ve delikler temizlenmiştir. Uygun ölçülerde kesilen CFRP parçalar liflerine paralel doğrultuda sarılmış ve epoksiye doyurularak, uçları duvar yüzeyinden 100'er mm dışarıda kalacak şekilde, deliklere yerleştirilmiştir. Bundan sonra dışarıda kalan uçlar açılarak dolgu duvar yüzeyine

dairesel olarak yayılmış ve epoksi ile yapıştırılmıştır. Herbir CFRP ankraj, duvarın iki yüzeyindeki birbirine bağladığı CFRP şeritlerle aynı genişlikte olacak şekilde üretilmiştir.

İkinci grup dolgu duvar numunelerinin hepsi 135 mm kalınlığında tuğla ile üretilmiştir. Güçlendirilmelerinde CFRP No.2 ve Epoksi-1 kullanılmıştır. İkinci grup numunelerin tüm çeşitleri Şekil 3.6’da ve numunelerin güçlendirilme aşamaları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

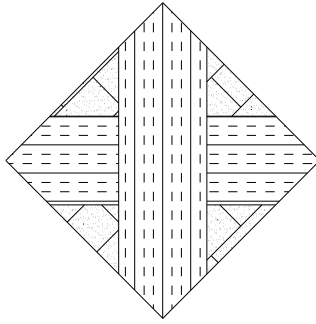
3.2.1.3 Üçüncü grup dolgu duvar numuneleri

Dolgu duvar numunelerinin üçüncü grubunda altı adet numune üretilmiştir. Bu grupta incelenen parametreler, ilk iki grupta kullanılan farklı mekanik özellikleri olan CFRP ve epoksi tiplerinin kayma dayanımına ve rijitliğe olan etkisidir. Bu gruptaki numunelerin hepsi 135 mm kalınlığındaki tuğla ile üretilmişler ve güçlendirme duvarın her iki yüzüne sıva üstüne uygulanmıştır.

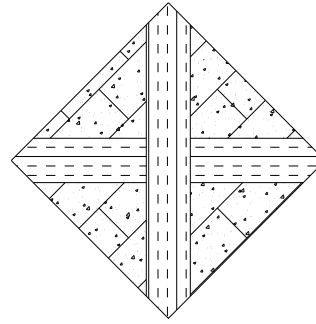
Üçüncü grupta, iki adet dolgu duvar numunesi yeni tip CFRP No.3 ile güçlendirilmiştir. 300 mm genişliğindeki CFRP şeritler duvarın her iki diyagonalı doğrultusunda yapıştırılmışlardır, Şekil 3.8. Yapıştırıcı olarak Epoksi-1 kullanılmıştır.

Diğer dört adet dolgu duvar numunesinin, ikinci grupta da kullanılmış olan CFRP No.2 ile güçlendirilmesi ve yapıştırıcı olarak yeni tip Epoksi-2 kullanılması tasarlanmıştır. Bu numunelerde CFRP şeritlerin 300 mm genişliğindedir. İki numunede duvarın iki yüzündeki CFRP şeritlerin, CFRP ankrajlar ile bağlanması kararlaştırılmıştır. Diğer iki dolgu duvar numunesinde ise CFRP ankrajları yoktur, Şekil 3.8.

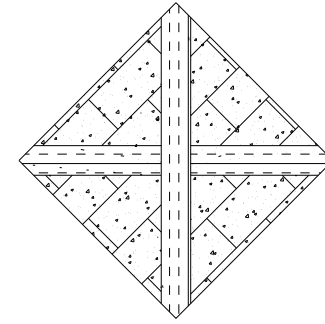
Epoksi-2 kullanılarak üretilen ilk numune S29’nin üretiminden bir gün sonra epoksinin kürünü tam olarak almadığı ve CFRP’nin duvar yüzeyine yapışmadığı gözlenmiştir, Şekil 3.9. Bu durumda numunenin üzerindeki CFRP tamamen sökülmüş ve duvar yüzeyi temizlenmiştir. Bu problemin sebebinin anlaşılması için epoksi saklama ve uygulama ortamı koşulları incelenmiştir. Epoksi-2’nin viskozitesi, Epoksi-1’inkinden daha yüksektir.



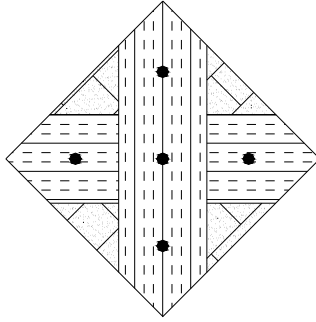
(a)



(c)

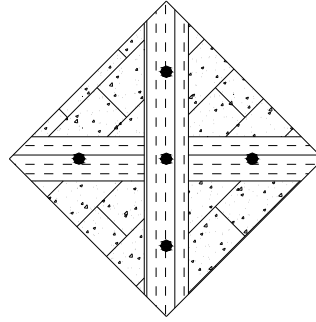


(e)



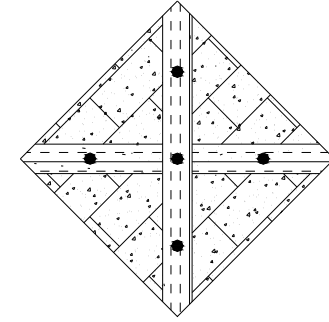
CFRP ankraj elemanlarıvar

(b)



CFRP ankraj elemanlarıvar

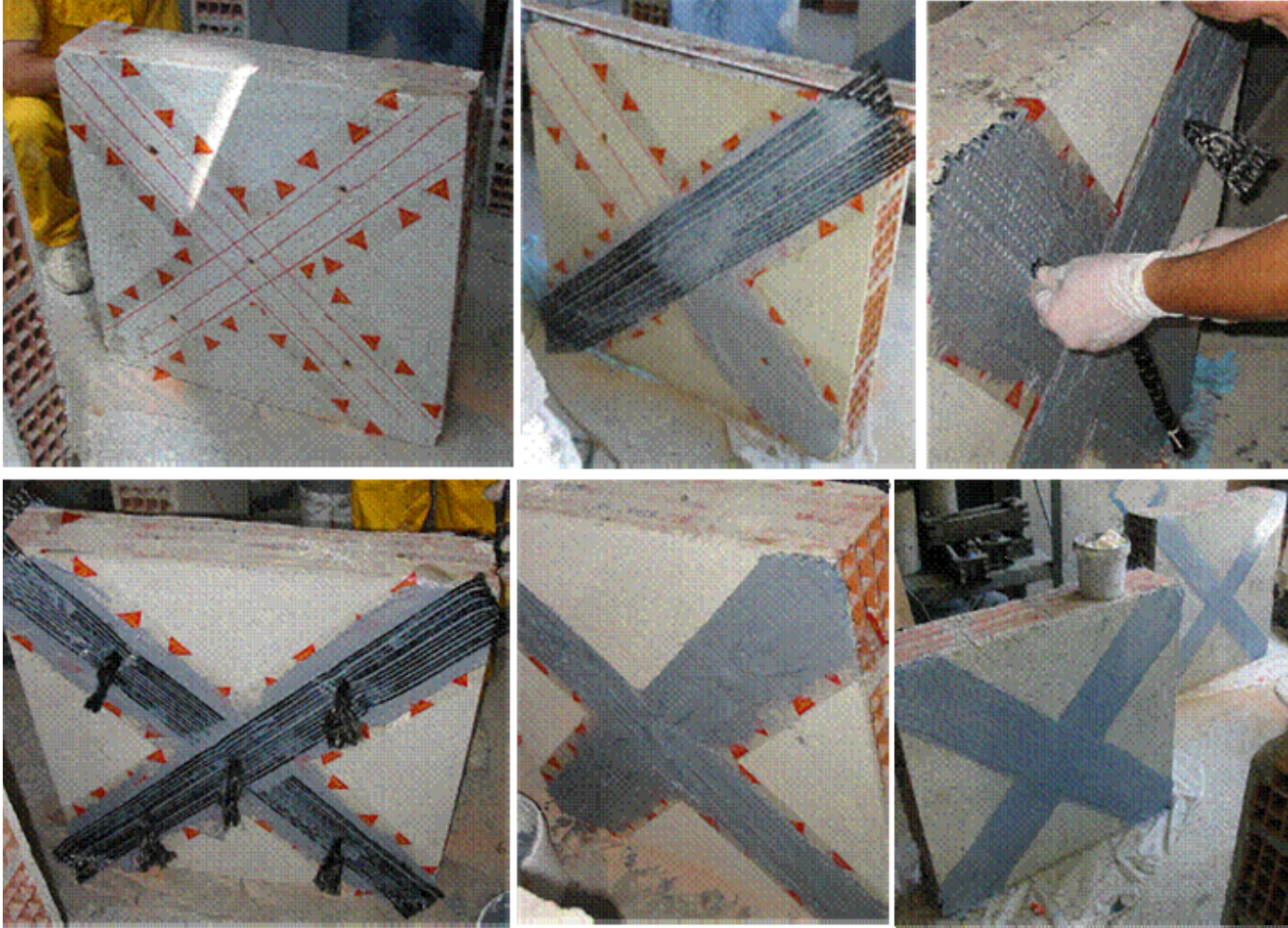
(d)



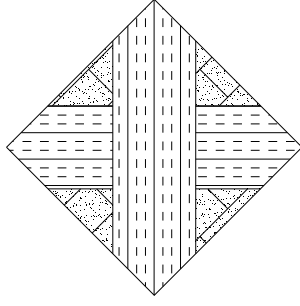
CFRP ankraj elemanlarıvar

(f)

Şekil 3.6 : İkinci grupta yeralan 300 mm (a, b) 150 mm (c, d) ve 100 mm (e, f) genişliklerinde CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı dolgu duvar numunelerinin şematik gösterimi.

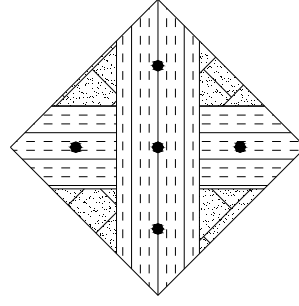


Şekil 3.7 : İkinci grup dolgu duvar numunelerinin güçlendirilme aşamaları.



300 mm genişliğinde CFRP
ile güçlendirilmiş sıvalı dolgu
duvar numuneleri
CFRP ankraj kullanılmamış

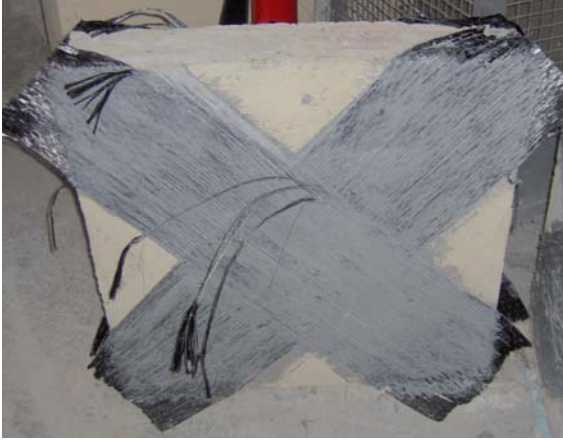
(a)



300 mm genişliğinde CFRP ile
güçlendirilmiş sıvalı dolgu
duvar numuneleri
CFRP ankraj kullanılmış

(b)

Şekil 3.8 : Üçüncü grup dolgu duvar numuneleri S29, S30, S33, S34'ün (a) ve S31, S32'nin (b) şematik gösterimi.



Şekil 3.9 : Üçüncü grup dolgu duvar numunesi S29'un ilk güçlendirilmesi.

Epoksi saklama ve güçlendirme koşulları kontrol altında tutularak, üretici firmadan teknik olarak deneyimli bir uzman ile S30 numunesinin güçlendirmesi yapılmıştır. Epoksinin yüzeye ve CFRP liflerinin arasına yeterli miktarda ve eşit bir şekilde yayılmasına özellikle dikkat edilmiştir. Alınan önlemlere karşı S30 numunesinin kürünü alması için gerekli sürenin sonunda Epoksi-2'nin prizini almasında ve aderansında sorun olduğu tespit edilmiştir. Bu koşullar altında S30 ve yeniden güçlendirilen S29 numunelerinin denenmesine karar verilmiştir. Epoksi-2 kullanılarak üretilecek olan S31 ve S32 numunelerinin güçlendirmesinin yapılmasından vazgeçilmiştir.

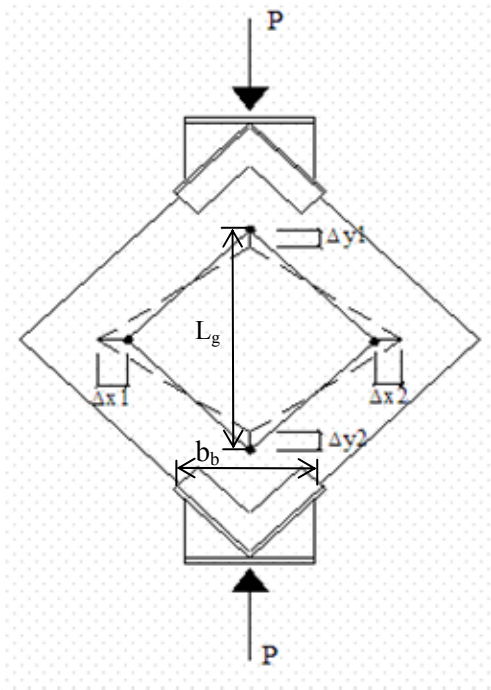
Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin her üç grubundaki numunelerin özellikleri toplu olarak Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin özellikleri.

İsim	Numune Tipi	Grup	Duvar kalınlığı (mm)	CFRP Güçlendirme				P_{ult} (kN)	Δ_{ult} (mm)
				CFRP tipi	CFRP genişliği (mm)	CFRP ankraj	Epoksi Tipi		
S25	S-5	1	135	-	-	-	-	71	0.91
S4	S-1			-	-	-	-	-	-
S9	S-2			-	-	-	-	68	0.59
S16	S8-1		85	-	-	-	-	66	1.15
S18	S8-2			-	-	-	-	77	0.94
S11	SL-1			135	CFRP No. 1	Harç tabakasına yerleştirilmiş	-	Epoksi-1	85
S12	SL-2		-				82		0.85
S13	SL-3		-				122		0.77
S14	SL8-1		85				73		0.77
S2	SS-1		135	-	-	-	-	134	0.77
S6	SS-2			-	-	-	-	224	1.11
S8	SS-3			-	-	-	-	207	0.81
S22	SS-4	2	-	-	-	-	190	0.55	
S15	SS8-1	85	-	-	-	-	212	1.23	
S17	SS8-2		-	-	-	-	207	1.18	
S7	SW-1	1	135	CFRP No. 1	Tüm yüz kaplı	-	Epoksi-1	221	2.25
S19	SSW-1				-	-		384	1.06
S1	SSW30-1			300	-	Epoksi-1		281	1.24
S5	SSW30-2				-			386	0.75
S10	SSW30-3	-	199		0.60				
S21	SSW30A	Var	212		0.79				
S28	SSW15	2	135	CFRP No. 2	150	-	Epoksi-1	190	0.61
S24	SSW15A				Var	197		0.98	
S27	SSW10			CFRP No. 2	100	-		103	0.36
S26	SSW10A			Var	142	0.39			
S33	SSW30Z-1	3	135	CFRP No.3	300	-	Epoksi-1	257	1.00
S34	SSW30Z-2			-		203		0.66	
S29	SSW30E-1			CFRP No. 2		-	Epoksi-2	193	0.69
S30	SSW30E-2					-		167	1.19
S31	SSW30E-A1					Var		-	-
S32	SSW30E-A2					Var		-	-
Numune tiplerindeki kısaltmalar : 1. S: Numune, 2. S: Sıvalı numune, W: CFRP uygulaması tüm numune yüzeyinde, W30/15/10: CFRP uygulaması 300/150/100 mm genişliğinde, Z : CFRP No.3 kullanılmış, 8: Numune kalınlığı 85 mm, A : CFRP ankraj, E : Epoksi-2 kullanılmış, P_{ult} : Yük taşıma kapasitesi, Δ_{ult} : P_{ult} değerindeki düşey yerdeğiştirme.									

3.2.2 Deney yükleme ve ölçüm düzeneği

Basit kayma deneylerinde dolgu duvar numuneleri 45° döndürülerek düşey basınç kuvveti etkisinde monotonik olarak yüklenmiştir, Şekil 3.10. ASTM C 1391-81 (1981) standartında tarif edilen deney metodunda, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneylerden kazanılan tecrübeye dayanılarak, bazı değişiklikler yapılması ile uygulanan deney tekniği kuvvet kontrollüdür, (Erol, 2001).



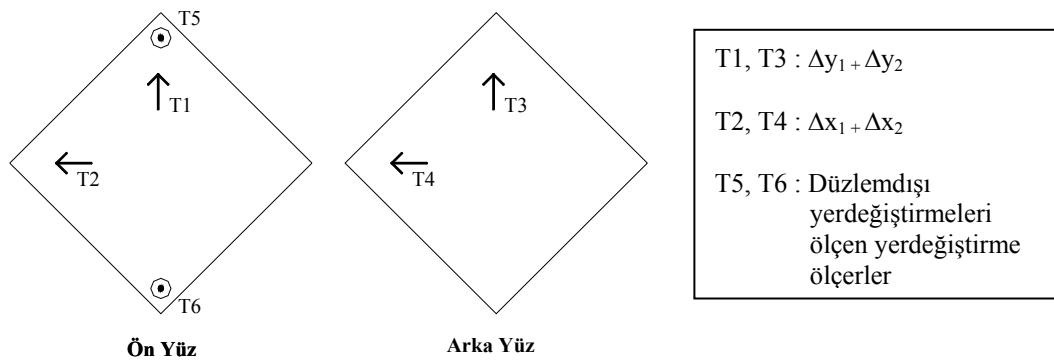
Şekil 3.10 : Basit kayma deneyi düzeneği.

Dolgu duvar numunesine düşey yük uygulayabilmek amacı ile İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda özel bir deney çerçevesi üretilmiştir, Şekil 3.10. Dolgu duvar numunesinin deneye hazırlanması aşamasında ilk olarak numune 45° döndürülerek deney için özel üretilmiş olan çelik başlığın içerisine yerleştirilmiştir. Bu aşamada çelik başlıkların içerisine alçı konularak, numunenin düşeyde gönyesinde olması ve başlık ile arasında boşluk kalmaması sağlanmıştır. Numunenin üstüne yerleştirilen çelik başlığında yatayda gönyesinde olması sağlandıktan sonra çelik başlık ve yükleme çerçevesi arasına hidrolik krika ve yük ölçer yerleştirilerek yükleme düzeneği hazırlanmıştır.

Yükleme 500 kN kapasiteli bir hidrolik krika ile yapılmış ve yük değerleri 500 kN kapasiteli bir yük ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Yükleme adımları, yükleme hızı

sabit tutulmaya çalışılarak, 10 kN’luk artımlar ile uygulanmıştır. Numunenin düşey yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) eğrilerinde doğrusal olmayan bölgeye ulaşıldığında, doğrusal olmayan davranışı daha detaylı gözlemleyebilmek amacı ile yük artımları 5 kN’a düşürülmüştür. Herbir yükleme adımı üçer kez uygulanmıştır.

Dolgu duvar numunelerinin düşey ve yatay yerdeğiştirmeleri, numunenin her iki yüzüne yerleştirilen dört adet 5 mm kapasiteli LVDT yerdeğiştirme ölçer kullanılarak ölçülmüştür, Şekil 3.11. Numunelerin düzlemdışı hareketini kontrol edebilmek amacı ile iki adet 10 mm kapasiteli LVDT yerdeğiştirme ölçer ile düzlemdışı yerdeğiştirmeler de ölçülmüştür.



Şekil 3.11 : Basit kayma deneyi ölçüm düzeneği.

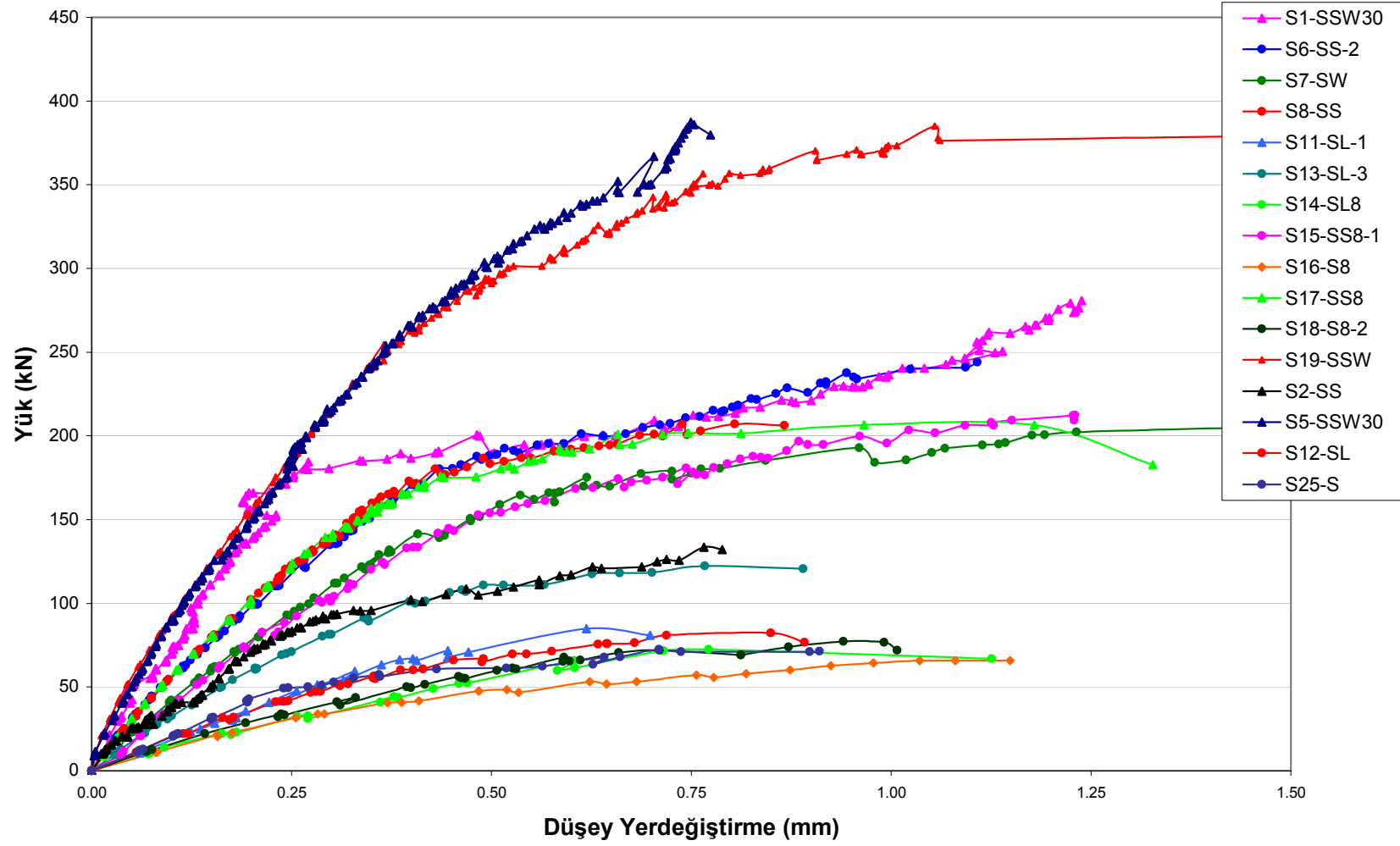
Herbir düşey yük artımında, yük ölçer ve yerdeğiştirme ölçerler ile ölçülen değerler veri toplayıcı (data logger) ile bilgisayara aktarılmış ve özel bir bilgisayar programı kullanılarak kaydedilmiştir. Her yükleme adımında çatlak oluşumları ve deney sonunda numunenin göçme şekli detaylı olarak kaydedilmiş ve fotoğrafları çekilmiştir.

3.2.3 Deney sonuçları

Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin düşey yük kapasitesi (P_{ult}) ve buna karşı gelen düşey yerdeğiştirme değerleri (Δ_{ult}) Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Birinci grup dolgu duvar numunelerinin düşey yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) eğrileri toplu olarak Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu eğrilerin, göçme şekillerinin ve deneysel gözlemlerin değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sıvasız dolgu duvar numunelerinde duvar kalınlığındaki azalmanın düşey yük taşıma kapasitesini etkilemediği gözlenmesine rağmen, 85 mm

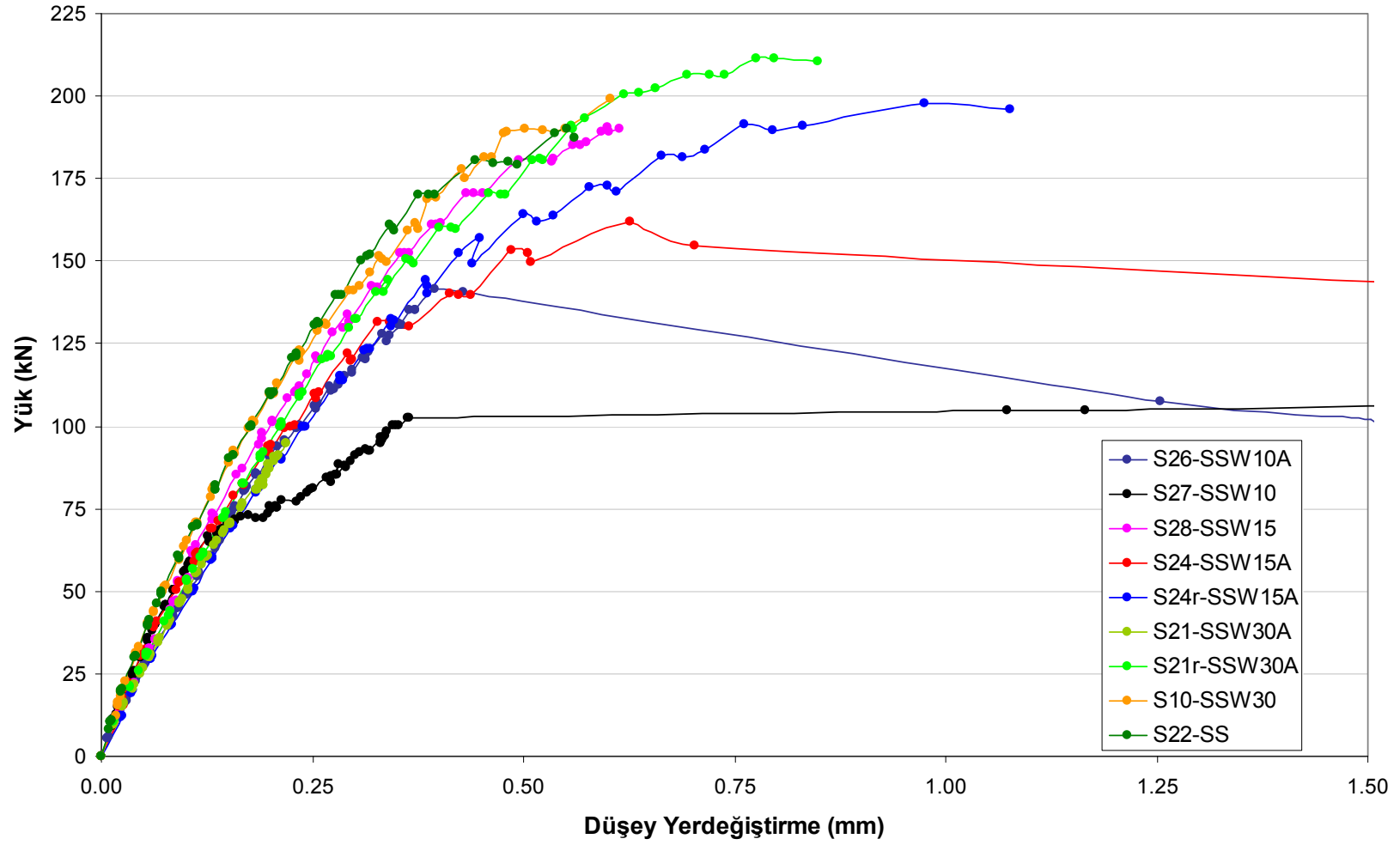


Şekil 3.12 : Birinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.

kalınlığındaki numunelerin başlangıç rijitlikleri 135 mm kalınlığındaki numunelerden daha düşüktür. Duvar kalınlığındaki değişim sıvalı numuneler için benzer etkiyi yapmamıştır. Sıvalı numunelerde, başlangıç rijitliği değerini etkileyen esas faktörün sıvanın basınç dayanımı ve kalınlığı olduğu gözlenmiştir.

- Sürekli harç tabakalarına CFRP yerleştirilerek yapılan güçlendirmenin, başlangıç rijitliği ve yük taşıma kapasitesine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu tip güçlendirmede göçme bir harç tabakası boyunca duvarın kayması ile olmuş, böylece duvarın parçalanmasını önlemiştir.
- Sıvalı dolgu duvar numunelerinin başlangıç rijitliği değerleri sıvasız numunelerin başlangıç rijitliği değerlerinden oldukça yüksektir. Sıvalı numunelerin düşey yük taşıma kapasiteleri, sıvasız numunelerin düşey taşıma kapasitelerinin 2.5 katına kadar çıkmaktadır.
- CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı ve sıvasız numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve başlangıç rijitlikleri güçlendirilmemiş numunelere göre önemli miktarda artmıştır.
- CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numunenin başlangıç rijitliği, güçlendirilmiş sıvasız numuneye göre çok daha büyüktür. CFRP'nin sıvalı yüzeye uygulandığı numunelerde, büyük düşey yük değerlerine kadar sıva ve CFRP'nin ayrılmadan birlikte çalıştığı gözlenmiştir. Bu değerlendirmelere göre daha sonra üretilen dolgu duvar numunelerinde CFRP uygulamasının sıvalı yüzeye yapılmasına karar verilmiştir.
- 300 mm genişliğinde CFRP şeritler ile güçlendirilmiş numuneler ile tüm yüzeyi CFRP ile kaplanmış numunenin $P-\Delta$ eğrileri karşılaştırıldığında, yük taşıma kapasiteleri ve başlangıç rijitliği değerlerinde önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Buna dayanarak, daha ekonomik çözümlerin araştırılmasına karar verilmiş ve ileride üretilecek numuneler için CFRP genişliği bir parametre olarak seçilmiştir.

İkinci grup dolgu duvar numunelerinin düşey yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) eğrileri toplu olarak Şekil 3.13'te verilmiştir. Bu eğrilerin karşılaştırılması, göçme şekilleri ve deneysel gözlemlerin değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

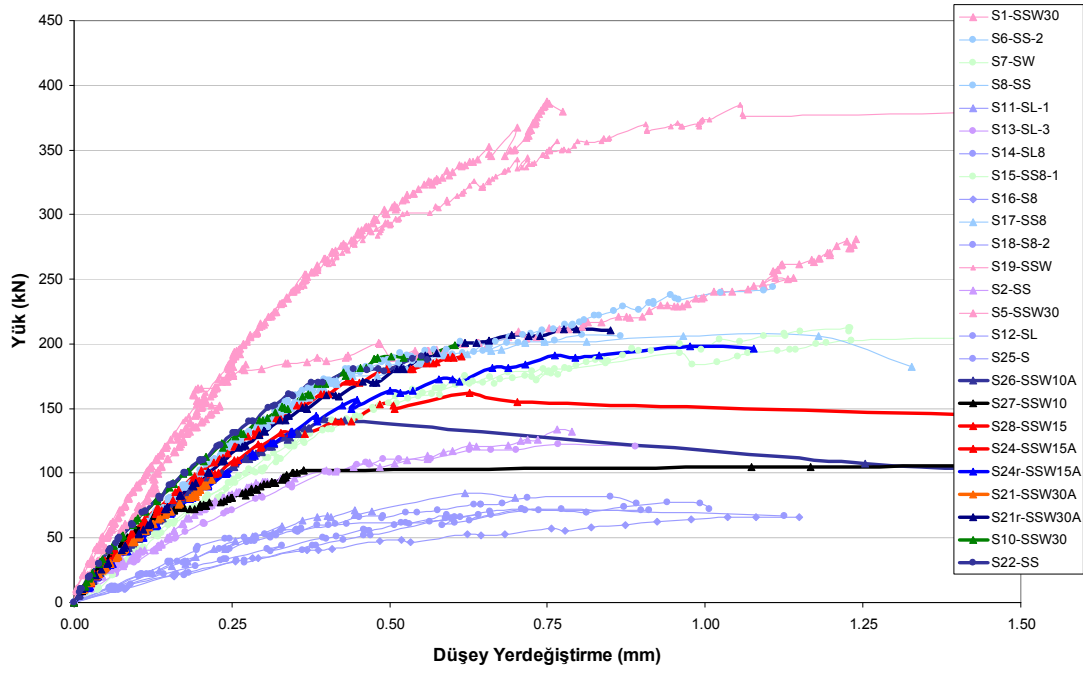


Şekil 3.13 : İkinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.

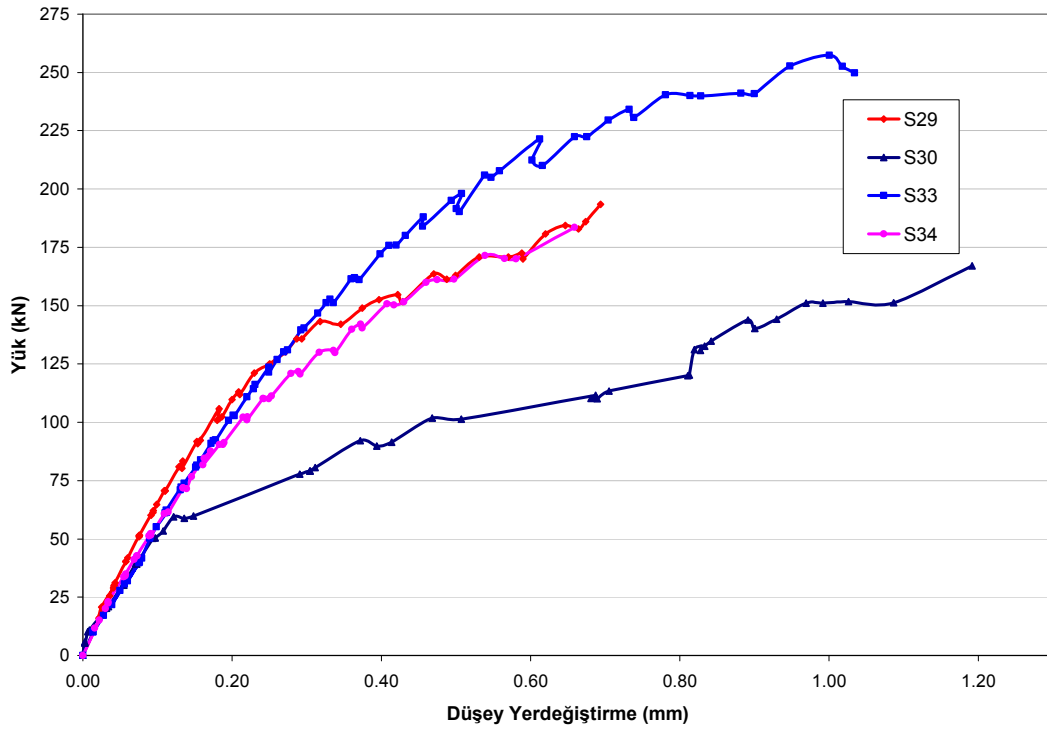
- 300 mm genişliğinde CFRP ile güçlendirilmiş ve CFRP ankraj elemanlar kullanılmış olan dolgu duvar numunesi S21'in düşey yük taşıma kapasitesi, güçlendirilmemiş numunelerden bile daha düşük olan 94 kN olmuştur. Numunenin göçme şekli incelenmiş ve lokal hasarlardan dolayı erken göçme olması olasılığı gözönüne alınarak, numune 90° döndürülerek diğer diyagonalı doğrultusunda bir daha denenmiştir. Bu ikinci deneyde düşey yük taşıma kapasitesi 211 kN çıkmış ve elde edilen eğriye S21r adı verilmiştir, Şekil 3.13.
- Yukarıda anlatılan yöntem dolgu duvar numunesi S24 için de uygulanmıştır. S24 numunesi, 150 mm genişliğinde CFRP şeritler ile güçlendirilmiş ve CFRP ankrajlar kullanılmış numunedir.
- Tüm numunelerin başlangıç rijitliği değerleri birbirlerine yakinken, artan yükler ile rijitlik değerleri farklılaşmaya başlamaktadır ve uygulanmış olan CFRP genişliği küçüldükçe rijitlik değeri de küçülmektedir.
- Numunelerin düşey yük taşımalarını etkileyen en önemli faktörün CFRP genişliği olduğu gözlenmiştir. CFRP ankrajların rijitlik ve yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.
- Birinci ve ikinci grup dolgu duvar numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri birlikte değerlendirilmiştir, Şekil 3.14. İkinci gruptaki güçlendirilmiş numunelerin başlangıç rijitlikleri ve düşey yük taşıma kapasiteleri ilk gruptaki güçlendirilmiş numunelerinkilerden oldukça düşüktür. İki gruptaki güçlendirilmiş numunelerin göçme şekilleri benzerlik göstermektedirler. Bunlara göre CFRP ile bu şekilde güçlendirmenin en önemli etkisinin göçme şekline olduğu söylenebilir.

Üçüncü grup dolgu duvar numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri toplu olarak Şekil 3.15'te verilmiştir. Bu eğrilerin, göçme şekilleri ve deneysel gözlemlerin değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- S30 numunesinin güçlendirme aşamasında, kullanılan Epoksi-2'nin prizinde ve yüzeye aderansında sorun olduğu gözlemlenmiştir. Bu numuneden sonra aynı epoksi kullanılarak yeniden güçlendirilen S29 numunesinin üretiminde ortam koşulları özel olarak dikkat edilmiştir. Bu iki numunenin $P-\Delta$ diyagramları karşılaştırıldığında, S29 numunesinin taşıdığı en büyük düşey



Şekil 3.14 : Birinci ve ikinci grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.

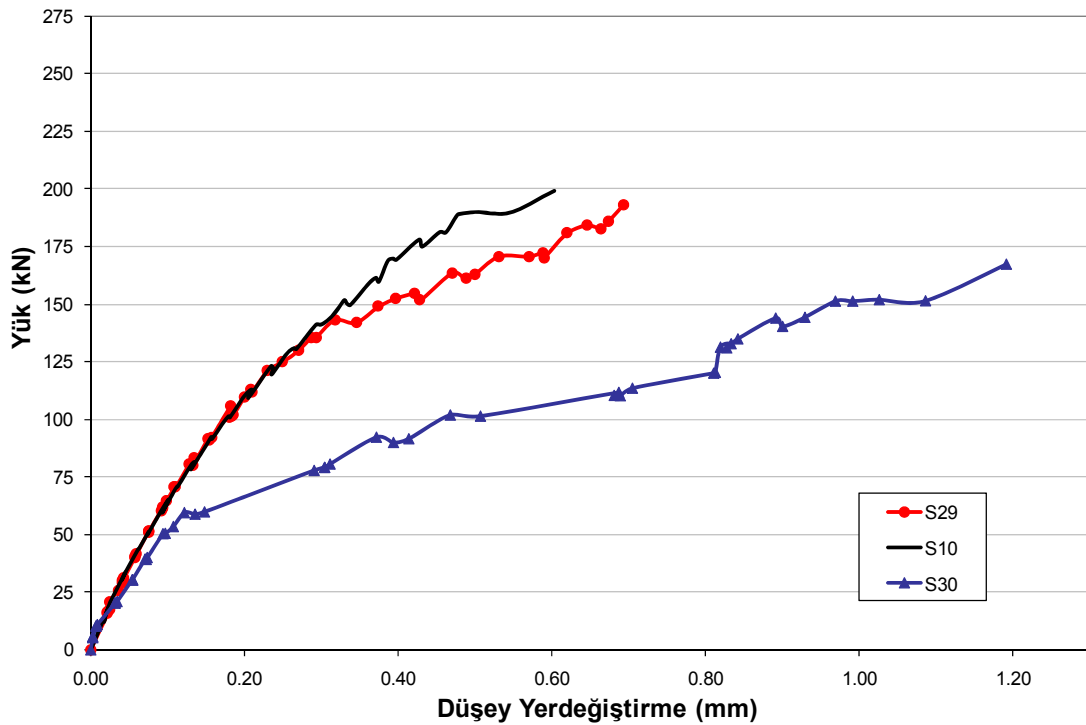


Şekil 3.15 : Üçüncü grup dolgu duvar numunesi $P-\Delta$ eğrileri.

kuvvetin S30 numunesine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki numunenin başlangıç rijitlikleri birbirine yakın olmasına karşın S30 numunesinde başlangıç yük adımlarından sonra rijitlik değeri düşmüştür. Bu ulaşılan sonuç güçlendirme aşamasında, kullanılan epoksinin tipine de

dikkat edilerek, uygulama koşullarına özen gösterilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

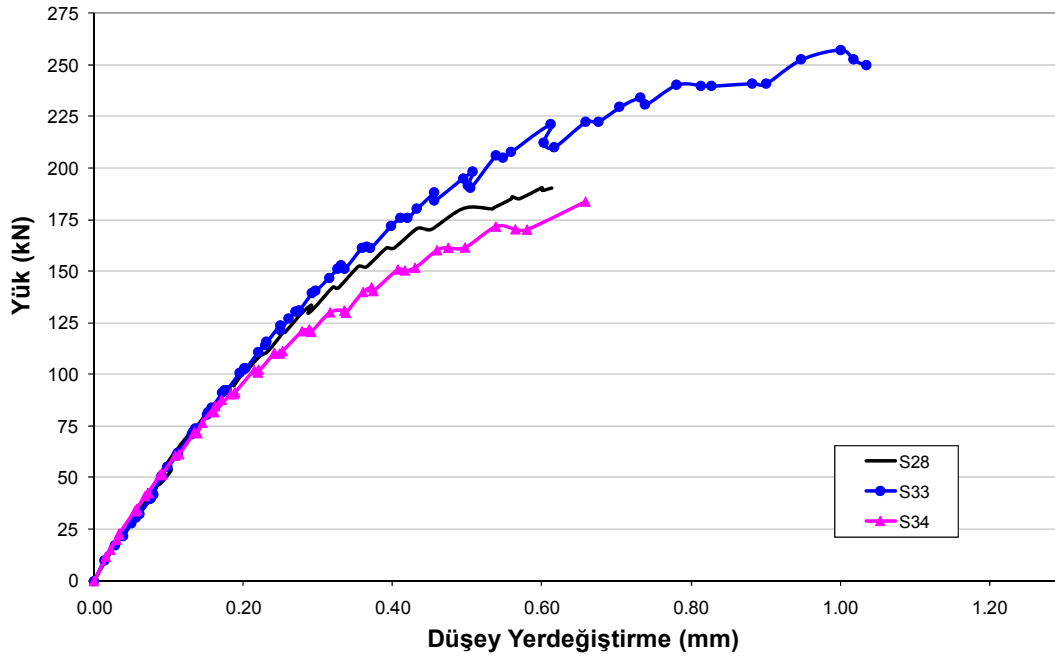
- Epoksi tipinin güçlendirmeye etkisini anlamak amacı ile S29 ve S30 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri, ikinci grup numunelerden olan S10 ile karşılaştırılmıştır, Şekil 3.16. S10 numunesinde, S29 ve S30 numuneleri ile aynı genişlikte ve aynı tipte CFRP kullanılmıştır, ama epoksi tipi bu numunelerden farklıdır. Bu karşılaştırma sonucunda epoksi uygulama koşullarına dikkat edildiği durumda (S29), epoksi tipinin düşey yük taşıma kapasitesine ve başlangıç rijitliğine önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 3.16 : S29, S10 ve S30 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri.

- S33 ve S34 numunelerinin güçlendirilmesinde 300 mm genişliğinde CFRP No.3 şeritler kullanılmıştır. Bu CFRP tipinin, numunelerin başlangıç rijitliklerine ve taşıyabileceği en büyük düşey kuvvete etkisini görmek için S33 ve S34 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri, ikinci grup numunelerinden olan S28 ile karşılaştırılmıştır, Şekil 3.17. S28 numunesinde 150 mm genişliğinde CFRP No.2 şeritler kullanılmıştır. Çizelge 3.7’de verilen CFRP özelliklerine göre bir hesap yapılırsa, 300 mm genişliğindeki CFRP No.3 şeritin kesitinin taşıyacağı en büyük yük ile 150 mm genişliğindeki CFRP No.2 şeritin kesitinin taşıyacağı en büyük yük yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Üç

numunenin de başlangıç rijitliklerinin ve yük taşıma kapasitelerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.17 : S28, S33 ve S34 numunelerinin $P-\Delta$ eğrileri.

3.2.4 Dolgu duvar numunelerinin göçme şekilleri

Diyagonal kayma deneylerinde yapılan gözlemlerle farklı özelliklere sahip dolgu duvar numunelerinin çatlak oluşumu ve göçme şekillerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Dolgu duvar numunelerinin göçme şekilleri Ek A'da verilmiştir.

- Sıvasız, güçlendirilmemiş numunelerde genel olarak yatay ve düşey harç fazlarını takip eden çatlaklar oluşurken, sürekli bir harç tabakasına CFRP yerleştirilmiş numunelerde çatlaklar bir harç tabakası boyunca oluşmuştur, Şekil 3.18.
- Sıvalı numunelerde göçme, basınç bölgeleri civarındaki düşey çatlakların büyümesi ile gerçekleşmiştir. Deney sonunda bu numuneler incelendiğinde sıva tabakasının altında yatay ve düşey harç fazlarını takip eden ve yer yer tuğladan geçen çatlakların da olduğu gözlenmiştir, Şekil 3.19a.
- Bütün güçlendirilmiş numunelerde benzer göçme şekilleri olmuştur. Çelik başlıklar civarındaki tuğlaların parçalanması ile basınç bölgesi doğrultusundaki CFRP şeritler kabarmasıyla numuneler göçmüştür, Şekil 3.19-23.



(a)



(b)

Şekil 3.18 : Güçlendirilmemiş sıvasız numune S25'in (a) ve harç tabakalarına CFRP yerleştirilmiş numune S14'ün (b) göçme şekilleri.



(a)



(b)

Şekil 3.19 : Sıvalı numune S17'nin (a) ve tüm yüzü CFRP kaplı sıvasız numune S7'nin (b) göçme şekilleri.



Şekil 3.20 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvalı numune S19'un göçme şekli.



(a)



(b)

(c)

Şekil 3.21 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numuneler S5'in (a), S29'un (b) ve S33'ün (c) göçme şekilleri.



Şekil 3.22 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş ankrajlı sıvalı numune S21'in göçme şekli.



(a)

(b)

Şekil 3.23 : 100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S27'nin (a) ve 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S28'in (b) göçme şekilleri.

- 300 mm genişlikteki CFRP şerit ile güçlendirilmiş CFRP ankrajsız numunelerde ve tüm yüzü CFRP kaplı numunede, çekme etkisindeki duvar diyagonalı doğrultusundaki CFRP şeritin sıva tabakası ile beraber duvardan oldukça ayrıldığı görülmüştür, Şekil 3.19-21. CFRP genişliği 300 mm olan ankraj kullanılmış numunede, CFRP şeritin sıva tabakası ile beraber duvardan ayrıldığı gözlenmemiştir, Şekil 3.22. Bu durumda CFRP ankraj elemanların çekmeye çalışan diyagonal doğrultusunda sıva ve CFRP tabakasının duvar yüzeyinden ayrılmaya karşı etkili olabileceğini düşündürmüştür.
- CFRP genişliği 150 ve 100 mm olan güçlendirilmiş ankrajlı ve ankrajsız numunelerde ise çekme doğrultusunda çalışan CFRP şeritin ve sıva tabakasının duvardan ayrıldığı gözlenmemiştir, Şekil 3.23.
- CFRP ankrajlarda önemli bir hasar oluştuğu görülmemiştir.

3.2.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deney verilerinden, düşey yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) ve kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirme ($\tau-\gamma$) diyagramları elde edilmiştir. Bütün numunelerin düşey yük taşıma kapasiteleri karşılaştırabilmek amacı ile Şekil 3.24'te verilmiştir.

Dolgu duvar numunelerinde kayma gerilmesi (τ);

$$\tau = \frac{0.707P}{A_n} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada P düşey yükü, A_n numunenin brüt kesit alanını ifade etmektedir. Numunenin brüt kesit alanı (A_n);

$$A_n = w t_{duvar} \quad (3.8)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada w numune genişliğini, t_{duvar} numune kalınlığını göstermektedir. Birim kayma açısı (kayma şekildegıştirmesi) γ ise;

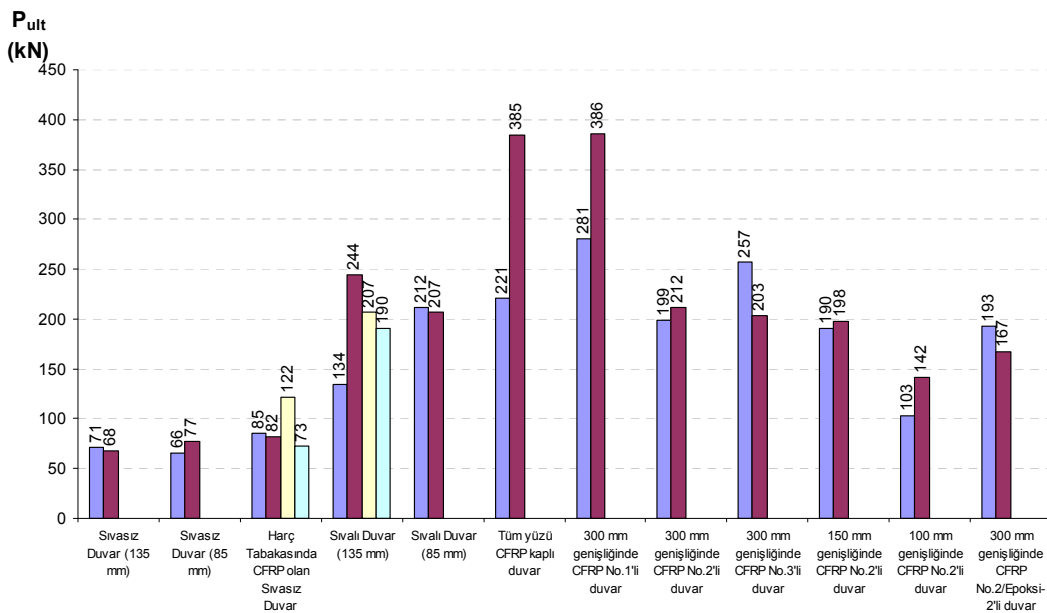
$$\gamma = \frac{\Delta V}{g_v} + \frac{\Delta H}{g_h} \quad (3.9)$$

olarak hesaplanmıştır. ΔV düşey yerdegıştirmeyi, ΔH yatay yerdegıştirmeyi, g_v ve g_h ise, sırasıyla, düşey ve yatay ölçüm mesafelerini göstermektedir. Düşey veya yatay yerdegıştirme olarak, dolgu duvar numunesinin her iki yüzünden ölçülen yerdegıştirme değerlerinin ortalamaları kullanılmıştır.

Kayma modülü (G) deneysel verilerden elde edilen kayma gerilmesi-kayma şekildegıştirmesi (τ - γ) diyagramında, en büyük kayma gerilmesi değeri τ_{max} 'ın %5'i ve %30'una denk gelen τ değerleri arasındaki bölgenin eğimi olarak ,

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.10)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Numunelerin kayma modülü (G) değerleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.24 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin yük taşıma kapasiteleri.

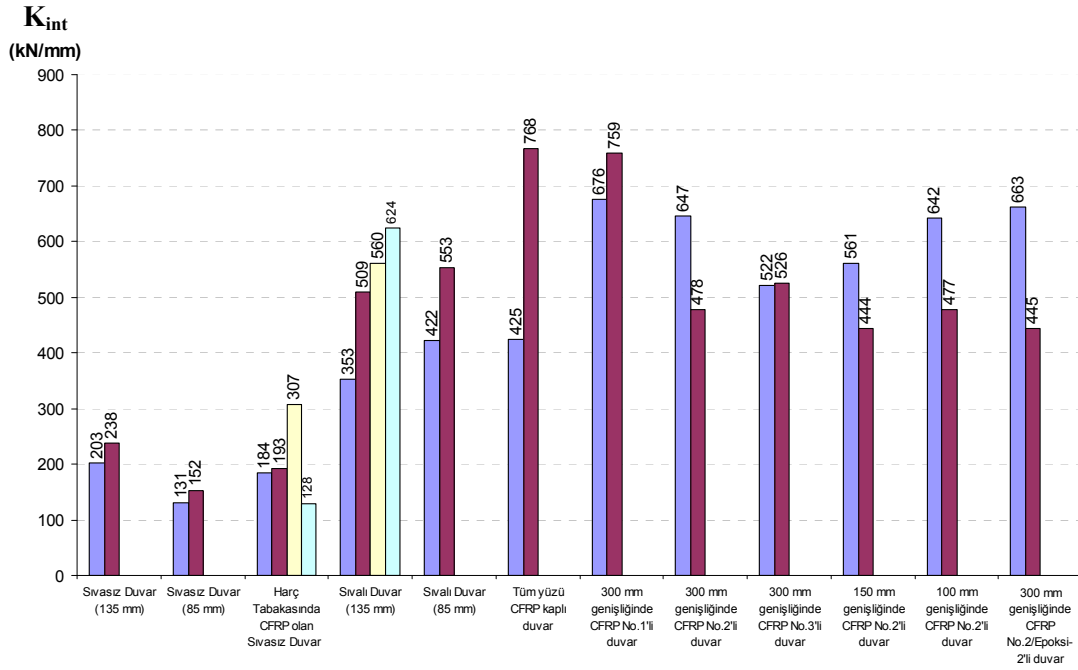
Çizelge 3.10: Dolgu duvar numunelerinin deney sonuçları.

Numune İsmi	Numune Tipi	Grup	ε_{max} (%)	G (MPa)	K_{int} (kN/mm)	f_{me} (MPa)	τ_{me} (MPa)
S25	S-5	1	0.171	604	203	1.503	0.492
S4	S-1		-	-	-	-	-
S9	S-2		0.092	-	238	1.439	0.472
S16	S8-1		0.208	321	131	2.218	0.727
S18	S8-2		0.167	417	152	2.588	0.848
S11	SL-1		0.116	585	184	1.799	0.590
S12	SL-2		0.152	589	193	1.735	0.569
S13	SL-3		0.140	1019	307	2.582	0.846
S14	SL8-1		0.135	366	128	2.454	0.804
S2	SS-1		0.118	1406	353	2.836	0.810
S6	SS-2		0.201	1615	509	4.741	1.353
S8	SS-3		0.149	1603	560	4.381	1.251
S22	SS-4	2	0.097	-	624	4.021	1.148
S15	SS8-1	1	0.218	1385	422	7.126	1.891
S17	SS8-2		0.210	1577	553	6.958	1.251
S7	SW-1		0.404	1307	425	4.677	1.533
S19	SSW-1		0.187	2429	768	8.127	2.320
S1	SSW30-1		0.217	3203	676	5.947	1.698
S5	SSW30-2		0.134	2218	759	8.169	2.332
S10	SSW30-3	2	0.113	-	647	4.212	1.202
S21	SSW30A		0.144	1448	478	4.487	1.281
S28	SSW15		0.113	1559	561	4.021	1.148
S24	SSW15A		0.172	1259	444	4.169	1.190
S27	SSW10		0.064	2029	642	2.180	0.622
S26	SSW10A		0.072	1401	477	3.005	0.858
S33	SSW30Z-1	3	0.182	1552	522	5.439	1.553
S34	SSW30Z-2		0.117	1756	526	4.296	1.226
S29	SSW30E-1		0.130	1758	663	4.085	1.166
S30	SSW30E-2		0.184	1724	445	3.534	1.009

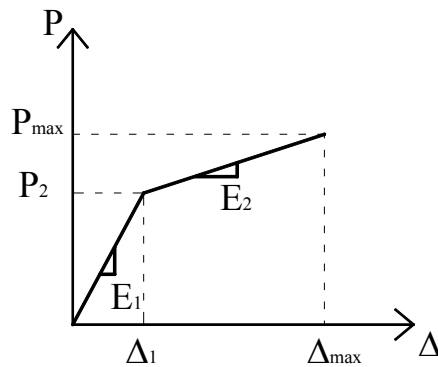
Dolgu duvar numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme verilerinden başlangıç rijitlikleri hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği (K_{int}), numunenin $P-\Delta$ eğrisinde yük taşıma kapasitesi P_{ult} 'ın %5'i ve %30'una denk gelen yük değerleri arasındaki bölgenin eğimi olarak hesaplanmıştır. Tüm numuneler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri toplu olarak Çizelge 3.10'da ve Şekil 3.25'te verilmiştir.

Betonarme çerçeve deneylerinin yapısal modelinde dolgu duvarı temsil eden çubuk elemanın yük-yerdeğiştirme eğrisinin, dolgu duvar numunelerinin deneysel $P-\Delta$ eğrilerinin değerlendirilmesi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için yapılan ön çalışmada numuneler özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Benzer parametrelere sahip numunelerin düşey yük-düşey yerdeğiştirme deneysel verileri birlikte

değerlendirilerek, $P-\Delta$ eğrileri iki doğrulu olarak idealleştirilmiştir. Daha sonra bu iki doğrulu idealleştirilmiş diyagramlar en büyük düşey yük (P_{max}) ve en büyük düşey yerdeğiştirme (Δ_{max}) kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. İki doğrulu diyagramların ikinci kısmının eğimi de boyutsuzlaştırılarak, ilk kısmın eğimi cinsinden değerlendirilmiştir. $P-\Delta$ eğrilerinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesi aşamasında kullanılan tanımlar Şekil 3.26'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.25 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin başlangıç rijitliği değerleri.



Şekil 3.26 : Dolgu duvar numunelerinin $P-\Delta$ eğrilerinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesinin şematik gösterimi.

Yukarıda açıklanmış olan iki doğrulu olarak idealleştirme işlemi bütün numuneler için uygulandıktan sonra sonuçlar bir çizelgede toplanmıştır, Çizelge 3.11. Bu değerlerin üç bölüm olarak incelenmesinin uygun olduğu düşünülmüştür. Birinci

bölümde güçlendirilmemiş sıvalı ve sıvasız numuneler vardır. İkinci bölüm, harç tabakalarına CFRP şeritler yerleştirilmiş numuneler ve CFRP ile güçlendirilmiş sıvasız numuneden oluşmaktadır. Üçüncü bölüm ise CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numuneleri içermektedir.

Çizelge 3.11: Dolgu duvar numuneleri iki doğrulu olarak idealleştirme değerleri.

	Numune Tipi	η ($P_2 = \eta P_{max}$)	χ ($\Delta_1 = \chi \Delta_{max}$)	ρ ($E_2 = \rho E_1$)
Güçlendirilmemiş numuneler	SS (135 mm)	0.70-0.70	0.39-0.36	0.27-0.25
	S (135 mm)	0.79	0.32	0.13
	SS (85 mm)	0.73-0.69	0.29-0.36	0.20-0.25
	S (85 mm)	0.66-0.72	0.42-0.45	0.28-0.34
Güçlendirilmiş numuneler	SL (135 mm)	0.84-0.74	0.38-0.45	0.18-0.25
	SL (85 mm)	0.72	0.61	0.60
	SW	0.75	0.25	0.11
	SSW	0.65	0.20	0.30
	SSW30	0.48-0.63-0.57- 0.50-0.57-0.50- 0.55-0.32	0.32-0.20-0.40- 0.30-0.26	0.54-0.15- 0.33-0.40- 0.27-0.21
	SSW15	0.58	0.27	0.40-0.36
	SSW10	0.56-0.54	0.31-0.37	0.28-0.58
Numune tiplerindeki kısaltmalar : 1. S: Numune, 2. S: Sıvalı numune, W: CFRP uygulaması tüm numune yüzeyinde, W30/15/10: CFRP uygulaması 300/150/100 mm genişliğinde.				

Çizelge 3.11’de özetlenen verilere göre iki doğrulu olarak idealleştirilmiş diyagramdaki P_2 değerlerinin sıvalı ve sıvasız güçlendirilmemiş numuneler ile güçlendirilmiş sıvasız numuneler için P_{max} değerinin %70 ile %80’i arasında değişmekte olduğu görülmektedir. Güçlendirilmiş sıvalı numunelerde ise P_2 değerleri, P_{max} değerinin %50-60’ı arasında değerler almaktadır.

Düşey yerdeğiştirme değerleri Δ_1 , güçlendirilmemiş numunelerde Δ_{max} değerinin %30 ile %45’i, güçlendirilmiş sıvasız numunelerde ise %30 ile %60’ı arasında değişmektedir. Güçlendirilmiş sıvalı numunelerde ise Δ_1 değerleri, Δ_{max} değerinin %20 ile %40’ı arasında değerler almaktadır. Son olarak diyagramdaki ikinci doğrunun eğimi E_2 değerleri karşılaştırılacak olursa, güçlendirilmemiş numunelerde E_2 değeri, E_1 değerinin %20 ile %28’i arasında, sıvasız güçlendirilmiş numunelerde

ise %11 ile %60'ı arasında değerler almaktadır. E_2 , sıvalı güçlendirilmiş numunelerde E_1 değerinin %30 ile %55'i arasında değişmektedir.

Yukarıdaki değerlendirmeler, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş dolgu duvarların yük-yerdeğiştirme eğrilerinin sınır bölgelerini belirlemekte kullanılabilir. Basit kayma deneyleri kuvvet kontrollü olduğundan, numunelerin $P-\Delta$ eğrilerinin iniş kolları düzgün bir şekilde elde edilememiştir. Birkaç numunede elde edilmiş olan $P-\Delta$ eğrilerinin iniş kolları değerlendirme için fikir vermektedir.

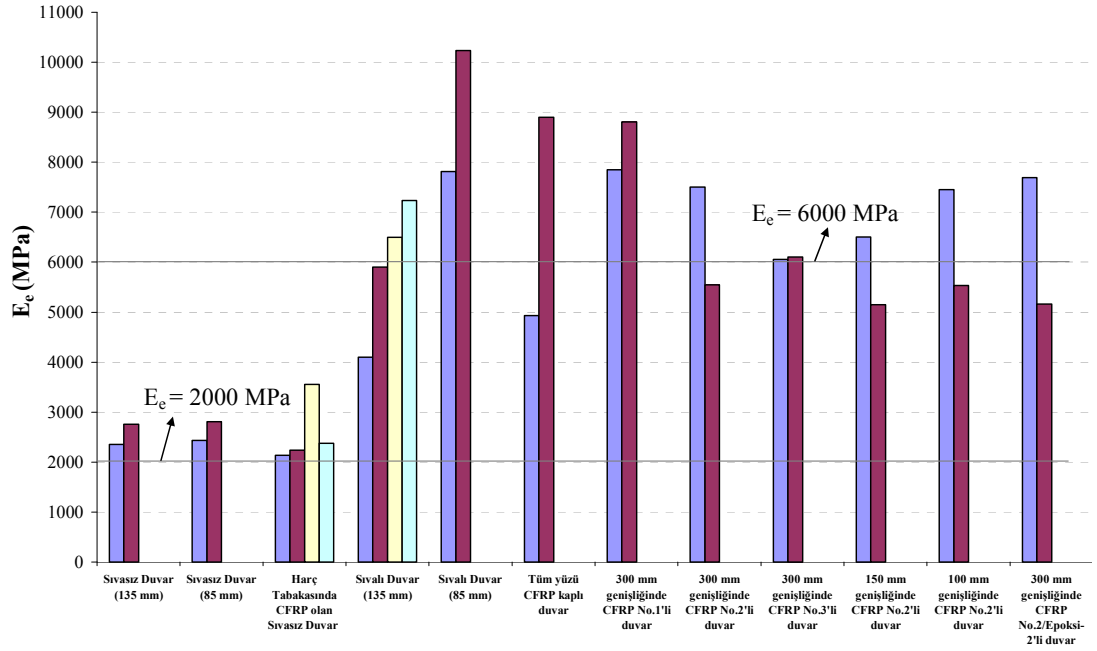
Dolgu duvarların yapısal modellenmesinde, gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde en büyük gerilme değerine karşı gelen şekildeğiştirme (ϵ_{max}) değerinin belirlenmesinde yol göstermesi için bütün numunelerin ϵ_{max} değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Ersin ve diğ. (1998), bu çalışmada kullanılanlarla aynı tip tuğlalar ile yapılan dolgu duvar parçası numunelerinin basınç deney sonuçlarına göre sıvasız ve sıvalı dolgu duvarlar için elastisite modülü değerleri belirlemişlerdir. Tuğlaların deliklerine dik doğrultuda basınç etkisindeki elastisite modülünün (E_{per}) sıvasız dolgu duvarların için 2500 MPa, sıvalı dolgu duvarlar için ise 4200 MPa olarak alınması önerilmiştir.

Dolgu duvar numunelerinin “Eşdeğer elastisite modülü” (E_e) değerleri deneysel veriler ile aşağıda verilen denklemle hesaplanmıştır.

$$E_e = \frac{P}{F \frac{\Delta}{L_g}} \quad (3.11)$$

Burada $F = b_b \cdot t_{duvar}$ yaklaşık kesit alanını, b_b basınç etkisinde kalan çubuğun genişliği olarak kabul edilen çelik başlıkların yükleme genişliğini, t_{duvar} numune kalınlığını, P yükü, L_g ölçüm boyunun ve Δ düşey yerdeğiştirme değerlerini göstermektedir, Şekil 3.10. Bütün numunelerin E_e değerleri toplu olarak Şekil 3.27'de verilmiştir. Bütün numunelerin başlangıç rijitlikleri ve eşdeğer elastisite modülü değerleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Buna göre duvar üzerindeki sıvanın elastisite modülüne etkisinin dikkate alınmasının gerekli olduğu açıkça görülmüştür. Sıvalı güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerin eşdeğer elastisite modüllerinin birbirine yakın çıktığı görülmektedir.



Şekil 3.27 : Basit kayma deneyi dolgu duvar numunelerinin eşdeğer elastisite modülü (E_e) değerleri.

Güçlendirilmiş dolgu duvarların eşdeğer elastisite modülü değerleri arasında, güçlendirme parametrelerine bağlı çok belirgin bir ilişki çıkarılamadığı gözlenmiştir. Güçlendirilmiş duvarların elastisite modülleri yerine sıvalı numune deneylerinden elde edilen elastisite modülleri kullanılabileceği açıktır. Bu sonuçlara göre eşdeğer elastisite modülü değerlerinin güçlendirilmemiş sıvasız numuneler için 2500 MPa, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş sıvalı numuneler için 6000 MPa değerlerinin alınabileceği görülmektedir, Şekil 3.27. Bu değerler, Ersin ve diğ. (1998) tarafından önerilmiş değerler ile de uyumludur. “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, Bilgilendirme Eki 7F (2007)’de ise boşluklu fabrika tuğlası için elastisite modülünün (E_{duvar}) değeri 1000 MPa olarak önerilmiştir. Bu değer, yukarıda açıklanmış olan, deneysel olarak elde edilmiş elastisite modülü değerlerinden çok düşük olduğu görülmektedir.

Basit kayma deneyi numunelerinin eşdeğer basınç dayanımları (f_{me});

$$f_{me} = \frac{P_{ult}}{b_b t_{duvar}} \quad (3.12)$$

denklemleri ile hesap edilmiştir, Çizelge 3.10. Burada P_{ult} en büyük düşey yük değerini, b_b basınç etkisinde kalan çubuğun genişliğini ve t_{duvar} numune kalınlığını göstermektedir. Bu sonuçlara göre sıvasız güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerin ortalama f_{me} değeri 2 MPa, sıvalı güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş

numunelerin ortalama f_{me} değeri 5 MPa olarak alınabilir. “DBYBHY”, Bilgilendirme Eki 7F (2007)’de boşluklu fabrika tuğlası için önerilen basınç dayanımı (f_{duvar}) 1.0 MPa’dır.

Numunelerin eşdeğer kayma dayanımları (τ_{me}) (3.7) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır, Çizelge 3.10. Burada düşey yük değeri olarak en büyük düşey yük (P_{ult}) alınmıştır. Eşdeğer kayma dayanımları, iki eksenli gerilme etkisindeki numunelerin kayma gerilmesi-basınç gerilmesi (τ - σ) eğrisinde, basınç ve kayma gerilmelerinin eşit olduğu noktadaki değerleri temsil etmektedir. Güçlendirilmiş numunelerde CFRP genişliği azaldıkça eşdeğer kayma dayanımları da azalmaktadır. Ama bunun genellenebilmesi için değerlendirilen numune sayısının daha fazla olması gerekmektedir. Ayrıca sürekli harç tabakasının içerisine CFRP yerleştirilerek güçlendirilen sıvasız numunelerin eşdeğer kayma dayanımlarının güçlendirilmemiş sıvasız numunelerden daha yüksektir. Ortalama τ_{me} değerleri, sıvasız numuneler, sıvalı numuneler ve sürekli harç tabakalarında CFRP olan numuneler için, sırasıyla, 0.482, 1.140 ve 0.668 MPa’dır. Çeşitli genişliklerde CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin ortalama τ_{me} değerleri ise 1.628 ile 0.740 MPa arasında değişmektedir.

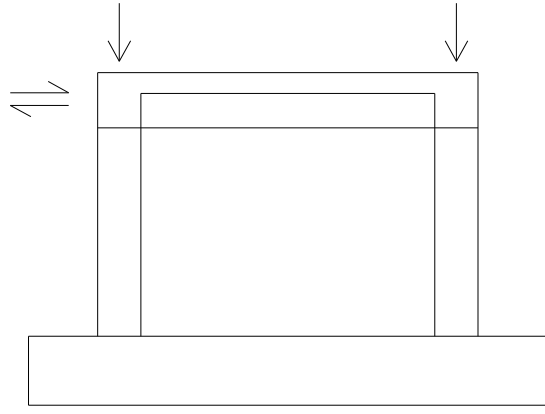
4. TEK KATLI-TEK AÇIKLIKLI BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ

4.1 Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numuneleri

Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde duvarların CFRP ile güçlendirilmesini incelemek amacı ile altı adet $\frac{1}{2}$ ölçekli, tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi üretilmiş ve çevrimsel yatay yükler altında denenmiştir, Şekil 4.1. İki adet dolgu duvarsız betonarme çerçeve ve bir adet sıvalı dolgu duvarlı betonarme çerçeve (N1) referans numuneleridir, Şekil 4.1a,b. Diğer numunelerde dolgu duvarlar CFRP ile güçlendirilmiş, farklı güçlendirme şekilleri ve bağlantı detaylarının etkisi incelenmiştir.

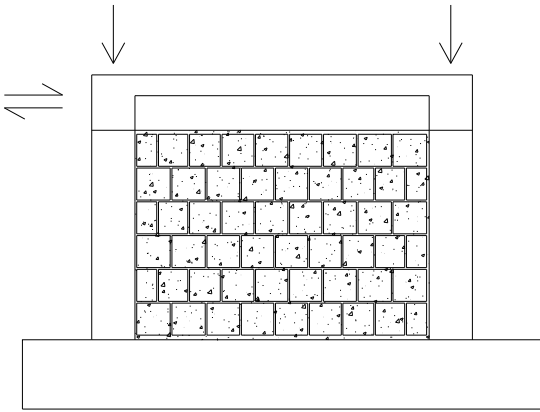
Tüm numunelerdeki dolgu duvarlar 135 mm kalınlığındaki yatay delikli fabrika tuğlası ile üretilmiştir. Yatay delikli fabrika tuğlasının boyutları ve malzeme özellikleri Bölüm 3.1.1’de verilmiştir. Dolgu duvarlar tuğlaların delikleri yatay harç tabakalarına paralel olacak şekilde üretilmiştir. Dolgu duvarların güçlendirilmesinde CFRP uygulaması sıvalı duvar üstüne yapılmıştır. Herbir numunenin sıva ve harç malzeme özellikleri Bölüm 3.1.2 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Betonarme çerçeve numunelerinin beton ve çelik malzeme özellikleri Çizelge 3.4 ve 3.6’da özetlenmiştir. Güçlendirilmiş bütün numunelerde CFRP uygulamasında Epoksi-1 kullanılmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı numunelerde kullanılan CFRP ve epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.7 ve 3.8’de görülmektedir.

Numuneler, İTÜ Yapı Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’nda betonarme çerçevelerin değişik malzeme ve yöntemler ile güçlendirilmesini incelemek amacı ile üretilen tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi ile özdeş olarak üretilmiştir, Şekil 4.2. Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve, ülkemizde uygulamada oldukça yaygın rastlanan tipik bir az katlı betonarme yapının en alt katındaki çerçeve parçası prototip olarak alınarak ve yaklaşık olarak $\frac{1}{2}$ ölçekle küçültülerek boyutlandırılmıştır, (Yüksel, 1998). Kolonlara uygulanan normal kuvvetler, döşemeden bir parça alınmış olması ve kiriş donatılarının düğüm noktası



a.

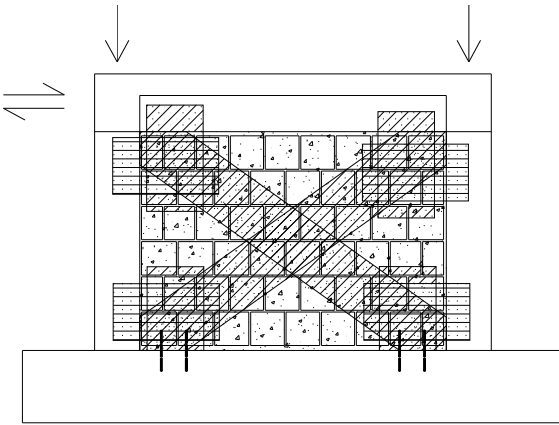
Dolgu duvarsız
referans numune



b.

N1 : Sıvalı dolgu
duvarlı referans
numune.

N1

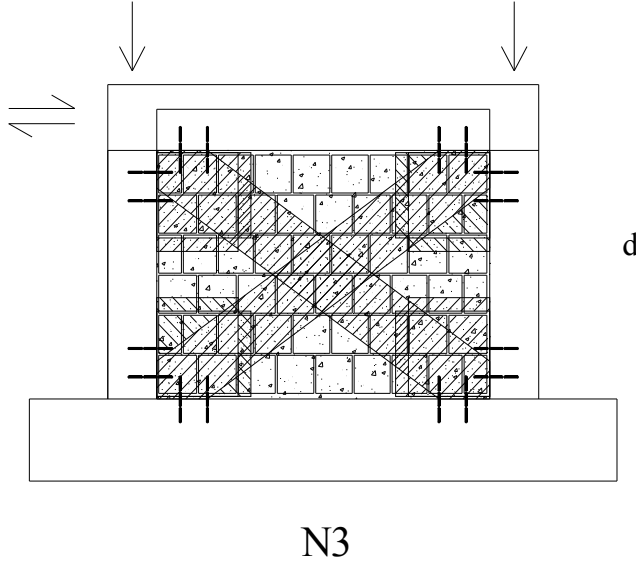


c.

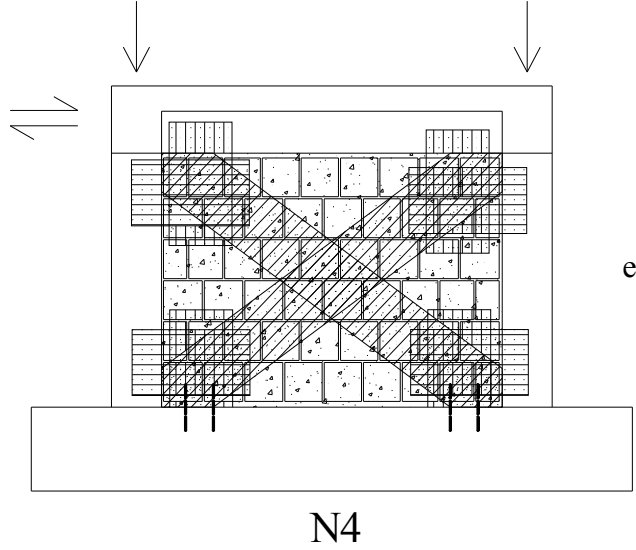
N2 : Sıvalı dolgu duvarlı
güçlendirilmiş numune.
Duvarın iki yüzüne
diyagonal doğrultuda
CFRP yapıştırılmış ve
çerçeve elemanlarına
bağlantısı CFRP şeritler
ile yapılmış. İki yüzdeki
CFRP şeritler, CFRP
ankrajlar ile birbirine
bağlanmış.

N2

Şekil. 4.1 : Tek katlı tek açıklıklı deney numuneleri.



N3 : Sıvalı dolgu duvarlı güçlendirilmiş numune. Duvarın iki yüzüne diyagonal doğrultuda CFRP yapıştırılmış ve çerçeve elemanlarına bağlantısı CFRP ankrajlar ile yapılmış. İki yüzdeki CFRP, CFRP ankrajlar ile birbirine bağlanmış.

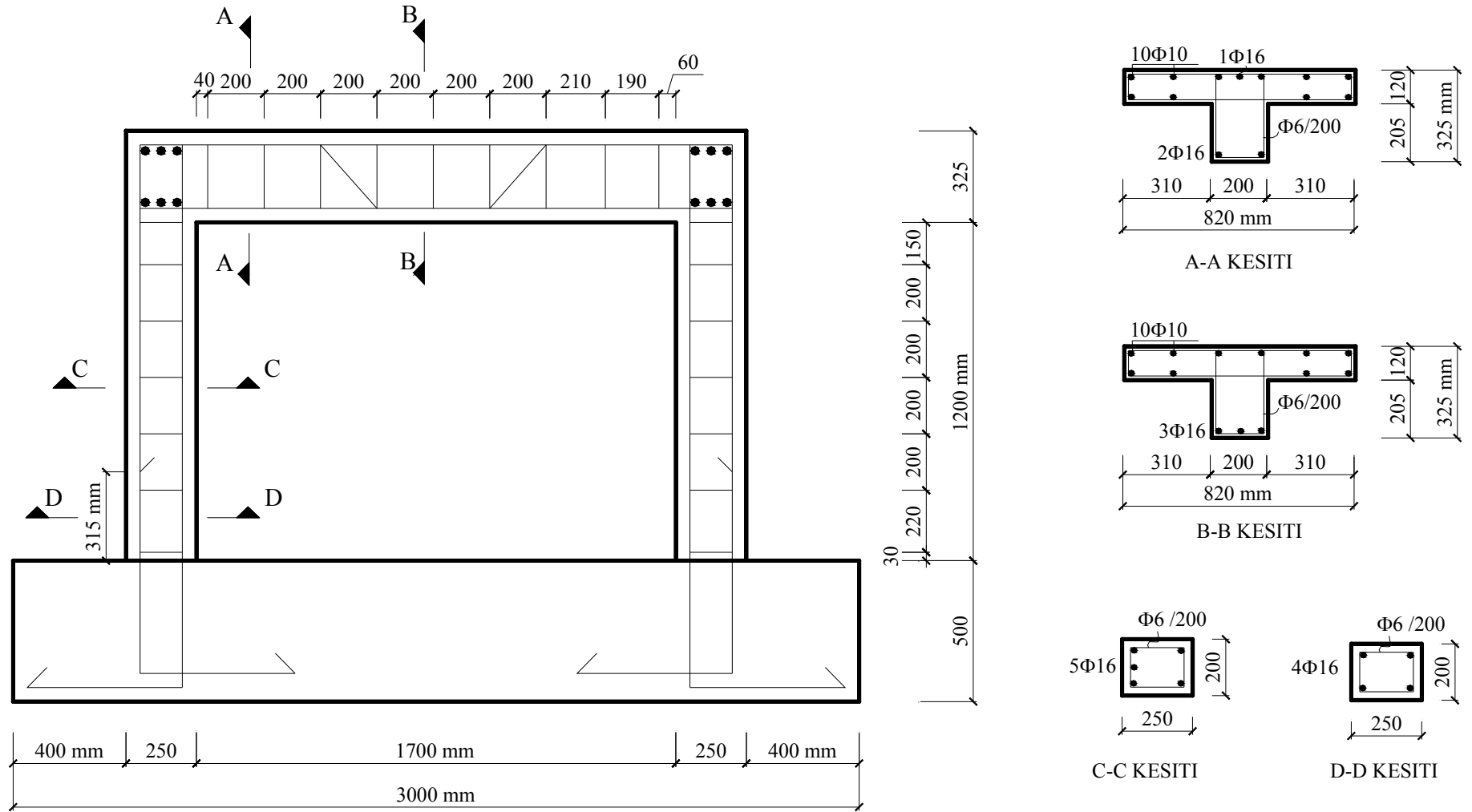


N4 : Sıvalı dolgu duvarlı güçlendirilmiş numune. Duvarın iki yüzündeki diyagonal CFRP sadece köşelerde epoksi ile yapıştırılmış, diğer bölgelerde epoksi uygulanmamış. Çerçeve elemanlarına bağlantı CFRP şeritler ile yapılmış ve iki yüzdeki CFRP dört adet CFRP ankrajlarla birbirine bağlanmış.

Şekil. 4.1 (devam) : Tek katlı tek açıklıklı deney numuneleri.

etrafından aşağıya doğru bükülmesi, az katlı bir yapının en alt katındaki bir orta çerçeve davranışını temsil etmeye yönelik deneysel önlemlerdir. Deneysel çalışmada, prototip yapıyla numune arasındaki davranış benzerliğinin birebir kurulmaya çalışılması değil, aynı yapısal özelliklerle üretilmiş numuneler arasındaki davranış farklılıklarının gözlenmesi amaçlanmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerin boyutları ve donatı özellikleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

Numunelerin üretiminde, ülkemizdeki yapıları temsil etmesi amacı ile, uygulamada sıkça karşılaşılan yapısal kusurlar tekrar edilmiştir. Buna göre donatı olarak yumuşak çelik kullanılmış, düğüm noktalarında enine donatı kullanılmamış, düğüm



Şekil 4.2 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi boyutları ve donatı detayları.

noktası civarında enine donatı sarılma bölgeleri oluşturulmamıştır. Ayrıca enine donatılarda kancalar 135° kıvrılmamıştır ve enine donatı aralıkları yönetmeliğe uygun değildir. Uygulamada alt ve üst kat kolon düşey donatılarının bağlanmasında kanca kullanıldığından bindirme boyu probleminin önemli olmadığı varsayılmıştır ve numunelerde kolon düşey donatıları, temelde de devam edecek şekilde sürekli olarak üretilmiştir. Numune üretimi laboratuvar koşullarında olmasına rağmen, şantiye koşullarına uyulmaya dikkat edilmiştir. “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’ye göre deprem bölgelerinde yapılacak tüm betonarme binalarda beton basınç dayanımının 20 MPa’dan (C20) yüksek olması gerekmesine rağmen, ülkemizde betonarme yapılarda beton basınç dayanımının çoğunlukla 10 MPa düzeyinde olduğu gözlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak numunelerin beton basınç dayanımları düşük tutulmaya çalışılmıştır. Numunelerin beton basınç dayanımlarındaki küçük farklılıkların davranışa etkilerinin, yapısal model ile yapılan parametrik çalışmayla ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

4.1.1 N2 numunesi

N2 numunesi CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı dolgu duvarlı çerçevedir, Şekil 4.3a. Numunenin dolgu duvarının her iki yüzüne, duvarın iki diyagonalı doğrultusunda 300 mm genişliğinde birer kat CFRP şerit yapıştırılmıştır, Şekil 4.1c ve Şekil 4.4’te ‘A’ya bakınız.

Duvarın köşelerinde, biri düşey diğeri yatay doğrultuda olmak üzere yerleştirilen iki kat CFRP şerit ile bu bölgede diyagonal CFRP şeritlerden aktarılan kuvvetin nispeten daha geniş bir alana yayılması amaçlanmıştır, Şekil 4.4’te ‘B’ye bakınız. Duvar köşelerindeki bu iki kat CFRP, paspayı kaldırılmış kolonlar ve kiriş üzerinde de devam ettirilmiş, böylece diyagonal CFRP şeritlerin taşıdığı kuvvetin çerçeveye aktarımı sağlanmıştır.

Dolgu duvarın iki yüzüne yapıştırılmış CFRP şeritler, duvarın içinden geçen CFRP’den yapılmış ankrajlar ile birbirlerine bağlanmıştır, Şekil 4.4’te ‘C’ye bakınız. Böylece diyagonal CFRP şeritlerin duvar yüzünden ayrılması önlenmesiyle göçmeye kadar CFRP şeritlerin yük taşımaya katkısından faydanılması hedeflenmiştir. CFRP ankraj elemanlar ile bu bağlantıyı yapmak için öncelikle duvarda delikler delinmiş ve bu delikler temizlendikten sonra içerilerine epoksi reçinesi doldurulmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3 : N2 (a), N3 (b) ve N4 (c) numuneleri.



Şekil 4.4 : N2 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.

300 mm genişliğindeki CFRP parçaları lif doğrultusuna paralel şekilde katlanmış ve deliklerin içine yerleştirilmiştir. Dolgu duvarın dışında kalan karbon lifler el ile ayrılmış, duvarın üzerine yayılmış ve epoksi reçinesi kullanılarak yapıştırılmıştır. Diyagonal CFRP şeritlerin temele bağlantısı da CFRP ankrajlar kullanılarak aynı şekilde yapılmıştır. N2 numunesinin CFRP ile güçlendirilmesi aşamaları Şekil 4.4'te görülmektedir. N2 numunesinde, dolgu duvar üzerine CFRP No.2 uygulanmış, dolgu duvarın betonarme çerçeveye bağlamasında ise CFRP No.1 kullanılmıştır.

4.1.2 N3 numunesi

N2 numunesinde, dolgu duvarın üzerindeki CFRP şeritlerin çerçeve ile bağlantısı için köşelere konulan CFRP çerçeve elemanları üzerinde devam ettirilmiştir. Bu tip bir bağlantının pratikte yapılmasının çeşitli zorlukları olduğu ve gerçek binalarda her zaman uygulanamayacağı açıktır. Bu gözönüne alınarak N3 numunesinde farklı bir çerçeve bağlantı detayı kullanılmıştır. Dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin çerçeve elemanlarına bağlantısı CFRP'den yapılmış ankrajlar ile sağlanmıştır, Şekil 4.1d ve 4.3b.

N3 numunesinin güçlendirilmesinin ilk aşaması N2 numunesi ile aynıdır. 300 mm genişliğindeki CFRP şeritler dolgu duvarın iki yüzünde diyagonalleri doğrultusunda yapıştırılmış ve bunlar CFRP ankraj elemanları kullanılarak birbirlerine bağlanmıştır, Şekil 4.5'te 'A'ya bakınız. Bu CFRP ankraj elemanlarının genişlikleri 300 mm ve uzunlukları 650 mm'dir.

Güçlendirmenin ikinci aşamasında, diyagonal doğrultudaki CFRP'nin taşıması beklenen yükler duvarın köşelerinde, 300 mm x 300 mm boyutlarındaki iki adet ilave CFRP tabakası ile daha geniş bir alana yayılmıştır. Bu iki CFRP tabakanın lif doğrultuları birinin yatay diğerinin ise düşey doğrultuda olacak şekilde yerleştirilmiştir ve çerçeve elemanları ile bağlantıları ikişer adet CFRP ankraj ile sağlanmıştır, Şekil 4.5'te 'B' ve 'C'ye bakınız. CFRP ankrajları yerleştirmek için kiriş ve kolonlara 150 mm derinliğinde delikler delinmiş, temizlenmiş ve içleri epoksi doldurulmuştur. 150 mm genişliğinde ve 800 mm uzunluğunda CFRP şeritler liflerine dik doğrultuda ikiye katlanıp deliğin içine itilmiş ve dışarıda kalan lifleri açılarak duvarın üzerine yayılmış ve epoksi ile yapıştırılmıştır. N3 numunesinin güçlendirme aşamalarının detayları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. N3 numunesinde CFRP No.2 kullanılmıştır.



Şekil 4.5 : N3 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.

4.1.3 N4 numunesi

Deprem yüklerini temsil eden yatay çevrimsel yüklerin etkisinde, duvarın diyagonalı doğrultusunda yapıştırılan CFRP şeritler hem çekme hem de basınç gerilmelerine maruz kalmaktadırlar. Karbon liflere epoksi uygulandığında gevrek hale gelmektedir. Bu durumda basınç etkisinde kalan kompozit eleman ileri yüklerde burkulabilir ve sonraki adımlarda çekme kuvvetine maruz kaldığında bu zayıf kesitlerden kopabilir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için duvarın orta bölgelerinde bulunan karbon lifi duvara yapıştırmamak, böylece epoksi sürülmemiş karbon liflerin sünek olması özelliğinden yararlanmak, bu çalışmada yeni bir fikir olarak incelenmektedir. Bu amaçla N4 numunesinde, duvar ortasındaki CFRP şeritlere epoksi sürülmemiş, CFRP sadece duvar köşelerinde epoksi ile yapıştırılmıştır, Şekil 4.1e ve 4.3c.

Dolgu duvarın iki yüzündeki CFRP şeritleri birbirine bağlamak için duvar köşelerinde dört adet CFRP ankraj elemanı kullanılmıştır, Şekil 4.6'da 'A'ya bakınız. Çerçeveye kuvvet aktarımı, N2 numunesinde olduğu gibi köşelerde kuvveti yayan iki kat CFRP şeridin çerçeve üzerinde de devam ettirilmesi ile sağlanmıştır, Şekil 4.6'da 'B'ye bakınız. Bu CFRP şeritlerin boyutları 300 mm x 500 mm'dir. N4 numunesinin güçlendirme aşamalarının detayları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. N4 numunesinde CFRP No.2 kullanılmıştır.

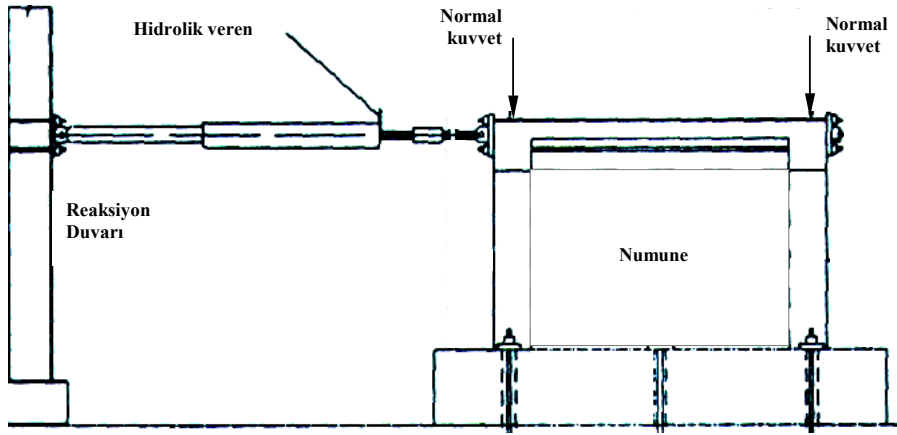
4.2 Deney Yükleme ve Ölçüm Düzeneği

Deney numuneleri çevrimsel yatay yükler etkisinde yerdeğiştirme kontrollü olarak denenmiştir. Yatay yükler numuneye, eş zamanlı kullanılan iki adet hidrolik veren ile uygulanmıştır. Hidrolik verenlerin herbiri ± 250 kN yük ve ± 300 mm yerdeğiştirme kapasitelidir. Deney sırasında kolonlara, kolon normal kuvvet taşıma kapasitenin %20'sine eşit miktarda normal kuvvet hidrolik pompalar ile uygulanmış ve normal yük değerleri yük ölçer ile ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 4.7 ve 4.8'de görülmektedir.

İlk yerdeğiştirme adımlarında, numuneye yerdeğiştirme değerleri itme ve çekme için birer kez uygulanmış, ileri adımlarda ise herbir yerdeğiştirme değeri için üçer adet itme ve çekme yapılmıştır. Deney sırasında numuneye uygulanan yerdeğiştirme değerleri ve bunlara karşı gelen göreceli kat öteleme oranları (δ/H) Şekil 4.9 ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



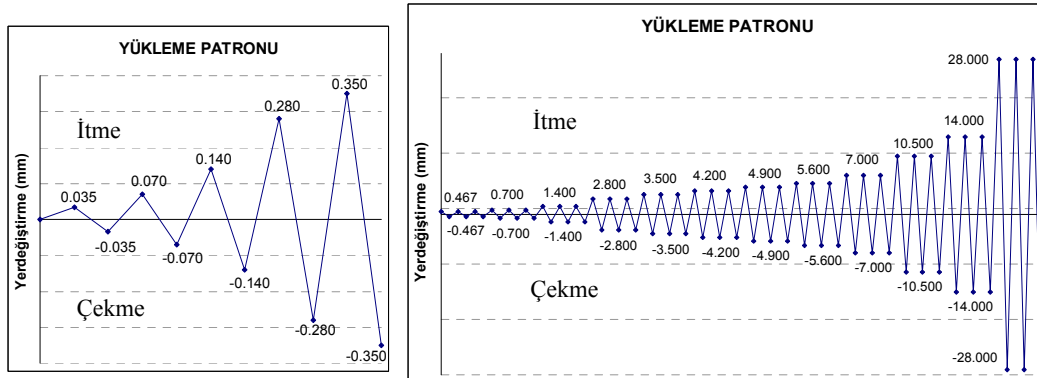
Şekil 4.6 : N4 numunesinin CFRP ile güçlendirilme aşamaları.



Şekil 4.7 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin yükleme düzeneği.



Şekil 4.8 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin deney düzeneği.



Şekil 4.9 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numenelerine uygulanan yerdeğiştirme değerleri.

Çizelge 4.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi görelî kat ötelemesi oranı (δ/H) değerleri.

δ (mm)	δ/H (%)	Tekrar Sayısı		δ (mm)	δ/H (%)	Tekrar Sayısı		δ (mm)	δ/H (%)	Tekrar Sayısı
0.035	0.0025	1		0.700	0.05	3		5.600	0.40	3
0.070	0.01	1		1.400	0.10	3		7.000	0.50	3
0.140	0.01	1		2.800	0.20	3		10.500	0.75	3
0.280	0.02	1		3.500	0.25	3		14.000	1.00	3
0.350	0.03	1		4.200	0.30	3		28.000	2.00	3
0.467	0.03	3		4.900	0.35	3				
δ : Hedef tepe yerdeğiştirmesi, δ/H : δ 'e karşı gelen görelî kat ötelemesi oranı, H : Numune yüksekliği.										

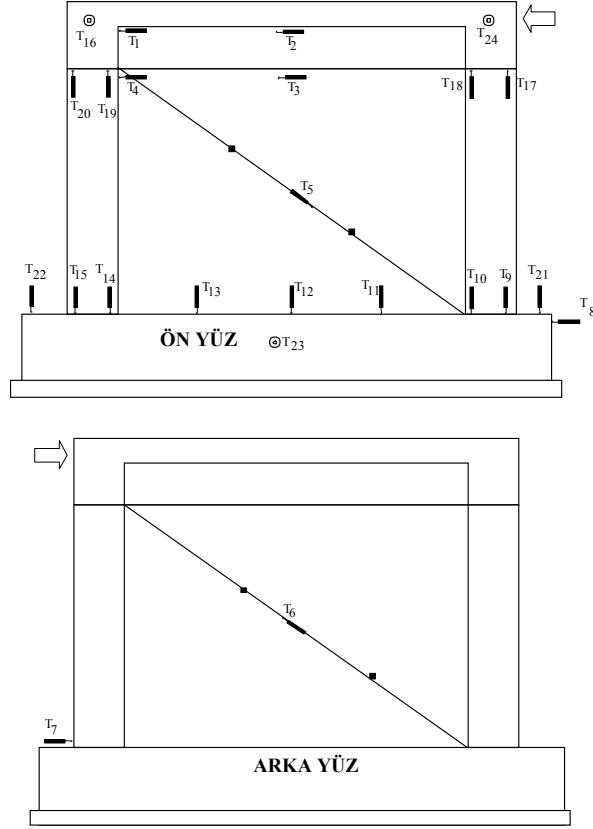
Artan yatay yükler altında yerdeğiştirme ve yük değerleri kayıt edilen numuneler göçmeye kadar zorlanmış, hasar durumu ve göçme şekilleri gözlenmiştir. Deney sırasında numunenin tepe yatay yerdeğiştirme değerleri doğrusal yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) ile ölçülmüş ve kayıt edilmiştir. Kolonların alt ve üst kısımlarındaki yerdeğiştirmeler, dolgu duvarın yerdeğiştirmesi ile her iki diyagonalî doğrultusundaki yerdeğiştirmeleri de ölçülen diğer değerlerdir. Ayrıca temel dönmesi ve ötelenmesi ile numunenin düzlemdışı yerdeğiştirmeleri deney sırasında yerdeğiştirme ölçerler ile devamlı ölçülmüş ve kontrol edilmiştir. Deney sırasında çatlak ölçümleri yapılmış ve hasar durumları kayıt edilmiştir. Kullanılan ölçüm sistemi Şekil 4.10'da görölmektedir.

4.3 Deney Sonuçları

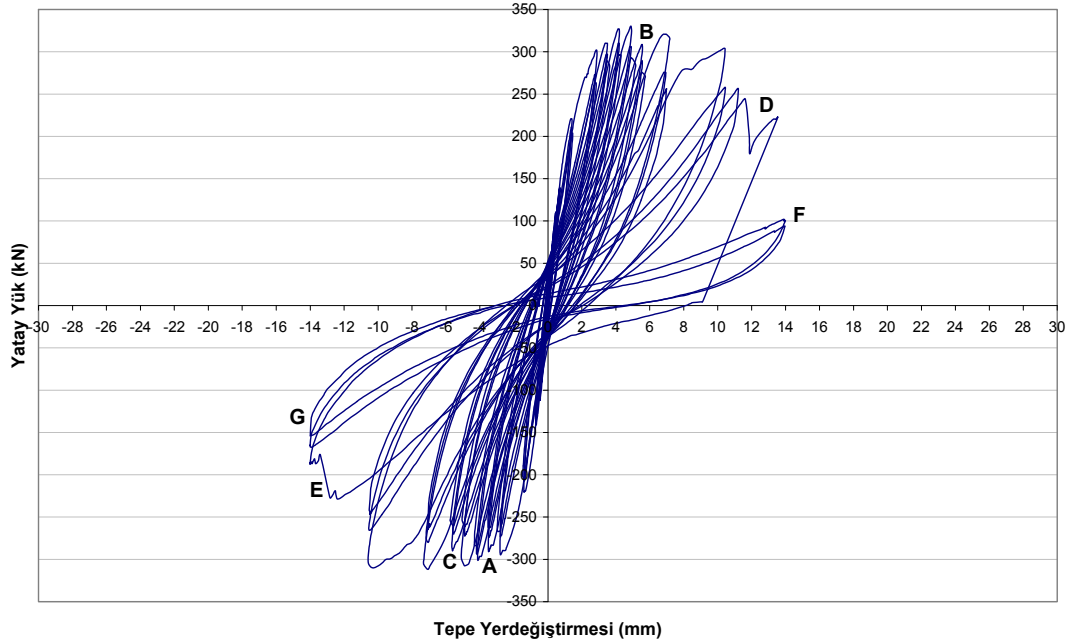
4.3.1 Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri

Numunelerin yatay yük etkisindeki davranışının incelenmesinde öncelikle sistemin davranışını en iyi temsil eden yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri elde edilmiştir. Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri, çevrim eğrilerinde her bir hedef yerdeğiştirme adımındaki çevrimlerin en büyük yatay yük değerine karşı gelen nokta alınarak oluşturulmuştur.

N2 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 4.11'de verilmiştir. ± 14 mm yerdeğiştirme adımı, (görelî kat ötelemesi oranı, $\delta/H=0.01$), sırasında dolgu duvarın diyagonalleri üzerinde bulunan CFRP şeritlerin çekme etkisinde ardarda kopması ile numunenin ve deney düzeneğinin stabilizasyonu bozulduğundan deney sonuçlandırılmıştır.



Şekil 4.10 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi ölçüm sistemi.

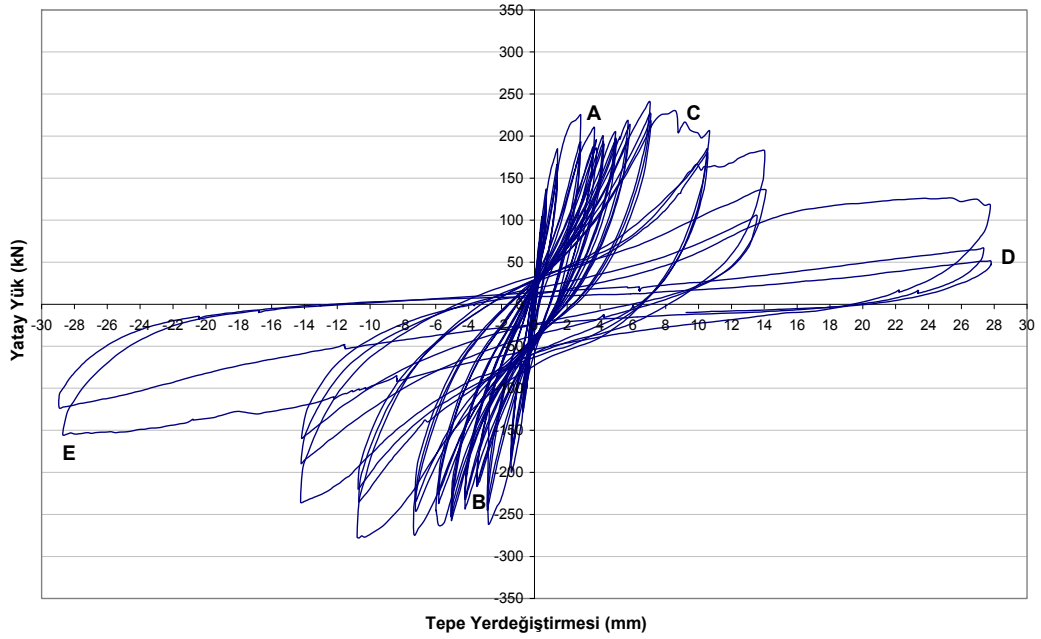


Şekil 4.11 : N2 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.

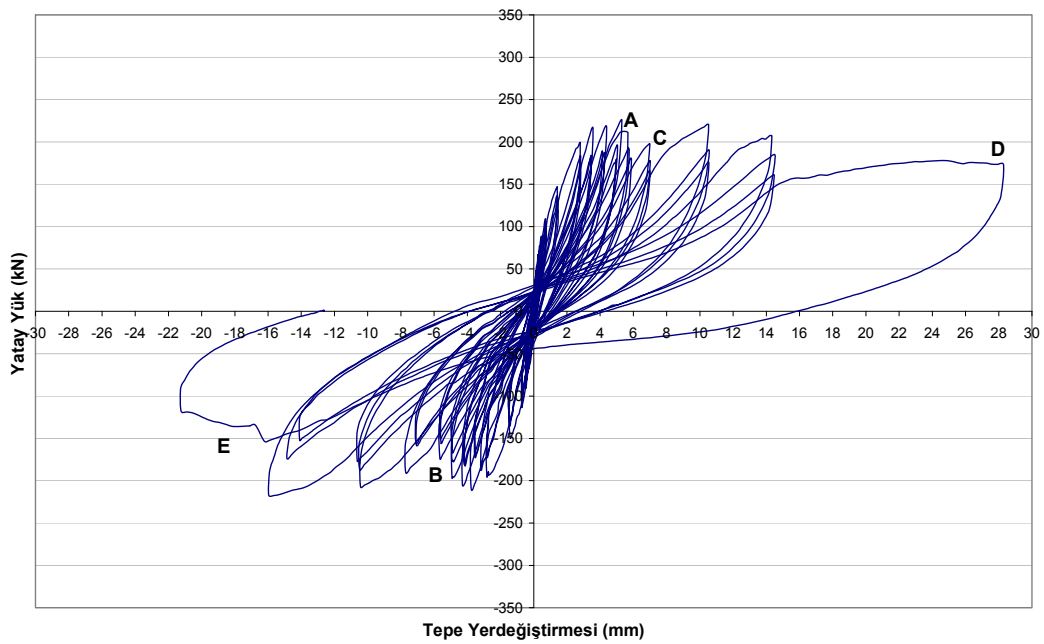
N3 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu numunede dolgu duvarın diyagonalleri üzerindeki CFRP 10.5 mm yerdeğiştirme adımımda ($\delta/H=0.75$) kopmuştur. Kolonda ve kolon-kiriş birleşim

bölgesinde önceki adımlarda oluşan çatlaklar genişlemiş ve bu bölgedeki betonda ezilme olduğu gözlenmiştir. Bu hasarlar +28 mm yerdeğiştirme adımının, ($\delta/H=\%2$), üçüncü itmesinde numuneyi göçmeye götürmüştür.

N4 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 4.13'te verilmiştir. Kolonda önceki yerdeğiştirme adımlarında oluşan kayma çatlağı 28 mm yerdeğiştirme adımının, ($\delta/H=\%2$), ilk çekmesinde oldukça genişlemiştir. Bu çatlak kolonun burkulmasına sebep olmuş ve numune göçmeye gitmiştir.

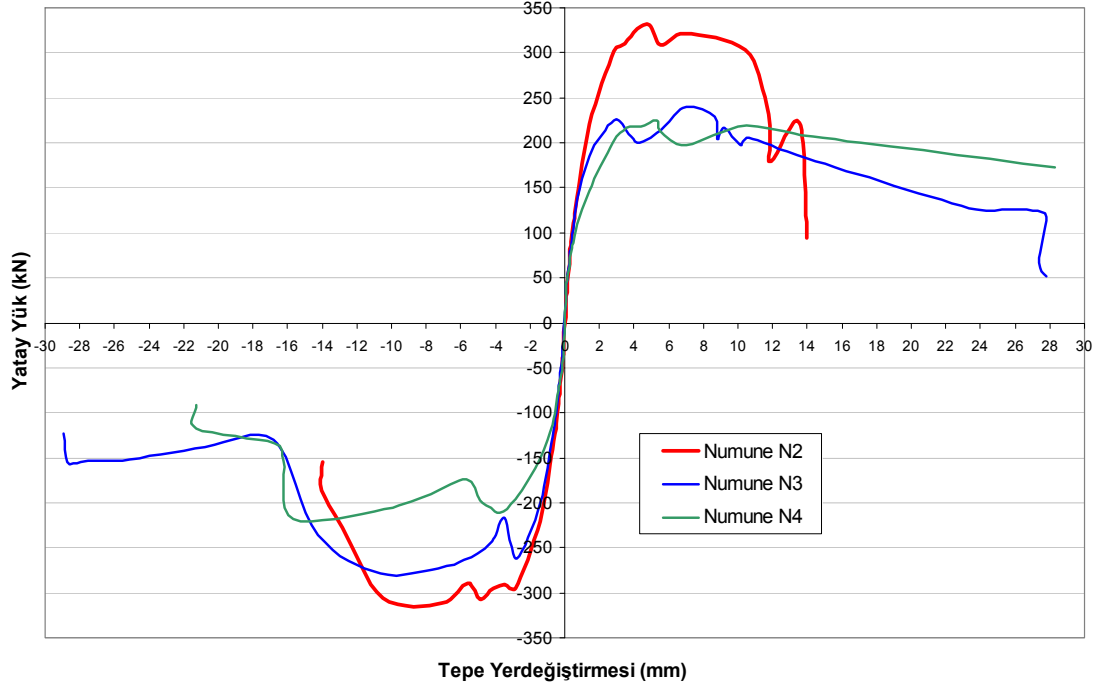


Şekil 4.12 : N3 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.

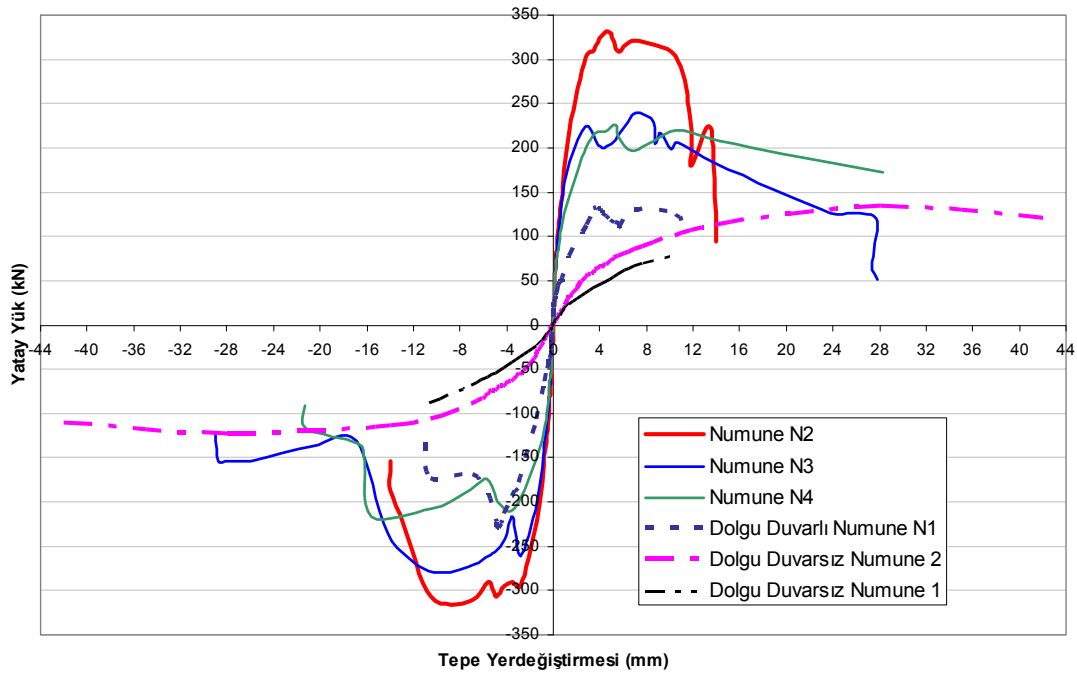


Şekil 4.13 : N4 numunesinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi.

CFRP ile güçlendirilmiş tüm numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri bir diyagram üzerinde Şekil 4.14'te verilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için referans numuneler ve güçlendirilmiş numunelere ait yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri aynı diyagram üzerinde gösterilmiştir, Şekil 4.15.



Şekil 4.14 : N2, N3 ve N4 numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.



Şekil 4.15 : Tüm numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.

4.3.2 Referans numunelerin davranışları ve göçme şekilleri

Tek katlı-tek açıklı betonarme çerçeve numunelerinin hasar ve göçme şekilleri detaylı olarak Ek A’da verilmiştir.

4.3.2.1 Dolgu duvarsız numune 1

‘Dolgu Duvarsız Numune 1’ ilk referans numunedir. Bu numunede ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımı (görelî kat ötelemesi oranı, $\delta/H = \%0.25$) kolonlarda eğilme ve kolon uç bölgelerinde kayma çatlakları oluşmuştur. Ayrıca bu adımda kolon-kiriş arayüzünde çatlaklar meydana gelmiştir, Şekil 4.16a. Sözü edilen çatlakların genişliklerinin ve uzunluklarının ± 4.2 mm ve ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımlarında, (δ/H , sırasıyla, $\%0.3$ ve $\%0.35$), arttığı gözlenmiştir, Şekil 4.16b. Kolon uç bölgelerindeki çatlaklarda da artış olmuştur.

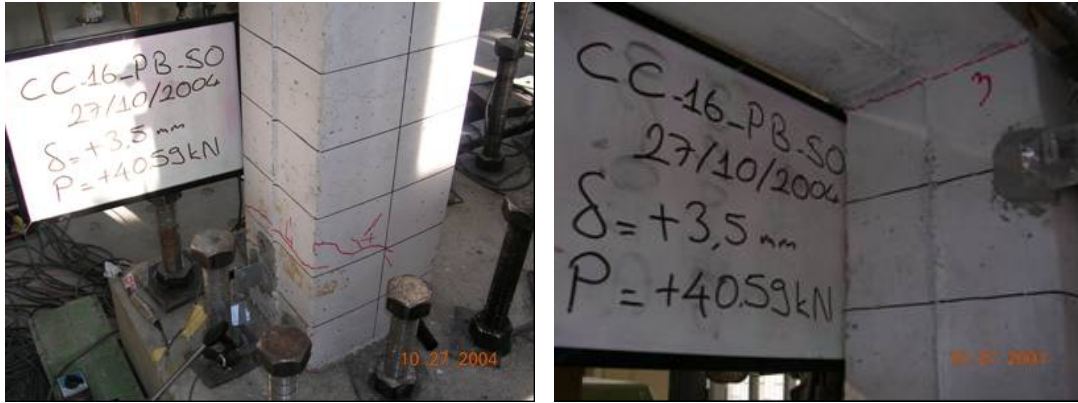
± 10.5 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%0.75$), kolonların alt ve üst kısımlarında kayma çatlakları oluşmuş ve kolon-kiriş arayüzündeki çatlaklar kirişin iç bölgelerine doğru ilerlemiştir, Şekil 4.16c. Deney, numunenin daha sonra güçlendirilerek test edilebilmesi amacı ile bu yerdeğiştirme adımı bitirilmiştir. Deney sonunda yükleme aletleri numuneden söküldükten sonra, kiriş-kolon arayüzünde oluşan çatlakların kirişin üst bölgesinde birleşerek ilerlediği gözlenmiştir, Şekil 4.16c.

4.3.2.2 Dolgu duvarsız numune 2

‘Dolgu Duvarsız Numune 2’ ikinci referans numunedir. Numunede ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımı (görelî kat ötelemesi oranı, $\delta/H = \%0.25$), kolon-kiriş arayüzünde çatlaklar oluşmuştur. ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%0.35$) kolonlarda eğilme çatlakları olduğu gözlenmiştir. ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%0.75$), kolonların alt ve üst kısımlarında yeni eğilme çatlakları oluşmuş ve önceki adımlardaki çatlaklar büyümüştür, Şekil 4.17a. ± 14 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%1$), ise mevcut çatlaklar büyümüştür, Şekil 4.17b.

± 28 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%2$), düğüm noktası civarında çatlaklar oluşmuş ve daha sonraki çevrimlerde kolonların üst uç kısımlarında betonda ezilme olmuştur, Şekil 4.18. ± 42 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H = \%3$), kolonların alt uç kısımlarında da ezilme olmuş ve kolon üst ve alt uçlarında beton dökülerek

kolonların düşey donatısı ortaya çıkmıştır, Şekil 4.19. Deney bu yerdeğiştirme adımı tamamlandıktan sonra bitirilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.16 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 1’in ± 3.5 mm (a), ± 4.2 mm (b) ve ± 10.5 mm (c) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.



(a)



(b)

Şekil 4.17 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 10.5 mm (a) ve ± 14 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.



Şekil 4.18 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 28 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil 4.19 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 42 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

4.3.2.3 Numune N1

Numune N1 sıvalı dolgu duvarlı referans numunedir. Numune N1’in kolonlarında küçük yerdeğiştirme adımlarında eğilme çatlakları gözlenmiştir. Dolgu duvarda oluşan eğik çatlak, ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımı, ($\delta/H = \%0.4$), duvarın üst köşelerinde oluşan diğer çatlaklar ile birleşmiştir, Şekil 4.20a. İtme ve çekme adımlarına devam edildikçe bu bölgedeki sıva parçalanmış ve dökülmüştür, Şekil 4.20b. Kolon-kiriş arayüzünde oluşan çatlak, dolgu duvar-kiriş arasının çatlaması ve kirişteki kayma çatlakları da bu yerdeğiştirme adımı gözlenen diğer hasarlardır.

± 10.5 mm yerdeğiştirme adımı, ($\delta/H = \%0.75$), dolgu duvarın üst köşesindeki sıvada dökülme artmıştır. Dolgu duvarın arka yüzünde duvarın üst bölgesindeki sıvalar tamamen dökülmüştür, Şekil 4.21. Dolgu duvar ve kirişin arası yaklaşık olarak 5 mm ayrılmıştır. Kolon ve kiriş üzerindeki bazı eğik çatlakların dolgu duvar üzerinde de devam ettiği gözlenmiştir. Önceki adımlarda kiriş ve kolonlarda oluşan çatlakların genişlikleri ve uzunlukları artmıştır ve yeni kayma çatlakları oluşmuştur.

Düğüm noktasında da yeni çatlaklar oluşmuştur. Dolgu duvarın üst kısımlarındaki hasarlar artmasına rağmen, bu adımda duvarın alt bölgesinde yeni bir çatlak oluşmamıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.20 : Numune N1'in ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.



Şekil 4.21 : Numune N1'in ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

± 11 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.78$), dolgu duvarın alt kısımlarında da çatlaklar artmaya başlamıştır, Şekil 4.22. Duvar üzerindeki diyagonal çatlak

uzayarak duvarın alt kısmındaki çatlaklarla birleşmiş ve bu bölgede sıva dökülmüştür. Bu adımda deney düzeneğinin getirdiği kısıtlamalardan dolayı deneye son verilmiştir.



Şekil 4.22 : Numune N1'in ± 11 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

4.3.3 Numune N2'nin davranışı ve göçme şekli

Numune N2'nin kolonlarında eğilme çatlakları ilk olarak ± 0.7 mm yerdeğiştirme adımımda görülmüştür. Dolgu duvarın diyagonalı doğrultusunda alınan ölçümler, duvarın doğrusal davranışının da, görelî kat ötelemesi oranının (δ/H) % 0.05 olduğu bu yerdeğiştirme adımımdan sonra sona erdiğini göstermektedir.

± 1.4 mm yerdeğiştirme adımımda, ($\delta/H = \%0.01$), dolgu duvarın üzerinde önceki adımlarda oluşmuş olan eğik çatlakların genişlikleri ile boyları artmış ve dolgu duvarın üzerindeki diyagonal CFRP şeritin civarında yeni eğik çatlaklar gözlenmiştir.

± 2.8 mm adımımda, ($\delta/H = \%0.2$), duvar üzerinde yeni diyagonal çatlaklar oluşmuştur, Şekil 4.23. Bu adımda basınç etkisindeki diyagonal CFRP şeritlerin üst köşelerde duvar üzerinden hafifçe ayrıldığı gözlenmiştir. Ayrıca çekme çevriminde, basınç diyagonalinin olduğu kolon-kiriş-duvar birleşim bölgesinden başlayan ve duvar üzerindeki CFRP şeritte de devam eden yeni bir çatlak meydana gelmiştir. Kirişin düzlemsiz yüzünde ise kayma çatlakları oluşmuştur. Bir sonraki

yerdeğiştirme adımının çekmesinde yükte gözlenen düşüşe bu çatlakların neden olmuş olabileceği düşünölmüştür, şekil 4.11'deki 'A'ya bakınız.



Şekil 4.23 : Numune N2'nin ± 2.8 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

± 3.5 mm yerdeğiştirme adımımda, ($\delta/H = \%0.25$), kiriş ve kolonlarda kayma çatlakları oluşmuştur, şekil 4.24. Dolgu duvar ve kolon üzerindeki çatlaklar birleşmiş, basınç etkisindeki diyagonal CFRP dolgu duvar üzerinden ayrılmış ve kiriş-kolon arayüzü çatlamıştır.



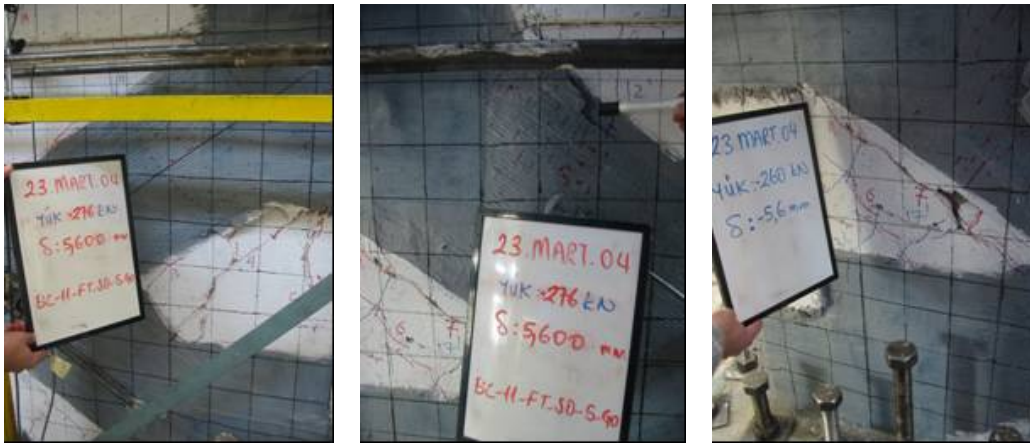
Şekil 4.24 : Numune N2'nin ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

Basınç etkisindeki diyagonal CFRP'lerin dolgu duvardan ayrıldığı alan ve ayrılma miktarı ilerleyen yerdeğiştirme adımları ile artmıştır. ± 4.9 mm yerdeğiştirme

adımında, ($\delta/H = \%0.35$), tüm diyagonal CFRP şeritlerin dolgu duvardan ayrıldığı gözlenmiştir, Şekil 4.25a.



(a)



(b)

Şekil 4.25 : Numune N2'nin ± 4.9 mm(a) ve ± 5.6 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.

± 5.6 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.4$), N2 numunesinin sıvaları parçalanmaya ve dökülmeye başlamıştır, Şekil 4.25b. ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımında pik yükteki düşüşün, bu hasar durumundan dolayı meydana gelmiş olması mümkündür, Şekil 4.11'deki 'B' ve 'C'ye bakınız.

Tuğlaların parçalanması ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.75$), başlamıştır. Bu adımda kolonda yeni kayma çatlakları oluşmuş ve CFRP'nin dolgu duvar üzerinden ayrılması büyük değerlere ulaşmıştır, Şekil 4.26.

± 14 mm yerdeğiştirme adımının, ($\delta/H = \%1$), ilk itme çevrimi yapılırken, numunenin arka tarafında bulunan çekme etkisindeki diyagonal CFRP, hedef yerdeğiştirmeye ulaşılmadan, $+11.64$ mm yerdeğiştirme düzeyinde kopmuş ve yükte ani düşme gözlenmiştir, Şekil 4.11'deki 'D'ye ve Şekil 4.27'ye bakınız. Gerekli gözlemler

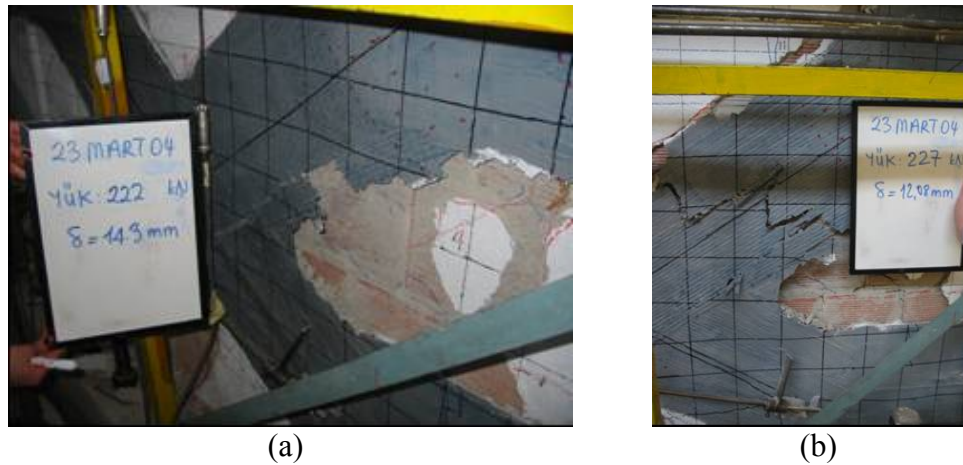
yapıldıktan sonra hedef yerdeğiştirmeye ulaşmak amacı ile yüklemeye devam edilmiş ve bu defa  n yüzdeki çekme etkisindeki diyagonal CFRP +13.54 mm değerinde kopmuştur. Bu adımımda ilk çekme çevrimi yapılırken, önce yatay yükte düşüş gözlenmiş ve daha sonra çekme etkisindeki diyagonal CFRP -12.84 mm yerdeğiştirme değerinde kopmuştur, şekil 4.11'deki 'E'ye ve şekil 4.28'e bakınız.



şekil 4.26 : Numune N2'nin ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımımdaki hasar durumu.



şekil 4.27 : Numune N2'de +11.64 mm yerdeğiştirme değerinde dolgu duvar  zerindeki CFRP'nin kopması.



şekil 4.28 : Numune N2'nin ± 14 mm yerdeğiştirme adımımda ilk itme (a) ve çekme (b)  evrimlerinde dolgu duvar  zerindeki CFRP'lerin kopması.

Numune N2'nin deneyi ± 14 mm yerdeğiştirme adımınnn, ($\delta/H = \%1$), üçer itme ve çekme çevrimleri tamamlandıktan sonra bitirilmiştir. ± 14 mm yerdeğiştirme adımınnn son çevrimlerindeki hasar durumu Şekil 4.29'da gösterilmiştir. 14 mm yerdeğiştirme adımınnn ilk itme ve çekme çevrimlerinde dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritler çekme etkisinde ardarda koptuktan sonra dolgu duvardaki hasarın arttığı ve numunenin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinin dolgu duvarsız referans çerçeveninkine yaklaştığı gözlenmiştir, Şekil 4.11'deki 'F' ve 'G'ye bakınız. Numune N2'nin yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumunu gösteren diğerk şekiller Ek A'da verilmiştir.



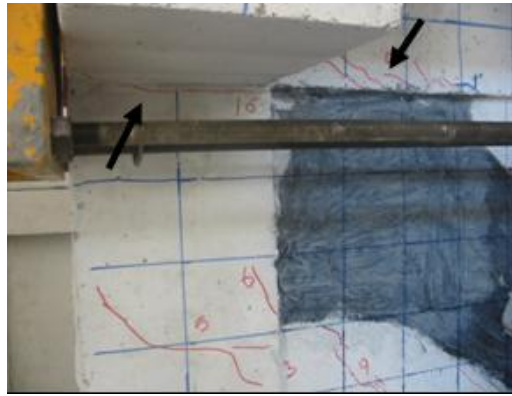
Şekil 4.29 : Numune N2'nin + 14 mm yerdeğiştirme adımı üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.

4.3.4 Numune N3'ün davranışı ve göçme şekli

Numune N3'te itmede ve çekmede simetrik olmayan hasar durumundan dolayı itme ve çekme pik yüklerinin simetrik olmadığı gözlenmiştir. Dolgu duvarın üzerinden diyagonali doğrultusunda alınan ölçümler, duvarın doğrusal davranışının ± 0.7 mm yerdeğiştirme adımından, (görelî kat öteleme oranı, $\delta/H = \%0.05$), sonra sona erdiğini göstermektedir. Bu yerdeğiştirme adımında sadece kirişte, CFRP ankraj elemanlarının civarında bir çatlak gözlenmiştir. ± 1.4 mm yerdeğiştirme adımında ($\delta/H = \%0.1$) kolonlarda başlayıp dolgu duvar üzerinde devam eden eğik çatlaklar oluşmuştur, Şekil 4.30. Bu adımda, kolonlarda eğilme çatlakları ile kiriş-kolon arayüzünde oluşan ve kiriş içine doğru giden çatlaklar da gözlenmiştir.

± 2.8 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.2$), dolgu duvar ve çerçeve elemanları üzerindeki eğik çatlakların uzunlukları ve genişlikleri artmıştır. ± 3.5 mm

yerdeğiştirme adımımda, ($\delta/H = \%0.25$), ise kiriş-kolon arayüzünde bulunan çatlakların genişlikleri önemli ölçüde artmış ve bu çatlaklar kolonlar üzerinde kayma çatlakları olarak devam etmişlerdir, Şekil 4.31. Bu tip çatlaklar dolgu duvarsız referans çerçeve ve Numune N2’de de oluşmuş olmasına rağmen, bu numunelerde genişliklerinde ve uzunluklarında deney boyunca büyük miktarda artış olmamıştır. Numune N3’ün itme ve çekme adımlarındaki simetrik olmayan hasar durumu bu yerdeğiştirme adımımda başlamıştır. ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımının pik yüklerindeki düşüş bu hasar durumuna bağılı olarak açıklanabilir, Şekil 4.12’deki ‘A’ ve ‘B’ye bakınız.

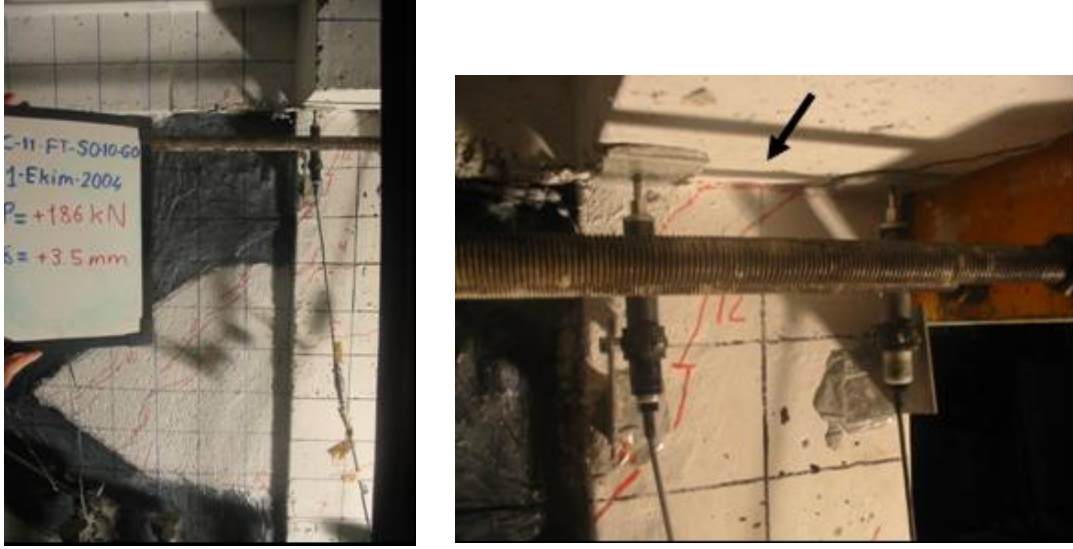


Şekil 4.30 : Numune N3’ün ± 1.4 mm yerdeğiştirme adımımdaki hasar durumu.

± 4.9 mm yerdeğiştirme adımımda, ($\delta/H = \%0.35$), kiriş-kolon arayüzündeki çatlakların genişliğı 8 mm’e ulaşmıştır. Ayrıca kirişte bir kayma çatlaklı oluşmuş, dolgu duvar üzerinde yeni eğik çatlaklar gözlenmiş ve dolgu duvar üzerinde bulunan basınç etkisindeki CFRP duvardan ayrılmıştır.

Dolgu duvar üstündeki sıva ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımımda, ($\delta/H = \%0.4$), parçalanmaya ve yer yer dökülmeye başlamıştır, Şekil 4.32. Sıva parçaları duvardan

kaldırıldığında, tuğlanın da parçalandığı görülmüştür. Diyagonal CFRP'nin duvardan ayrıldığı bölgelerin arttığı bu yerdeğiştirme adımında numunede önemli hasarlar olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.31 : Numune N3'ün ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

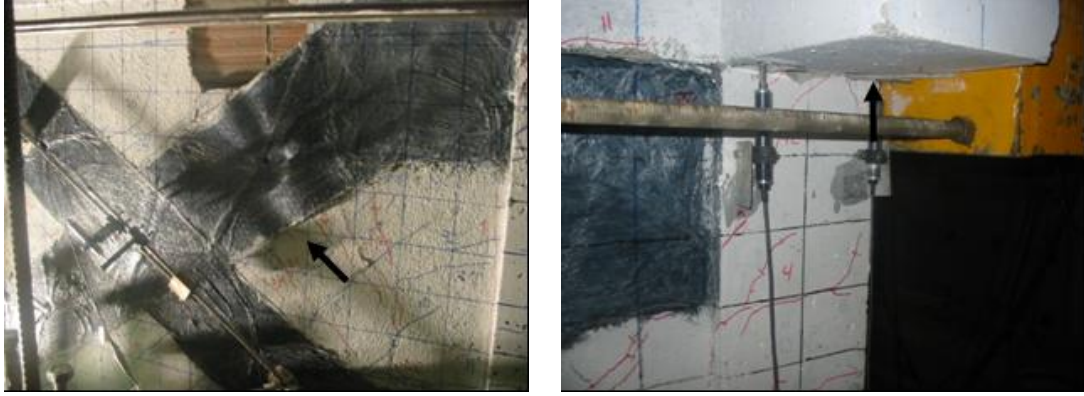


Şekil 4.32 : Numune N3'ün ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

± 7.0 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.5$), kiriş-kolon arayüzünde betonda ezilme başlamış ve diyagonal CFRP'nin duvardan ayrılması büyük miktara ulaşmıştır, Şekil 4.33.

± 10.5 mm yerdeğiştirme adımının, ($\delta/H = \%0.75$), ilk itme çevriminde, duvarın her iki yüzünde bulunan çekme etkisindeki diyagonal CFRP şeritler, daha önceki çevrimlerde duvar üzerinden kalktığı kesitlerden kopmuşlardır, Şekil 4.34. CFRP'nin kopmasından dolayı yükteki kademeli düşüş yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisinde görülmektedir, Şekil 4.12'deki 'C'ye bakınız. CFRP'deki kopmadan sonra

betonarme çerçevede ve dolgu duvardaki hasarlar önemli ölçüde artmıştır. Sonraki çevrimlerde kolonda yeni bir eğik çatlak oluşmuş ve bu bölgede 5 mm'lik bir hareket olduğu gözlenmiştir, Şekil 4.35. Üçüncü çekme adımında kiriş ve bu kolon birbirinden ayrılmış ve kolon yaklaşık olarak 20 mm ötelenmiştir, Şekil 4.36. Son olarak kiriş-dolgu duvar arasında oluşan bir çatlağın kolon üzerinde de devam ettiği görülmüştür.



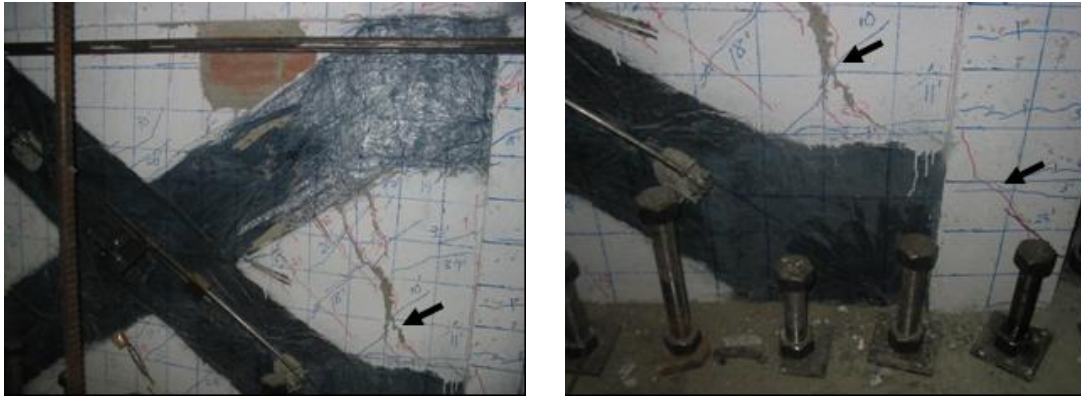
Şekil 4.33 : Numune N3'ün ± 7.0 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil 4.34 : Numune N3'ün + 10.5 mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevriminde CFRP'nin kopması ve hasar durumu.



Şekil 4.35 : Numune N3'ün -10.5 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde hasar durumu.



Şekil 4.36 : Numune N3'ün -10.5 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevriminde hasar durumu.

± 14 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%1$), dolgu duvar, betonarme çerçeve ve CFRP'de çok önemli hasarlar gözlenmiştir. Üçüncü itme çevriminde duvarın iki yüzünde bulunan basınç etkisindeki CFRP şeritler duvardan ayrılmışlardır, Şekil 4.37. Kiriş-dolgu duvar arasında kalan bölgede sıva ve harçta parçalanma olduğu görülmüştür. Kolonda daha önceki adımlarda oluşan eğik çatlağın genişliği oldukça artmıştır. Bu kolonun orta kısımlarındaki betonda da ezilme olmuş ve beton

paspayları dökülerek yatay donatılar ortaya çıkmıştır. Dolgu duvarın bazı bölgelerinde sıva ve tuğlalar parçalanmış, dökülmüştür ve dolgu duvarda düzlemdışı yerdeğiştirme olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.37 : Numune N3'ün -14 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevrimindeki hasar durumu.

± 28 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%2$), üçer itme ve çekme çevrimleri yapılmıştır. İlk itme ve çekme çevrimlerinde, tuğlalarda parçalanma ile kiriş ve kolonlarda yeni kayma çatlakları gözlenmiştir. Kolonda önceki adımlarda oluşan kayma çatlaklarının boyu ve genişliği artmış ve kiriş-kolon arayüzündeki betonda ezilmeler olmuştur, Şekil 4.38. Dolgu duvar çerçeveden ayrılmıştır ve dolgu duvar üzerindeki CFRP'den kirişe yük aktaran CFRP ankraj elemanları bu boşluklardan görülebilmektedir. CFRP ankraj elemanlarının bazı lifleri kopmasına rağmen kirişe yük aktarmaya devam etmiştir, Şekil 4.39-4.41a. Dolgu duvarın çerçeve elemanlarından ayrılması ikinci itme ve çekme çevrimlerinde artmıştır. Kolonun üst tarafındaki beton tamamen ezilmiştir. Beton paspayı döküldükten sonra kolonun düşey donatılarında plastik şekildeğiştirme olduğu gözlenmiştir. Her iki kolonda da oluşan büyük kayma çatlakları kolonları iki parçaya ayırmıştır ve dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin bazı lifleri kopmuştur, Şekil 4.39 ve 4.40. ± 28 mm yerdeğiştirme adımında Numune N3'ün çevrim eğrileri dolgu duvarsız referans çerçevenin çevrim eğrisine yaklaşmıştır, Şekil 4.12'deki 'D' ve 'E'ye bakınız.

Numune N3'te göçme, ± 28 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevriminde hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldıktan sonra, kolonun üst kısmının yükleme düzlemi dışı yönde ötelenmesi ile olmuştur, Şekil 4.41. Numune N3'un yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumunu gösteren diğer şekiller Ek A'da verilmiştir.



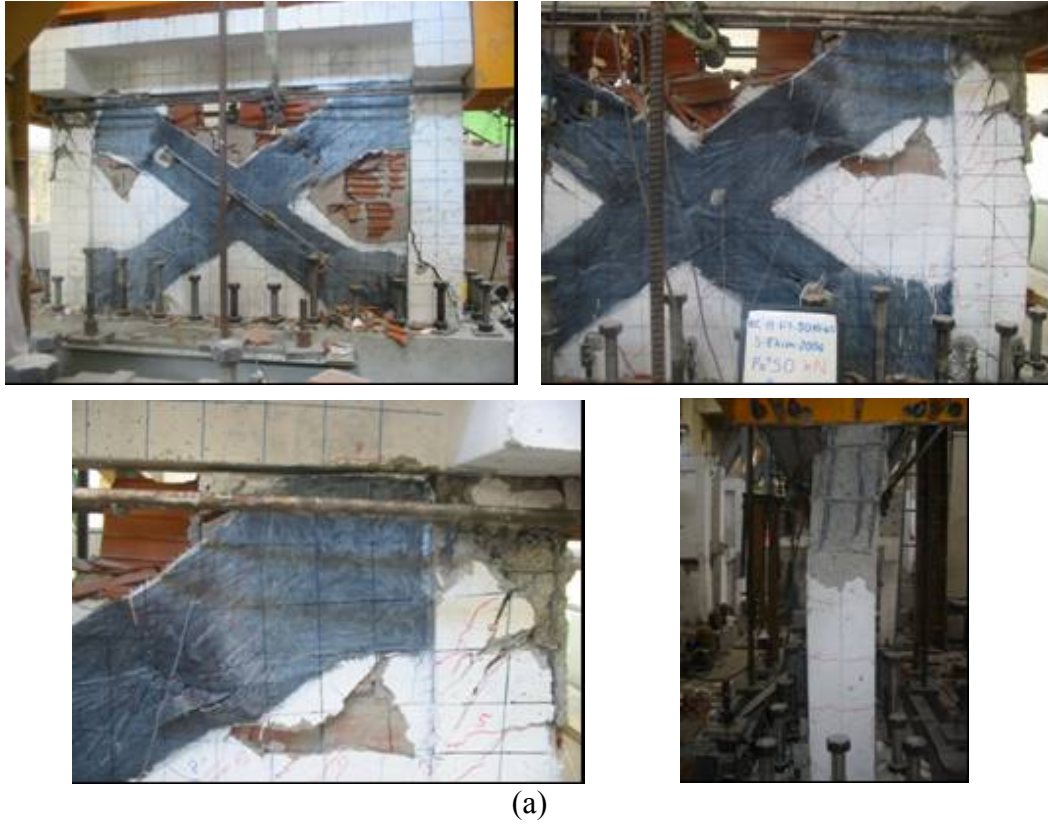
Şekil 4.38 : Numune N3'ün +28 mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevrimindeki hasar durumu.



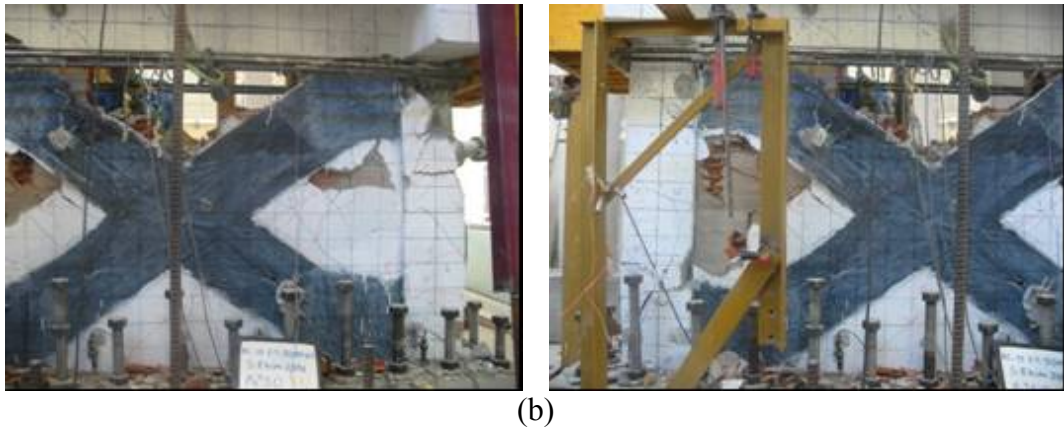
Şekil 4.39 : Numune N3'ün +28 mm yerdeğiştirme adımının ikinci itme çevrimindeki hasar durumu.



Şekil 4.40 : Numune N3'ün -28 mm yerdeğiştirme adımının ikinci çekme çevrimindeki hasar durumu.



(a)

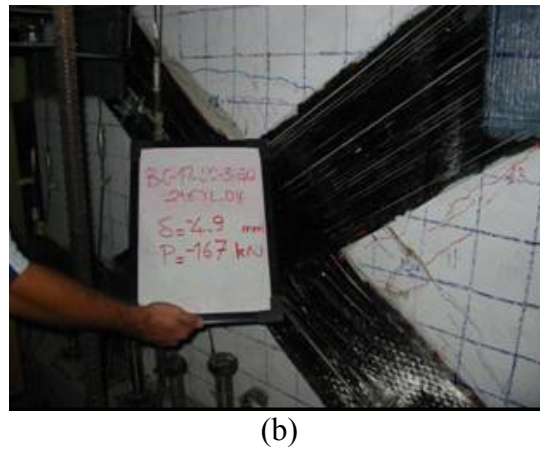
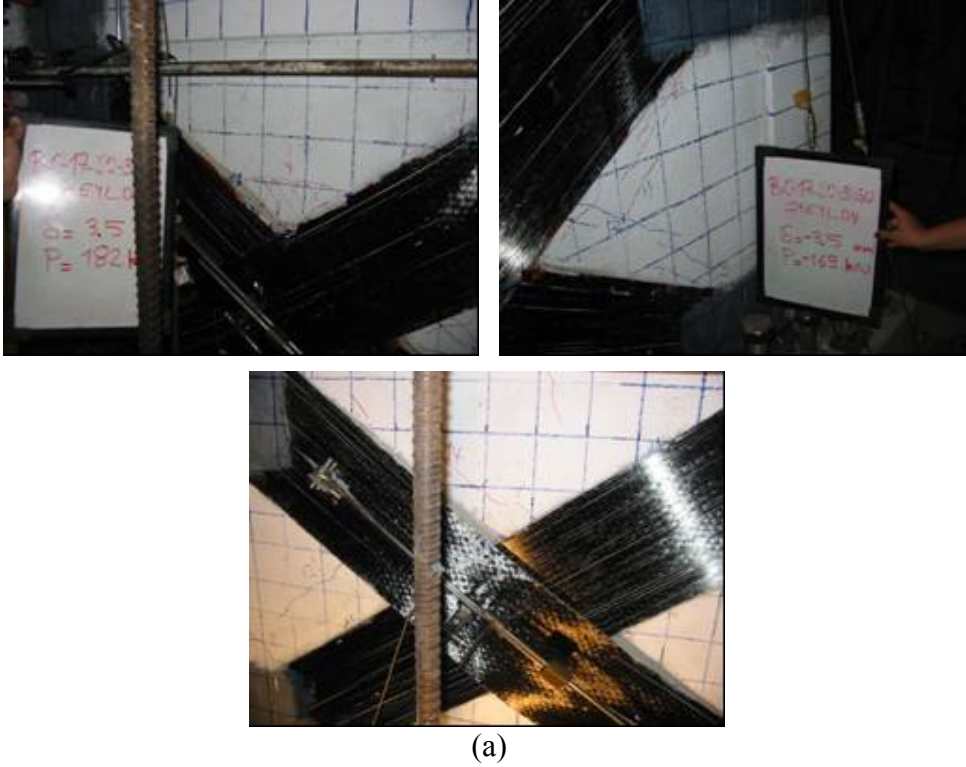


(b)

Şekil 4.41 : Numune N3'ün +28 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu (a) ve göçme şekli (b).

4.3.5 Numune N4'ün davranışı ve göçme şekli

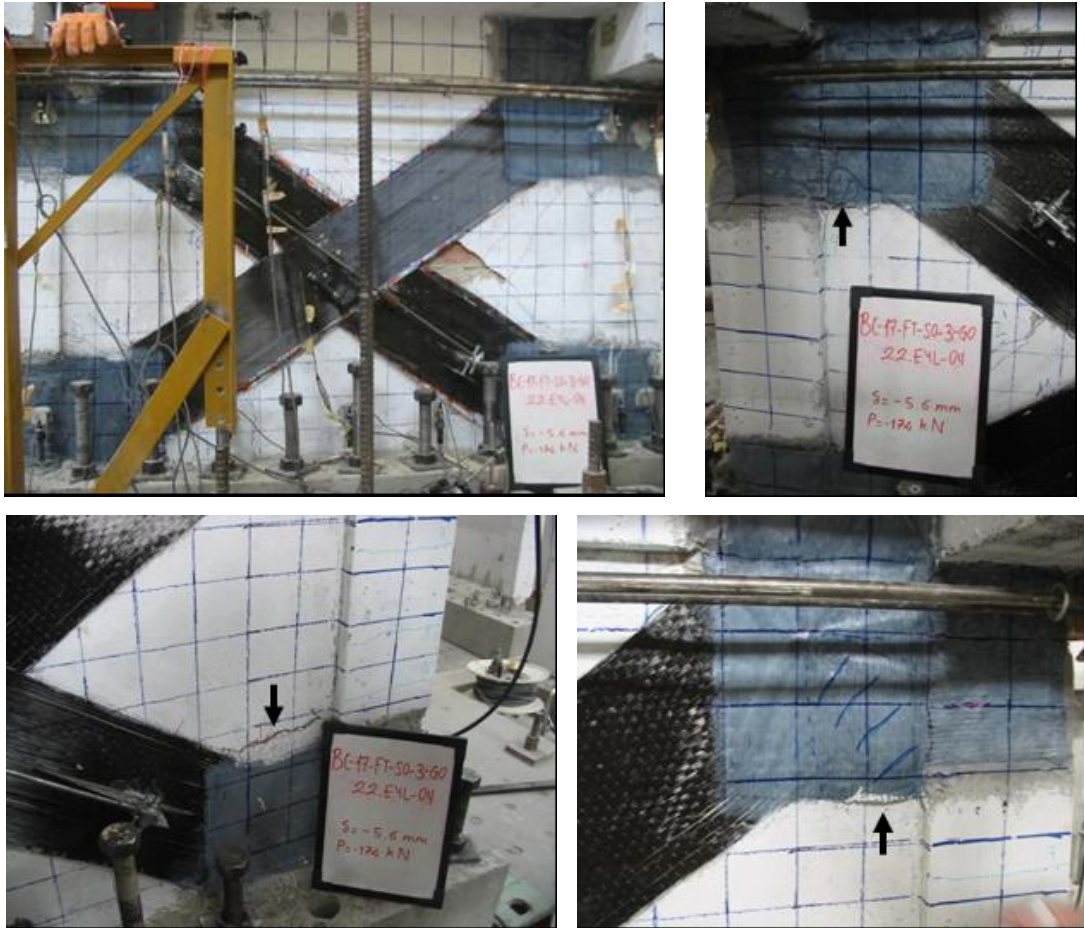
Numune N4'te dolgu duvar üzerinden alınan ölçümlere göre dolgu duvarın doğrusal davranışı, görelî kat ötelemesi oranının (δ/H) %0.05 olduğu ± 0.7 mm yerdeğiştirme adımımdan sonra sona ermiştir. ± 1.4 mm ve ± 2.8 mm yerdeğiştirme adımlarında, (δ/H , sırasıyla, %0.1 ve 0.2), dolgu duvarda eğik çatlaklar oluşmuştur. ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımda, ($\delta/H = \%0.25$), sıva parçalanmaya başlamıştır, Şekil 4.42a. Bu yerdeğiştirme adımda dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin basınç ve çekme gerilmeleri etkisinde gevşek ve gergin halleri açıkça gözlenebilmiştir.



Şekil 4.42 : Numune N4'ün ± 3.5 mm (a) ve ± 4.9 mm (b) yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumları.

± 4.2 mm ve ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımlarında, (δH , sırasıyla, %0.3 ve 0.35), yeni eğik çatlaklar ve sıvada dökülmeler gözlenmiştir, Şekil 4.42b. ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımımda betonarme çerçevede, dolgu duvarda ve CFRP’de önemli bir hasar görülmemiştir.

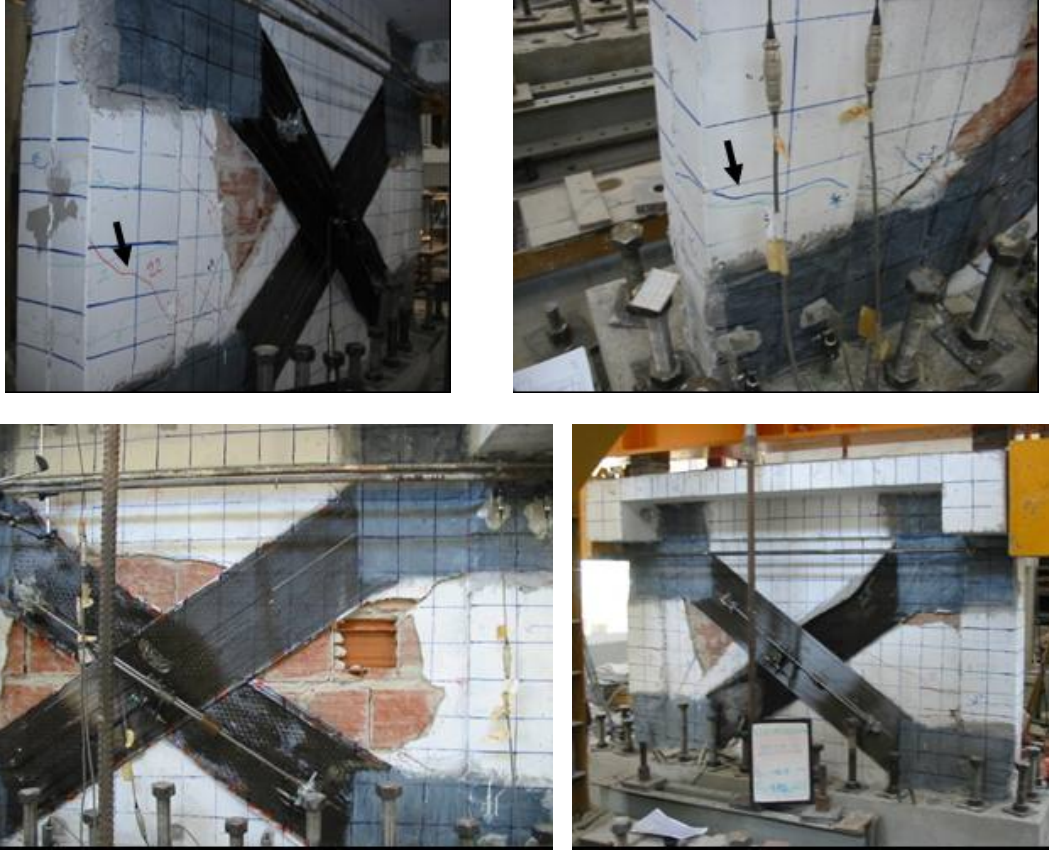
± 5.6 mm yerdeğiştirme adımının, ($\delta H = \%0.4$), ilk çekme çevriminde, dolgu duvara sadece köşelerden epoksi ile yapıştırılmış CFRP şeritler, bu bölgelerde duvardan ayrılmıştır, Şekil 4.43. Sonraki çevrimlerde sıvada ve tuğladaki parçalanmada artışlar olmuştur. Numune N4’ün yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinde ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımımdaki yük düşmesi bu hasarlara bağılı olarak açıklanabilir, Şekil 4.13’teki ‘A’ ve ‘B’ye bakınız.



Şekil 4.43 : Numune N3’te -5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde CFRP’nin duvardan ayrılması.

± 7.0 mm yerdeğiştirme adımımda, ($\delta H = \%0.5$), önceki adımlarda oluşan çatlakların genişlikleri ve boyları artmış, dolgu duvar-kolon arayüzündeki bölgede hasar oluşmuş ve dolgu duvar üzerindeki diyagonal CFRP şeritlerin liflerinin iyice

inceldiği gözle izlenebilmiştir. ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımında, ($\delta/H = \%0.75$), kolonlarda kayma çatlakları oluşmuştur, Şekil 4.44. Diyagonal CFRP'nin bazı lifleri kopmuştur. Epoksi ile yapıştırılmış olduğu duvar köşelerinde CFRP, duvar üzerinden tamamen ayrılmış ve yük transferi sadece çerçeve elemanları üzerinde yapıştırılmış olduğu bölgeden sağlanmıştır.



Şekil 4.44 : Numune N4'ün ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

Kolonlardaki çatlakların genişlikleri ± 14 mm yerdeğiştirme adımında artmıştır, Şekil 4.45. Bu yerdeğiştirme adımında görelî kat ötelemesi oranı %1'dir.

Görelî kat ötelemesi oranının %2 olduğu ± 28 mm yerdeğiştirme adımında sadece birer itme ve çekme çevrimleri yapılabilmektedir. Bu çevrimlerde yükteki azalma Şekil 4.13'teki 'D' ve 'E'de görülebilir. Göçme, çekme çevriminde hedef yerdeğiştirme değerine ulaşmadan meydana gelmiştir. Kolondaki kayma çatlağının genişliği bu çevrimde oldukça yükselmiştir ve -20 mm yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında kolondaki normal kuvvet düşmeye başlamıştır, Şekil 4.46. Numune N4'ün yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumunu gösteren diğer şekiller Ek A'da verilmiştir.



Şekil 4.45 : Numune N4'ün +14 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.



Şekil 4.46 : Numune N4'ün göçme şekli.

4.3.6 Deneysel gözlemler

Numunelerin dolgu duvarlarının CFRP ile güçlendirilmesinin yatay yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve başlangıç rijitliğine önemli etkileri olmuştur. Bu etkilerin daha iyi değerlendirilebilmesi açısından numunelerin nasıl davrandığı iyi anlaşılmalıdır. Deneysel gözlemlere göre yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

- Dolgu duvarlı referans numune N1'de, küçük yerdeğiştirme adımlarında dolgu duvarlı çerçevenin yük taşımasına katkıda bulunmasına rağmen, duvarın üst kısımlarında hasar meydana gelmesinden sonra çerçeve-duvar arasında yük aktarmada azalma olmuştur. Güçlendirilmiş numunelerin hepsinde dolgu duvar-çerçeve arasında yük aktarımının ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar devam ettiği gözlenmiştir. Bu davranışın en büyük kanıtı,

kiriş ve kolonlarda oluşan eğik çatlakların dolgu duvar üzerinde de devam ederek diğer köşedeki kolon elemanının üzerine kadar ulaşmasıdır. Bu tip çatlaklar özellikle Numune N3'te gözlenmiştir.

- İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılmış olan dolgu duvarı CFRP ile güçlendirilmiş pilot numune deneyinde, dolgu duvar üzerindeki CFRP ile çerçeve elemanları arasındaki yük aktarımının, CFRP'nin duvar üzerinden ayrılması ile sona erdiği gözlenmiştir, (Karadoğan ve Yüksel, 2001). Bu sorunu çözebilmek amacı ile güçlendirilmiş numunelerde dolgu duvarın iki yüzüne yapıştırılan CFRP şeritler, duvarın içinden geçen CFRP ankraj elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Deneylerde bu CFRP ankraj elemanlarının çok iyi çalıştığı ve göçmeye kadar bu bağlantının sürdüğü görülmüştür. Ayrıca bu ankraj elemanları dolgu duvar üzerindeki, epoksi sürüldükten sonra bir ölçüde gevrekleşerek rijitleşen CFRP şeritlerin burkulma boyunu da kısaltmaktadır. Ancak buna rağmen duvar üzerindeki CFRP şeritlerin basınç etkisinde kolayca kırıldığı, hatta ağır hasar görerek koptuğu görülmüştür.
- Yukarıda bahsedilmiş olan pilot numunede CFRP şeritler sadece dolgu duvar üzerinde yer almaktadır. Bu çalışmadaki güçlendirilmiş numunelerde dolgu duvarın iki diyagonal doğrultusunda yapıştırılan CFRP şeritler betonarme çerçeve elemanlarına iki farklı bağlantı detayı ile bağlanmışlardır. Bu iki grup eleman arasındaki yük aktarımı her iki bağlantı detayı ile de göçmeye kadar başarı ile sağlanmıştır.
- Numune N2 ve N4'te diyagonal CFRP şeritlerden çerçeve elemanlarına yük aktarımı, iki kat CFRP şeritin çerçeve elemanları üzerinde devam ettirilmesi ile yapılmıştır. İleri yük adımlarında bu bağlantılarından bazıları kiriş ve kolonlardan bir miktar ayrılmasına rağmen yük aktarımı göçmeye kadar devam etmiştir, Şekil 4.27 ve 4.46.
- Numune N3'te diyagonal CFRP'den çerçeve elemanlarına yük aktarımı ikişer adet CFRP ankraj elemanı ile yapılmıştır. Bu tip bağlantıda çerçeve elemanının içine bölgesel olarak yük etkimesinden ve ayrıca uygulama nedeniyle o kesitin zayıflatılmış olmasından dolayı, ankraj elemanlarının bulunduğu bölgelerde diğer güçlendirilmiş numunelere göre daha fazla hasar

olmuştur, Şekil 4.35. Diğer numunelerde kiriş-kolon birleşim bölgesinin yakın çevresinde oluşan ve deney sonuna kadar genişlikleri küçük değerlerde kalan çatlakların, N3 numunesinde genişliklerinin ve boylarının yerdeğiştirme arttıkça artması ve göçmede etkili olması yine bu bölgesel etkiye bağlı olarak dikkate alınmalıdır. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için CFRP ankraj elemanlarının derinliklerinin ve sayısının yükü daha yayılı ve dengeli dağıtacak şekilde seçilmesi daha iyi olacaktır.

- Dolgu duvar üzerindeki CFRP, duvarın taşımadığı çekme gerilmelerini almış, ayrıca çerçeve-dolgu duvar arasında göçmeye kadar yük aktararak sistemin bir bütün olarak çalışmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra, duvara epoksi ile yapıştırılan CFRP'nin her ne kadar basınç gerilmeleri taşımadığı düşünülse de, dolgu duvar elemanlarının bir arada tutulmasını ve basınç gerilmelerinin daha geniş bir alan üzerinde yayılmasını sağlayarak basınç gerilmelerinin taşınmasına da katkıda bulunmuştur.
- CFRP'nin epoksi ile duvara yapıştırılmadığı N4 numunesinde çekme gerilmeleri altında CFRP'nin yük taşıması çok net olarak gözlenebilmiştir. Bu durumda CFRP sadece çekme gerilmelerini almış ve dolgu duvarda daha az hasar gözlenmiştir. CFRP'nin duvara epoksi ile yapıştırılmaması yolu ile burkulması önlenmiştir, ama bu şekilde sistemin göçme şekli ve hasar durumunun değiştiği gözönüne alınmalıdır. CFRP şeritlerde başlangıçta herhangi bir eksenel kuvvet olmadığı unutulmamalıdır. Böyle bir eksenel kuvvetin sağlanması halinde davranışın olumlu yönde değişeceği beklenmelidir. Numune N4, dolgu duvar elemanlarının ve CFRP'nin ayrı ayrı yatay yük taşımaya olan katkılarının anlaşılabilmesi açısından çok yararlı bir numunedir ve sistemin yapısal modellenmesi esnasında değerli bir kaynaktır.

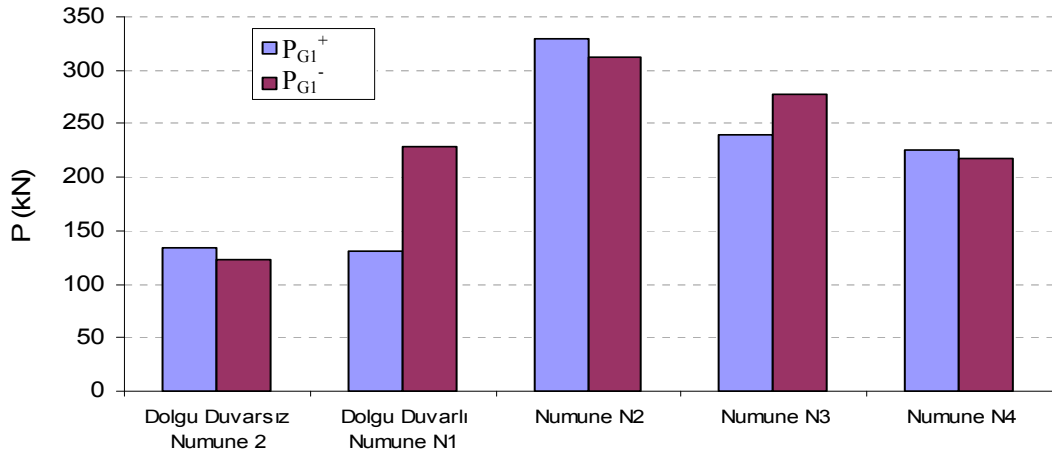
4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı çerçevelerin CFRP ile güçlendirilmesinin sistem davranışına etkisini araştırmak için yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri ve deney sırasında alınan ölçümler ile numunelerin taşıdıkları en büyük yatay yük değerleri, önerilen göçme yükleri, rijitlik değerleri, eşdeğer süneklik değerleri, kuvvet azaltma çarpanları, enerji yutma kapasiteleri ve eşdeğer sönüm oranları hesaplanmış ve

karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu hesaplanan büyüklüklerin bir kısmı Çizelge 4.2’de özetlenmiştir. ‘Dolgu Duvarsız Numune 1’ deneyinde, daha sonra güçlendirilmek ve yeniden denenmek amacı ile göçmeye kadar gidilmeden deneye son verilmiş olduğundan bu numunenin değerleri Çizelge 4.2’de yer almamaktadır. Bunlara ek olarak, deneysel gözlemlerden de yararlanılarak numunelerin davranışları incelenmiş ve güçlendirilmiş numuneler için bir hasar durumu çizelgesi hazırlanmıştır.

4.4.1 En büyük yatay yük değerleri, önerilen göçme yükü ve göçme yükü

Tüm numunelerin taşıdıkları en büyük yatay yük değerleri (P_{GI}) Çizelge 4.2’de verilmiş ve Şekil 4.47’de bir diyagram üzerinde gösterilmiştir. Bu diyagramda, P_{GI}^+ ve P_{GI}^- ile, sırasıyla, itme ve çekme adımlarındaki en büyük yatay yük değerleri ifade edilmektedir. Kalıcı şekildeğişirmelerin simetrik olamayışı nedeni ile beklenildiği gibi P_{GI}^+ ve P_{GI}^- farklı değerler almıştır.



Şekil 4.47 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin en büyük yatay yük değerleri.

Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri ve Şekil 4.47’nin incelenmesi ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm numuneler taşıdıkları en büyük yatay yük değerlerine göre karşılaştırıldığında, CFRP ile bu çalışmada yapıldığı gibi güçlendirmenin sisteminin en büyük yatay yük değerini arttırdığı söylenebilir. Bu artış oran olarak ifade edilmek istenirse, dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numuneler N2, N3 ve N4’ün en büyük yatay yük değerleri, dolgu duvarsız numune 2’nin en büyük yatay yük değerinin yaklaşık olarak, sırasıyla, 1.4,

Çizelge 4.2 : Tek katlı-tek açıklıklı çerçeve deneylerinin sonuçları.

Numune Adı Parametre	Dolgu Duvarsız Numune 2	Dolgu Duvarlı Numune N1	Numune N2	Numune N3	Numune N4
P_{G1}^+ (kN)	133.43	130.93	330.10	239.69	225.25
P_{G1}^- (kN)	122.55	228.75	311.91	278.11	217.31
Δ_{G1}^+ (mm)	27.99	5.69	4.90	7.05	5.31
(δ/H)	%2	%0.4	%0.35	%0.5	%0.4
Δ_{G1}^- (mm)	27.99	4.83	7.07	10.67	15.64
(δ/H)	%2	%0.35	%0.5	%0.75	%1
P_{G2}^+ (kN)	119.88	109.87	303.29	205.76	207.01
P_{G2}^- (kN)	111.62	174.53	306.63	235.59	190.24
Δ_{G2}^+ (mm)	41.99	11.06	10.43	10.67	14.34
(δ/H)	%3	%0.78	%0.75	%0.75	%1
Δ_{G2}^- (mm)	41.99	10.57	10.52	14.23	16.22
(δ/H)	%3	%0.75	%0.75	%1	%1.1
P_{G3}^+ (kN)	119.88	109.87	93.71	51.56	172.98
P_{G3}^- (kN)	111.62	131.88	154.20	123.15	90.84
Δ_{G3}^+ (mm)	41.99	11.07	13.96	27.79	28.29
(δ/H)	%3	%0.78	%1	%2	%2
Δ_{G3}^- (mm)	41.99	11.06	14	28.93	21.26
(δ/H)	%3	%0.78	%1	%2	%2
$\alpha^+ = (P_{G2}^+ / P_{G1}^+)$	0.89	0.84	0.92	0.86	0.92
$\alpha^- = (P_{G2}^- / P_{G1}^-)$	0.91	0.76	0.98	0.85	0.88
P_{G3}^+ / P_{G1}^+	0.89	0.84	0.28	0.22	0.77
P_{G3}^- / P_{G1}^-	0.91	0.58	0.49	0.44	0.42
$\Delta_{eşdy}^+$ (mm)	5.14	1.21	1.31	1.02	1.19
(δ/H)	%0.4	%0.10	%0.10	%0.10	%0.10
$\Delta_{eşdy}^-$ (mm)	4.91	1.94	1.32	1.11	1.32
(δ/H)	%0.35	%0.10	%0.10	%0.10	%0.10

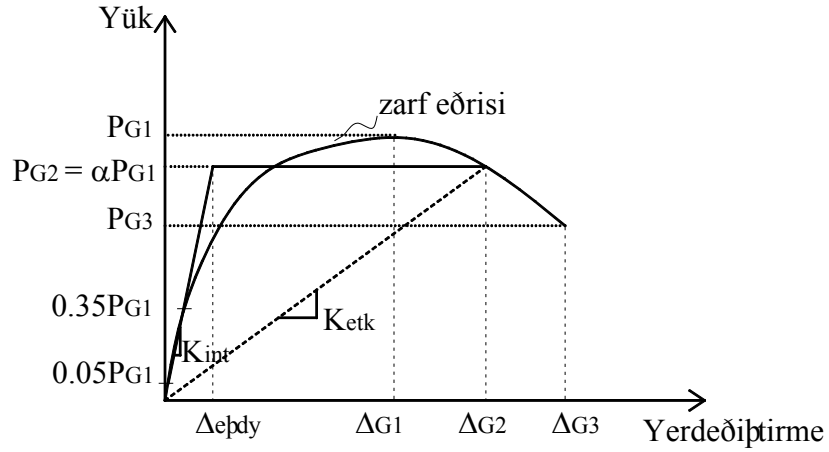
Çizelge 4.2 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı çerçeve deneylerinin sonuçları.

Numune Adı Parametre	Dolgu Duvarsız Numune 2	Dolgu Duvarlı Numune N1	Numune N2	Numune N3	Numune N4
K_{int}^+ (kN/mm)	23.59	87.39	228.25	181.53	154.34
K_{int}^- (kN/mm)	22.78	84.22	227.96	209.48	122.59
K_{etk}^+ (kN/mm)	2.86	9.94	29.08	19.28	14.44
K_{etk}^- (kN/mm)	2.66	16.48	29.15	16.56	11.73
K_{etk}^+ / K_{int}^+	0.12	0.11	0.13	0.11	0.09
K_{etk}^- / K_{int}^-	0.12	0.19	0.13	0.08	0.10
$K_{int}^+ / (K_{int}^+)_{dd2}$	1	3.70	9.68	7.70	6.54
$K_{int}^- / (K_{int}^-)_{dd2}$	1	3.70	10.01	9.20	5.38
$K_{int}^+ / (K_{int}^+)_{N1}$	-	1	2.61	2.08	1.77
$K_{int}^- / (K_{int}^-)_{N1}$	-	1	2.71	2.49	1.46
$\mu_{eşd}^+$ ($\Delta_{G2}^+ / \Delta_{eşdy}^+$)	8.17	9.18	7.95	10.51	12.01
$\mu_{eşd}^-$ ($\Delta_{G2}^- / \Delta_{eşdy}^-$)	8.54	5.46	7.96	12.78	12.30
μ_{G1}^+ ($\Delta_{G1}^+ / \Delta_{eşdy}^+$)	5.45	4.71	3.74	6.95	4.45
μ_{G1}^- ($\Delta_{G1}^- / \Delta_{eşdy}^-$)	5.70	2.49	5.36	9.59	11.87
μ_2^+ ($\Delta_{G2}^+ / \Delta_{y2}^+$)	3.99	3.79	3.68	7.56	5.14
μ_2^- ($\Delta_{G2}^- / \Delta_{y2}^-$)	6.01	3.64	3.75	10.18	5.76
R^+	3.92	4.17	3.86	4.47	4.80
R^-	4.01	3.15	3.86	4.96	4.86
Δ_{y2}^+ (mm)	10.50	2.92	2.83	1.41	2.79
(δ/H)	%0.75	%0.20	%0.20	%0.10	%0.20
Δ_{y2}^- (mm)	6.99	2.90	2.80	1.39	2.82
(δ/H)	%0.50	%0.20	%0.20	%0.10	%0.20

$P_{G1}^+, P_{G1}^-, P_{G2}^+, P_{G2}^-, P_{G3}^+, P_{G3}^-$: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında taşınan en büyük yatay yükler, önerilen göçme yükleri ve göçme yükleri, $\Delta_{G1}^+, \Delta_{G1}^-, \Delta_{G2}^+, \Delta_{G2}^-, \Delta_{G3}^+, \Delta_{G3}^-$: Sırasıyla, $P_{G1}^+, P_{G1}^-, P_{G2}^+, P_{G2}^-, P_{G3}^+, P_{G3}^-$ ve P_{G3}^- 'e karşı gelen yerdeğiştirme değerleri, δ/H : Göreli kat öteleme oranı, $K_{int}^+, K_{int}^-, K_{etk}^+, K_{etk}^-$: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarındaki başlangıç rijitliği ve etkin rijitlik değerleri, $(K_{int}^+)_{dd2}, (K_{int}^-)_{dd2}, (K_{int}^+)_{N1}, (K_{int}^-)_{N1}$: Sırasıyla, dolgu duvarsız numune 2 ve dolgu duvarlı numune N1'in itme ve çekme adımlarındaki başlangıç rijitliği değerleri, $\mu_{eşd}^+, \mu_{eşd}^-, \mu_{G1}^+, \mu_{G1}^-, \mu_2^+, \mu_2^-$: Sırasıyla, itme ve çekme adımlarının eşdeğer yerdeğiştirme sünekliği, en büyük yatay yüke karşı gelen yerdeğiştirme sünekliği ve 2 noktasına göre yerdeğiştirme sünekliği değerleri, R : Kuvvet azaltma çarpanı.

2.5, 2.0 ve 1.73 katıdır. Oranlar hesaplanırken itme ve çekme adımlarındaki değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Güçlendirilmiş N2, N3 ve N4 numunelerinin en büyük yatay yük değerleri, dolgu duvarlı numune N1'in en büyük yatay yük değerinin yaklaşık olarak, sırasıyla, 1.79, 1.44 ve 1.23 katıdır. Bu karşılaştırmalar değerlendirilirken, numunelerin beton, harç ve sıva dayanımlarındaki farklılıklar (Çizelge 3.2 ve 3.4) gözönüne alınmalı ve verilen oranların kesin değerler değil, sadece fikir verme amaçlı olduğuna dikkat edilmelidir.

- Güçlendirilmiş numuneler kendi aralarında kıyaslanırsa, N2 numunesinin taşıdığı en büyük yatay yük değeri, N3 ve N4 numunelerinin en yatay yük değerlerinin yaklaşık olarak, sırasıyla, 1.24 ve 1.45 katıdır. Yukarıda yapılmış olan uyarı bu karşılaştırma için de geçerlidir.
- Numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrileri, detayları Bölüm 4.4.3'te açıklandığı şekilde, iki doğrulu olarak idealleştirilmiştir, Şekil 4.48. Bu idealleştirme yapılırken belirlenen “Öngörülen göçme yükü” (P_{G2}) enerji eşitliğinin yaklaşık olarak sağlanmış olduğu, deneysel gözlemler ile izlenmiş ve şekildeğiştirme ile yerdeğiştirmelerin sınırlı büyüklüklere ulaştığı özel bir yük değeridir. P_{G2} ve buna karşı gelen yerdeğiştirme değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca numunelerin itme ve çekme adımları için P_{G2}/P_{G1} oranlarını ifade eden α değerleri çizelgede yer almaktadır. α değerlerinin tüm numuneler için yaklaşık olarak, 0.90-0.85 arasında değiştiği görülmektedir.
- Herbir numunenin itme ve çekme adımlarındaki göçme yatay yüklerinin (P_{G3}) en büyük yatay yük değerlerine oranları (P_{G3}/P_{G1}) hesaplanmıştır, Çizelge 4.2. Verilen oran numunenin dayanım azalmasını ifade etmektedir. Güçlendirilmiş numunelerde dayanım azalması oranlarının, referans numunelere göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin, numune yatay yük kapasitesine ulaştıktan sonraki adımlarda koparak yatay yük taşımaya katkılarının sona ermesi ve yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin dolgu duvarsız referans numunenin eğrisine yaklaşmasıdır.



Şekil 4.48 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisinin iki doğru olarak idealleştirilmesi.

- Numunelerin en büyük yatay yüke, önerilen göçme yüküne ve göçme yüküne ulaştığı adımlardaki yerdeğiştirme ve görel kat ötelemesi oranı değerleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Dolgu duvarsız numune 2’de en büyük yatay yüke ulaşıldığı görel kat ötelemesi oranı (δ/H) %2 iken, dolgu duvarlı güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerde bu değerlerin daha küçük olduğu görölmektedir. Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş Numune N2’de en büyük yatay yükün ulaşıldığı görel kat ötelemesi oranı %0.4 civarında ve Numune N3’te %0.5 civarındadır. Numune N4’te ise bu büyüklük itme ve çekme adımlarında farklı değerler olarak itme ve çekme adımları için, sırasıyla, %0.4 ve 1 olmuştur.
- Önerilen göçme yükündeki görel kat ötelemesi oranları dolgu duvarsız numune 2’nin %3, diğer numunelerde ise %0.75-1 arasındadır. Güçlendirilmemiş referans numunelerde bu değerler göçme görel kat ötelemesi oranları ile aynı iken, güçlendirilmiş numunelerde göçme görel kat ötelemesi oranları daha büyük değerler almaktadır.
- Göçme görel kat ötelemesi oranları dolgu duvarsız numune 2’de %3, güçlendirilmiş numuneler N3 ve N4’te ise %2’dir. Numune N1’de deney düzeneğinin getirdiği kısıtlamalardan dolayı, Numune N2’de ise dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritin kopmasıyla deney düzeneği stabilitesi bozulması nedenleri ile deneylere son verildiğinden bu numunelerin göçme görel kat ötelemesi oranları burada değerlendirilmemiştir.

- Sağlam zeminlerde rijitlik artması dolayısıyla periyotta azalma ve yapıya gelen deprem yükünde artma beklenmekle birlikte, duvarlardan dolayı rijitleşen yapının azalan görelî kat ötelemeleri eksenel kuvvetlerin ikinci mertebe etkilerini de azaltacaktır. Yumuşak zeminlerde ise bu durumun tersinin gerçekleşmesi beklenmektedir.
- “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de mevcut ve güçlendirilecek yapıların doğrusal elastik yöntemle yapılan hesabında, her bir deprem doğrultusunda binanın herhangi bir katındaki kolon veya perdelerin görelî kat ötelemesi oranlarının karşılaştırılması ve elemanların hangi hasar bölgesinde olduğunun karar verilmesi için verilen görelî kat ötelemesi oranı sınırları minimum hasar bölgesi için (MN) %1, belirgin hasar bölgesi için (GV) %3 ve ileri hasar bölgesi için (GÇ) %4’tür. Güçlendirilmiş numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinde kritik noktaların karşılığı olan görelî kat ötelemesi oranları ile “DBYBHY” (2007)’de verilen bu oranlar karşılaştırıldığında, önerilen göçme yükü düzeyine daha erken görelî kat ötelemesi oranlarında ulaşıldığı görülmektedir. Dolayısıyla eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkileri açısından daha kararlı bir durum ortaya çıkmaktadır. Buna ilave olarak P_{G2} ’nin $0.85P_{G1}$ ’den daha aşağıya düşmemiş olması da yönetmelikte eleman bazında yapılan güçlendirilmiş dolgu duvar hasar sınırı görelî kat ötelemesi oranlarının, (MN için %0.15 ve GV için %0.35), biraz daha büyütebileceğini işaret etmektedir. Bu durum FEMA’nın çalışmalarında yığma duvarlar için öngörülen sınırlarla da, (MN için %0.3, GV için %0.6 ve GÇ için %1.0), uyum içerisinde dir.

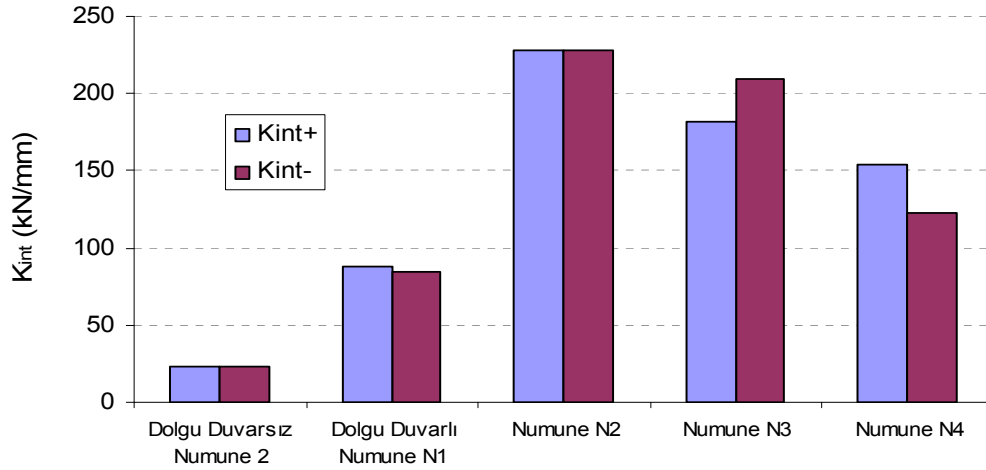
4.4.2 Başlangıç rijitliği, etkin rijitlik ve tepe noktalarına karşı gelen rijitlik

Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin başlangıç rijitlikleri itme ve çekme bölgeleri için ayrı olarak hesaplanmıştır. Her iki bölgede de, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrilerinde en büyük yükün %35 ve %5’lik değeri arasında kalan bölümünün rijitliği başlangıç rijitliği olarak kabul edilmiştir, Şekil 4.48.

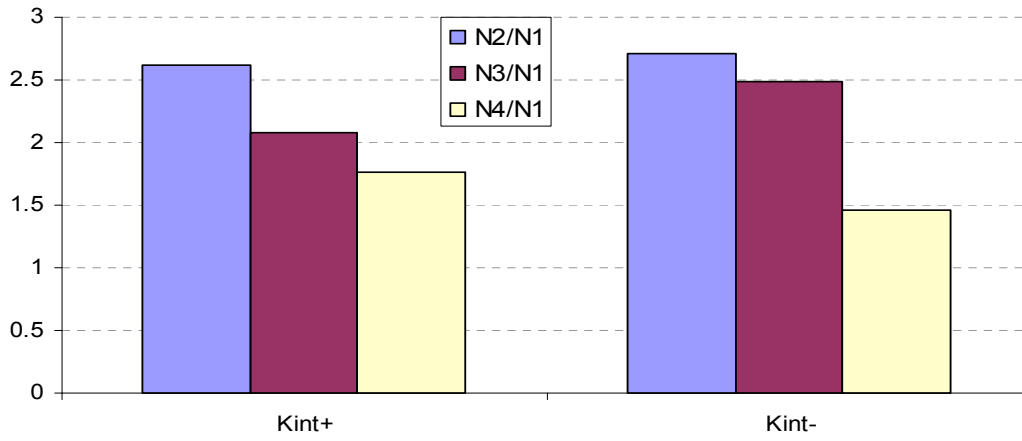
$$K_{int} = \frac{0.35P_{G1} - 0.05P_{G1}}{\Delta_{0.35} - \Delta_{0.05}} \quad (4.1)$$

Burada K_{int} başlangıç rijitliğini, P_{G1} en büyük yatay yük değerini, $\Delta_{0.35} = 0.35P_{G1}$ 'e karşı gelen yerdeğiştirme değerini, $\Delta_{0.05}$ ise $0.05P_{G1}$ 'e karşı gelen yerdeğiştirme değerini ifade etmektedir. Tüm numunelerin hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri Çizelge 4.2'te verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalara göre ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Dolgu duvarsız referans numunenin başlangıç rijitliğinin, dolgu duvarlı numunelere göre oldukça düşük olduğu açıkça görülmektedir, Şekil 4.49. Bu, yapıların yatay yük etkisinde dolgu duvarsız çerçeve olarak modellenmesinin gerçek davranışı yansıtmaktan uzak kalacağının göstergesidir. Bu durum dik doğrultuda gelen deprem bileşeni nedeni ile duvarın düzlemdışına devrilmesi veya kırılıp dağılmasına kadar geçerlidir. Dolgu duvarın düzlemdışına devrilmesinde duvarın iki yüzünde yer alan ve birbirine bağlı olan CFRP şeritlerin de olumlu etkileri olduğu bilinmektedir.
- Dolgu duvarlı numune N1 ile güçlendirilmiş numuneler karşılaştırıldığında, dolgu duvarların CFRP ile bu çalışmada yapıldığı gibi güçlendirilmesi halinde sistem başlangıç rijitliğinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.50'de güçlendirilmiş numunelerin başlangıç rijitliklerinin, dolgu duvarlı numune N1'in başlangıç rijitliğine oranı verilmiştir. CFRP kullanılarak dolgu duvarlı betonarme çerçeveli yapıların güçlendirme projesi hazırlanırken, bu rijitlik artışının yapı davranışına olan etkilerinin dikkatli incelenmesi gerekmektedir. Çünkü sistemin güçlendirilerek rijitliğinin artırılması, üzerinde bulunduğu zemin özelliklerine bağlı olarak, güçlendirilmemiş sistem haline göre daha az ya da daha çok yatay yük etkimesine neden olacaktır. Bu durumda temel boyutlarını kontrol ederek temelde bir ölçüde dönmeye izin vermek yerinde bir hareket olacaktır. Rijitlik artışının neden olacağı periyottaki azalma bu şekilde dengelenebilir.
- CFRP ile güçlendirilmiş numuneler kendi aralarında değerlendirilirse, her üç numune de çok yakın başlangıç rijitliği değerlerine sahip olmasına karşın bu rijitlikler farklı yerdeğiştirme adımlarında son bulmaktadır.



Şekil 4.49 : Tüm numunelerin başlangıç rijitliği değerleri.



Şekil 4.50 : Güçlendirilmiş numunelerinin başlangıç rijitliklerinin, dolgu duvarlı numune N1'in başlangıç rijitliğine oranları.

Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin rijitliklerinin yerdeğiştirme artımı ile değişimini inceleyebilmek için her bir numunenin çevrim eğrisinin tepe noktalarına karşı gelen rijitlik (K_m) değerleri hesap edilmiştir. K_m , numunenin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisinde her bir yerdeğiştirme adımında, o yerdeğiştirmeye ait itmeye ve çekmeye karşı gelen noktaları birleştiren doğrunun eğimi olarak tanımlanmıştır. Bütün numunelerin K_m değerleri bir diyagram üzerinde verilmiştir, Şekil 4.51. Diyagram incelendiğinde, deneyde yerdeğiştirme artımı sırasında dolgu duvarsız numunenin rijitlik değerlerindeki azalmanın dolgu duvarlı numunelerinki kadar büyük olmadığı görülmektedir. Bu değerlendirme artan yerdeğiştirmeler etkisindeki betonarme çerçeveler içerisinde dolgu duvar bulunması halinde, dolgu duvarın rijitlik değişimine etkisini göstermektedir. Güçlendirilmiş numunelerin rijitliklerindeki değişim, dolgu duvarlı numune N1'e benzer bir

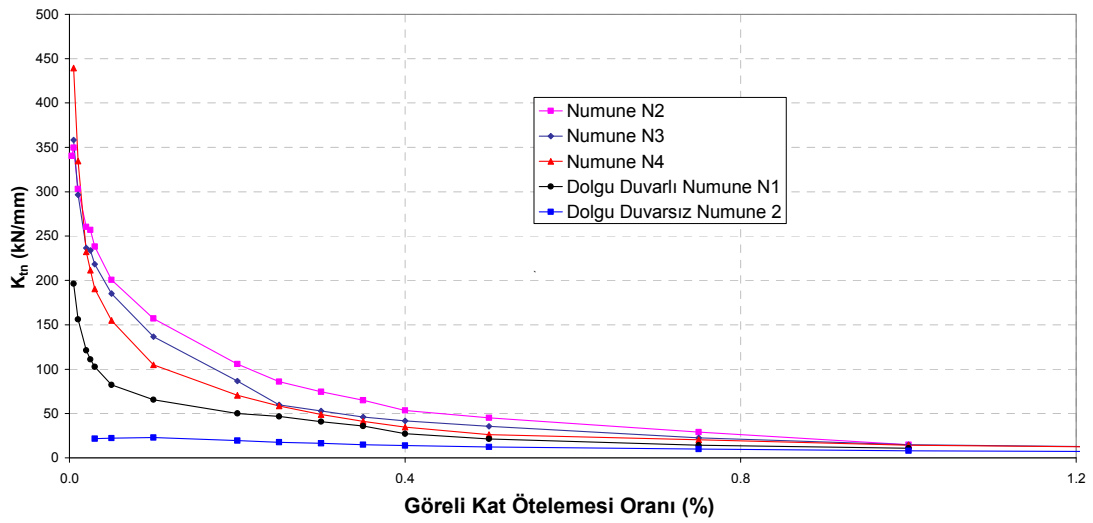
eğilimdedir. Buna göre bu tip güçlendirmenin sistemin rijitlik azalması eğiliminde önemli bir değişiklik yapmadığı söylenebilir.

Son olarak numunelerin etkin rijitlikleri (K_{etk}) hesaplanmıştır. K_{etk} , numunenin öngörülen göçme yükünün (P_{G2}) bu yüke karşı gelen yerdeğiştirmeye (Δ_{G2}) bölünmesiyle elde edilmiştir, Şekil 4.48.

$$K_{etk} = \frac{P_{G2}}{\Delta_{G2}} \quad (4.2)$$

Bütün numunelerin K_{etk} değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunelerin etkin rijitliklerinin başlangıç rijitliklerine oranlarının (K_{etk}/K_{int}) yaklaşık olarak %10 civarında çıktığı görülmektedir.

Ayrıca, karşılaştırma yapılabilmesi için Çizelge 4.2’de numunelerin başlangıç rijitliklerinin dolgu duvarsız referans çerçevenin başlangıç rijitliğine ($K_{int}/(K_{int})_{dd2}$) ve dolgu duvarlı referans numune N1’in başlangıç rijitliğine oranları ($K_{int}/(K_{int})_{N1}$) verilmiştir.



Şekil 4.51 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin ‘Tepe noktalarına karşı gelen rijitlik’ değerleri.

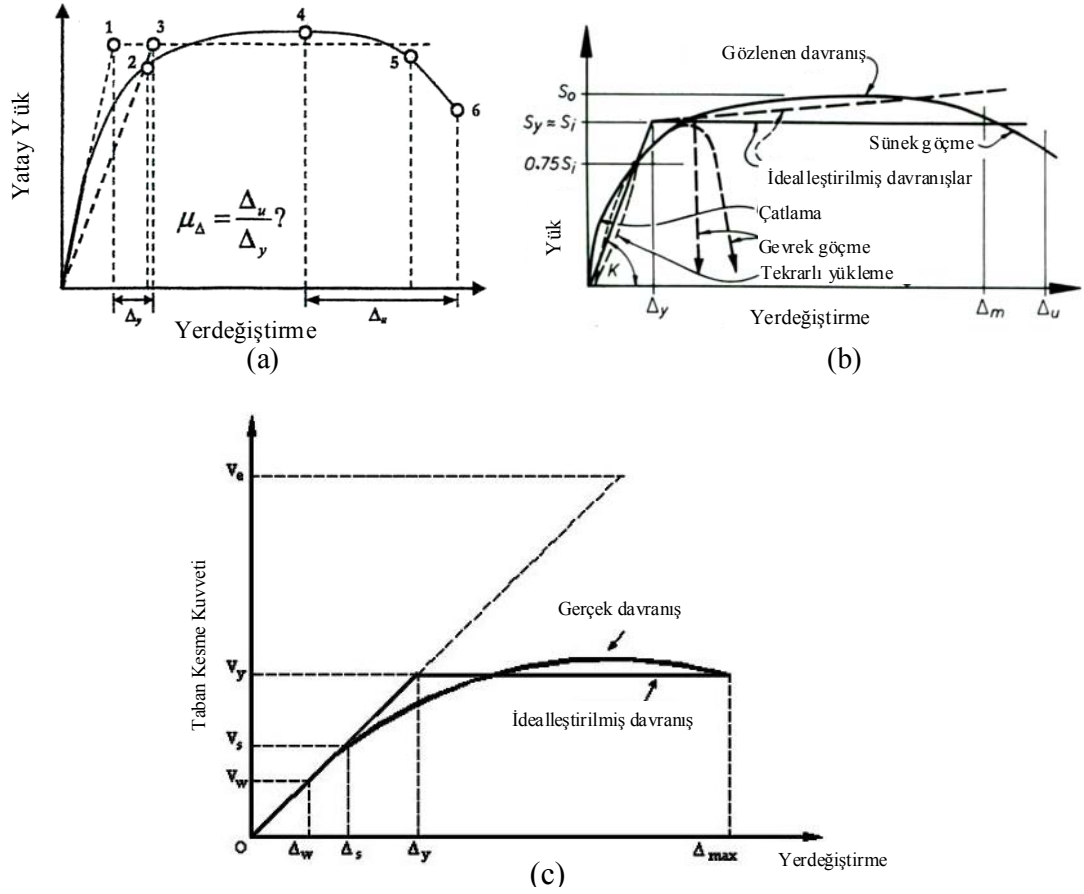
4.4.3 Önerilen eşdeğer yerdeğiştirme sünekliği

Süneklik (μ), bir kesitin, bir elemanın veya bir taşıyıcı sistemin, dış yükte önemli bir değişme olmaksızın, elastik ötesinde şekildeğiştirme, dolayısıyla yerdeğiştirme yapma yeteneği olarak tanımlanabilir, (Celep, 2007). Sayısal tanımı, göçme sınırı ile elastik sınır şekildeğiştirmesi veya yerdeğiştirmesinin oranı olarak yapılmaktadır;

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4.3)$$

Burada μ sünekliği, Δ_u göçme sınırındaki yerdeğiştirme değerini ve Δ_y önemli elemanlarda ilk kalıcı şekildeğiştirmelerin sınırındaki yerdeğiştirme değerini ifade etmektedir, Şekil 4.52a. Çeşitli açılardan tartışmalı olan bu tanımı, deney numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrilerini yorumlamak için çok serbestlik dereceli sistemlerdeki teorik çalışmalar yerine, basite indirgeyerek hareket etmekte yarar vardır. Süneklik değerlerinin hesabı için öncelikle numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrilerin iki doğrulu olarak idealize edilmesi ve Δ_y , Δ_u yerdeğiştirme değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır.

İki doğrulu olarak idealleştirilmiş yük-yerdeğiştirme diyagramın tanımlanması için belirlenmesi gereken ilk nokta olan “akma yerdeğiştirmesi” (Δ_y) değeri farklı çalışmalarda, (a) eğrinin başlangıç rijitliği eğiminde bir doğru ile yine yapılan varsayımlara göre belirlenmiş “akma yükünden” (V_y) geçen bir yatay doğrunun kesiştirilmesi ile (Şekil 4.52a’da 1 noktası), (b) akmanın olduğu ilk yerdeğiştirme değeri olarak (Şekil 4.52a’da 2 noktası), (c) başlangıç noktasından ve akmanın olduğu ilk yerdeğiştirme değerinden geçen doğrunun V_y ’den geçen yatay doğru ile kesiştirilmesi ile (Şekil 4.52a’da 3 noktası) ve buna benzer başka varsayımlarla belirlenmektedir, (Priestley ve diğ., 2007). En büyük yerdeğiştirme (Δ_u) değeri de aynı şekilde (a) en büyük yatay yüke karşı gelen yerdeğiştirme (Şekil 4.52a’da 4 noktası), (b) en büyük yükün veya V_y ’nin değerinin %70-50’sine iniş kolunda karşı gelen yükün yerdeğiştirme değerleri (Şekil 4.52a’da 5 noktası) ve buna benzer başka varsayımlarla seçilmektedir. Akma yükünün (V_y) seçimi için de çeşitli yaklaşımlar vardır. Bu yaklaşımlar uygulanırken, yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan ile iki doğrulu olarak idealleştirilmiş eğrinin altında kalan alanın yaklaşık olarak aynı olmasına dikkat edilmelidir. Alanların bu şekilde kullanılması, yerdeğiştirme çevrimleri sırasında tüketilen enerjilerin esas sistemde eşitliğini ifade eden enerji eşitliği anlamına gelmektedir. Bahsedildiği gibi yapılan farklı yaklaşımlarla iki doğrulu olarak idealleştirilen eğrilerden belirlenen Δ_y ve Δ_u değerleri ile hesaplanan süneklik değerleri birbirinden farklı olacaktır.



Şekil 4.52 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisinin iki doğru olarak idealleştirilmesi için farklı yaklaşımlar; (a) Priestley ve diğ. (2007), (b) Paulay ve Priestley (1992), (c) Maheri ve Akbari (2003).

Bu çalışmada numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrilerinin iki doğru olarak idealleştirmesinde eğriyi tanımlayan noktalar, numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinin özellikleri gözönüne alınarak belirlenmiştir. Δ_y belirlenirken Priestley ve diğ. (2007)'de açıklandığı gibi başlangıç rijitliğinin esas alınmış olduğu 1 noktasına karşı gelen tanım benimsenmiş ve bu yerdeğiştirme değerine “Eşdeğer akma yerdeğiştirmesi” ($\Delta_{eşdy}$) denilmiştir. Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrilerinde en büyük yükün %35 ve %5’lik değerleri arasında kalan bölümünün rijitliği başlangıç rijitliği olarak kabul edilmiştir. İki doğru idealleştirilmiş eğride yatay yük “Önerilen göçme yükü” (P_{G2}) olarak isimlendirilmiştir, Şekil 4.48. Önerilen göçme yükü, enerji eşitliği esas alınarak her bir numune için yatay yük- tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrisi ve idealleştirilmiş eğrinin altında kalan alanların yaklaşık olarak eşitliğinden hesaplanmış ve en büyük yükün (P_{G1}) α katı olarak ifade edilmiştir, ($P_{G2}=\alpha P_{G1}$). α katsayılarının bütün numuneler için 0.90-0.85 civarında değiştiği görölmektedir, Çizelge 4.2.

P_{G2} değerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirme zarf eğrisinin iniş kolunda bulunduğu noktaya karşı gelen yerdeğiştirme değeri sonuç yerdeğiştirme (Δ_{G2}) olarak kabul edilmiştir. Bu yerdeğiştirme değeriinde numunelerin hala kararlılığını korumakta olduğu gözlemlenmiştir. P_{G2} değerinden çizilen yatay doğru ile başlangıçtan geçen ve eğimi zarf eğrisinin başlangıç rijitliği kadar olan doğrunun keşiştiği noktanın yerdeğiştirme koordinatı Δ_{esdy} olarak belirlenmiştir. Numunenin bu şekilde tanımlanan yerdeğiştirmelere göre “eşdeğer yerdeğiştirme sünekliği” değeri (μ_{esd});

$$\mu_{esd} = \frac{\Delta_{G2}}{\Delta_{esdy}} \quad (4.4)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Bu işlem numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrilerinin itme ve çekme bölgeleri için ayrı ayrı yapılmıştır, Çizelge 4.2.

Bir fikir edinebilmek ve karşılaştırma yapabilmek amacı ile numunelerin yukarıda açıklandığı gibi farklı esaslara dayalı olarak ortaya çıkan süneklik oranları da hesaplanmış ve Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Sonuç yerdeğiştirmenin, en büyük yatay yüke karşı gelen yerdeğiştirme değeri (Δ_{G1}) olarak belirlenmesiyle hesaplanan süneklik (μ_{G1});

$$\mu_{G1} = \frac{\Delta_{G1}}{\Delta_{esdy}} \quad (4.5)$$

ve akma yerdeğiştirmesi olarak şekil 4.52a’da tanımlanan 2 noktasının seçildiği (Δ_{y2}) süneklik (μ_2);

$$\mu_2 = \frac{\Delta_{G2}}{\Delta_{y2}} \quad (4.6)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Δ_{y2} yerdeğiştirme değeriinin yük-yerdeğiştirme eğrilerinden ve deneysel gözlemlerden saptanmasında çeşitli zorluklar vardır.

4.4.4 Kuvvet azaltma çarpanı

Numunelerin iki doğrulu olarak idealleştirilmiş yatay yük-tepe yerdeğiştirme zarf eğrileri kullanılarak kuvvet azaltma çarpanları (R) hesaplanmıştır. Yaklaşık olarak elastik ivme spektrumunun en büyük olduğu ivme değeriine karşı gelen periyottan

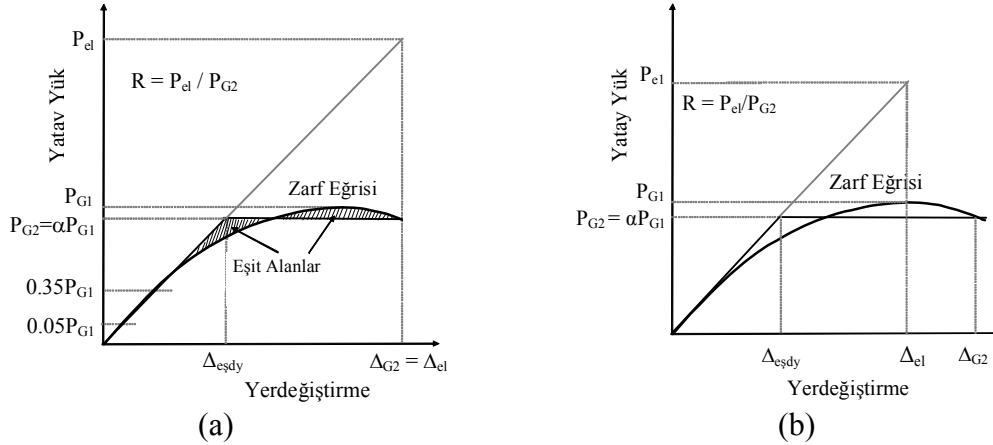
daha büyük serbest titreşim periyoduna sahip sistemlerde doğrusal, doğrusal olmayan ve zaman artımı yöntemi ile hesaplanmış yerdeğiştirmelerin eşit olması, bundan küçük periyotlarda enerji eşitliği, periyotların sifıra yakın bölgelerde olması halinde de ivmelerin eşitliği söz konusudur, (Paulay ve Priestley, 1992). Ancak bu alanlar kesin olarak belirtilememektedir ve pek çok parametreye bağlı olduğu için kabaca uzun periyotlarda yerdeğiştirme eşitliği, çok kısa periyotlarda ivme eşitliği, arada kalan durumlarda ise enerji eşitliğinden söz edilebilir. Buna göre kuvvet azaltma çarpanı (R);

$$\text{Uzun periyotlu yapılar için : } R = \mu \quad (4.7a)$$

$$\text{Kısa periyotlu yapılar için : } R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (4.7b)$$

$$\text{Periyodu sifıra yakın olan yapılar için : } R = 1 \quad (4.7c)$$

olmaktadır. Başlangıç rijitlikleri eşit doğrusal ve doğrusal olmayan iki sistemin yük-yerdeğiştirme eğrilerinin eşit yerdeğiştirme ve eşit enerji durumları ve kuvvet azaltma çarpanı (R) Şekil 4.53'te gösterilmiştir.



Şekil 4.53: Başlangıç rijitlikleri eşit doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinde (a) eşit yerdeğiştirme durumu, (b) eşit enerji durumu ve kuvvet azaltma çarpanı (R).

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların varlığı sebebiyle rijitleşerek periyodu küçülmekte olan bir yapıda doğrusal ve doğrusal olmayan yerdeğiştirmelerin eşitliği yerine enerjilerin eşitliği esasına dayanmak daha gerçekçi olacaktır. Çizelge 4.2'de süneklik (μ) değerlerinin yanısıra enerji eşitliği prensibine dayanarak ve (4.7b) denklemi kullanılarak hesaplanmış olan R değerleri verilmiştir. R değerlerinin dolgu

duvarsız numune 2 ve dolgu duvarlı numune N1 referans numunelerinde 4 civarında, güçlendirilmiş numunelerde ise 4-5 arasında değiştiği görülmektedir.

Deneylere bağlı kalmak üzere enerji eşitliğine dayanan daha konservatif sonuçlar dahi, donatılmış duvar yapısı kazanan dolgu duvarlı çerçevelerde yönetmeliklerde ön görülmekte olan 1-2-2.5 gibi sayılardan çok daha yüksek bir kuvvet azaltma çarpanı alınabileceğini göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü dolgu duvarlı çerçeveler, donatısız duvarlardan daha sünek bir davranış sergileyecektir. Çerçeve elemanlar dolgu duvarlarının donatılmış duvar gibi davranmasına katkıda bulunmaktadır. Buna katkıda bulunan beton dayanımının düşük olduğu betonarme çerçevelerin, beton dayanımı yüksek çerçevelerden daha sünek olduğu bilinmektedir. Beton dayanımının düşük olması genel olarak istenmemekle birlikte, deney numunelerinde mevcut yapıları temsil etmek üzere düşük seçildiği için bu özelliği deneylere yansıtılmış bulunmaktadır.

Kuvvet azaltma çarpanı değerleri için sınırlı sayıda deneyden elde edilen sonuçların genelleştirilebilmesi, bu konuda yeni deneylerin gerçekleştirilmesi ve kullanılacak yeni ölçüm düzeneklerinin artması beklenen duyarlılıkları ile ilgili olacaktır.

4.4.5 Enerji yutma kapasitesi

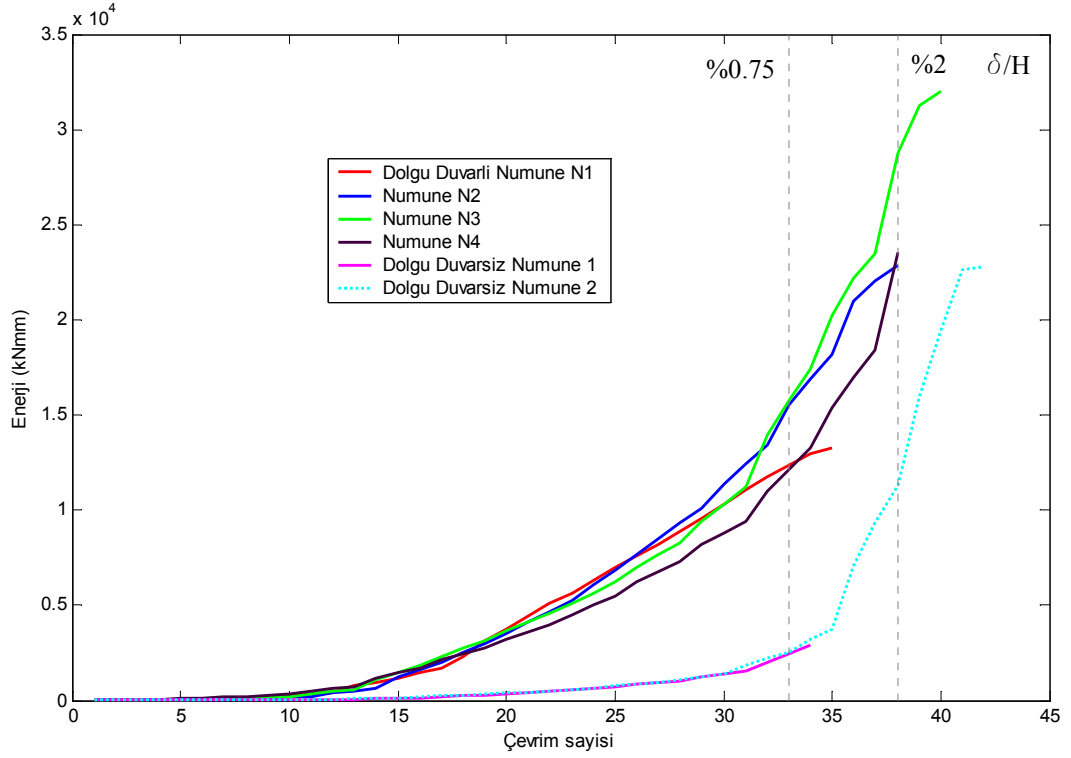
Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin enerji yutma kapasiteleri, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrilerinin içinde kalan alanların hesaplanması ve kümülatif olarak toplanması ile elde edilmiştir. Tüm numunelerin enerji yutma değerleri toplu olarak Şekil 4.54'te verilmiştir. Dolgu duvarsız numunelerin enerji yutma değerleri dolgu duvarlı numunelere göre oldukça düşüktür. Güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma değerleri ile dolgu duvarlı numune N1'nin enerji yutma değerleri arasında çok önemli bir fark görülmemiştir.

4.4.6 Çevrimsel sönüm değerleri

Eşdeğer viskoz sönüm değeri (ξ_{eq}), elastik sönüm (ξ_{el}) ve çevrimsel sönüm (ξ_{hyst}) değerlerinin toplamı olarak, (Priestley ve diğ., 2007);

$$\xi_{eq} = \xi_{el} + \xi_{hyst} \quad (4.8)$$

ile hesaplanabilir. Çevrimsel sönüm (ξ_{hyst}) sistemin başlangıç koşullarından yeteri kadar uzak kalındığı durumun çevrimsel tepkisinde absorbe ettiği enerjiyi, eşdeğer

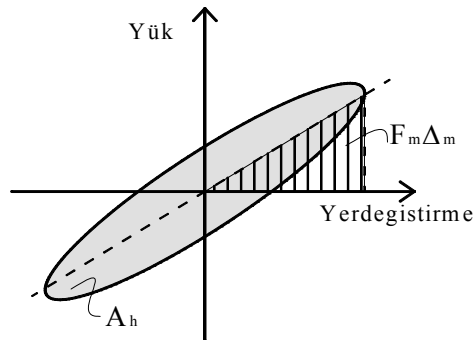


Şekil 4.54 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin enerji yutma değerleri.

bir sistemin belli bir yerdeğiştirme değerindeki viskoz sönüm değerine eşitleyerek bulunabilir. Yapılan bu varsayım doğrultusunda ξ_{hyst} ;

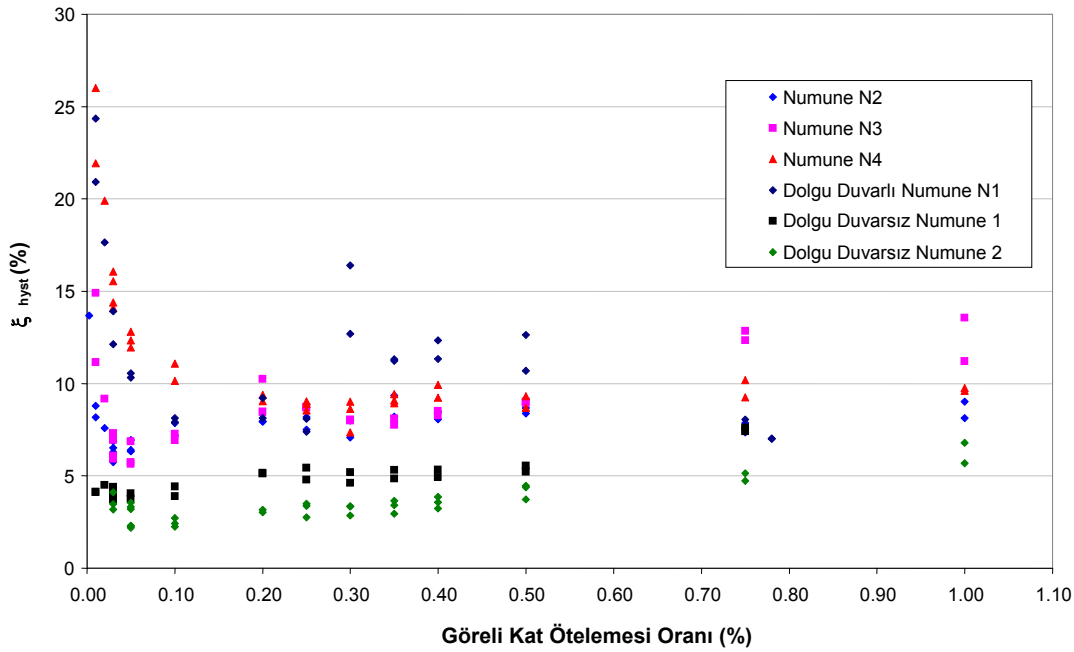
$$\xi_{hyst} = \frac{A_h}{2\pi F_m \Delta_m} \quad (4.9)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada A_h sistemin yük-yerdeğiştirme çevrim eğrisinde stabil herbir tam çevrimin içinde kalan alan, F_m ve Δ_m ise stabil bir çevrimdeki en büyük yük ve yerdeğiştirme değerleridir, Şekil 4.55.



Şekil 4.55 : Çevrimsel sönüm değerleri.

Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin her bir yerdeğiştirme adımında stabil olan çevrimleri seçilmiş, o çevrime ait ξ_{hyst} değerleri hesaplanmış ve karşı gelen görel kat ötelemesi oranı değerleri ile bir diyagramda gösterilmiştir, Şekil 4.56. Burada görüldüğü gibi dolgu duvarlı numunelerin ξ_{hyst} değerleri %5 düzeylerinde olup, deney boyunca büyük değişim göstermemişlerdir. Dolgu duvarlı numunelerde ise ξ_{hyst} değeri %10 düzeyindedir. Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numuneler arasında daha detaylı bir karşılaştırma yapabilmek amacı ile ayrı bir diyagramda gösterilmişlerdir, Şekil 4.57. Bu diyagramda numunelerin her bir yerdeğiştirme adımında stabil çevrimlerden hesaplanan ξ_{hyst} değerlerinin ortalaması alınarak karşı gelen görel kat ötelemesi oranı ile gösterilmiştir.

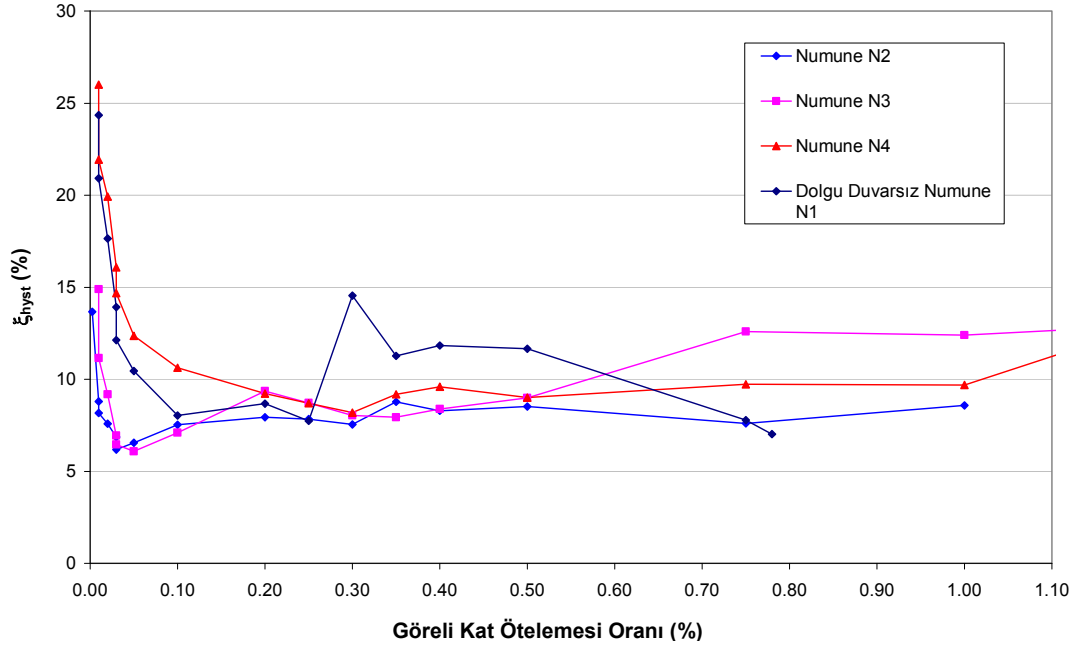


Şekil 4.56 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunelerinin çevrimsel sönüm değerleri.

4.4.7 Numunelerin davranışı

4.4.7.1 Güçlendirilmiş numunelerin davranışı

Bütün numunelerin yerdeğiştirme adımlarına göre hasar durumları ve davranış detayları, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrilerinde gözlenen değişimler ve deneysel gözlemler Bölüm 4.3'te detaylı olarak verilmiştir. Burada numunelerin incelenmiş olan davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.57 : Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numunelerin ortalama çevrimsel sönüm değerleri.

Dolgu duvarsız numunelerde kolonların uç bölgelerinde plastik mafsallar oluşmuştur. Dolgu duvarlı numune N1’de kolonlarda daha az hasar görülmekle birlikte, dolgu duvarlarda diyagonal çatlaklar oluşmuş ve duvarlarda köşeler ve duvar-kiriş ara bölgesinde büyük hasarlar meydana gelmiştir. Güçlendirilmiş numunelerin davranışı ve hasar durumu bu referans numunelerden oldukça farklıdır. Dolgu duvarın CFRP ile güçlendirilmesi ve CFRP şeritlerin çerçeve elemanlara CFRP ankrajlar ile bağlanması, sistemin kompozit bir kesit gibi davranmasına sebep olmuştur. Bu davranışın en iyi örneği Numune N3’te gözlenmiştir, Şekil 4.30-41. CFRP ankrajlar ile kolonlara yük aktarılması sebebiyle bir nevi kısa kolon mekanizması oluşmuş ve kolonlarda büyük kayma çatlakları gözlenmiştir. Numune N3 ve N4’te bu kayma çatlakları çok büyük değerler olarak sistemin göçmesinde etkili olmuştur. Bundan dolayı, dolgu duvarların CFRP ile bu şekilde güçlendirilmesi durumunda sistem davranışının dolgu duvarlı çerçeve davranışından ayrıldığı ve hesaplarda kolonların kaymaya karşı kontrol edilmesi ve gerekli önemlerin alınması gerektiğinin de “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de ilgili bölümde özellikle belirtilmesi gerektiği düşünülmektedir.

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde, CFRP şeritlerin çerçeveye bağlantısı dikkatli ve uygun bir şekilde yapılması durumunda CFRP şeritlerde kırılma, şeritlerin kopması şeklinde olmaktadır. CFRP ile güçlendirilmiş

dolgu duvarlarda bunun tek göçme biçimi olmadığı bilinmektedir. Yönetmelikte yansıtılması adına diğer göçme biçimlerin de gözönünde bulunması önemlidir.

CFRP şeritlerin çerçeveye bağlantısı Numune N3'te olduğu gibi CFRP ankrajlarla yapılması durumunda, çerçeve elemanların kesitlerinin zayıflatıldığı ve bunun sonucunda bu numunede bahsedilen bölgelerde diğerlerine göre çok daha ciddi hasarların görüldüğü dikkat edilmesi gereken bir husustur. Çünkü "DBYBHY" (2007)'de önerilen güçlendirme şekli buna benzerdir.

Gerek mevcut kolonlarla arasına girmiş olan harcın kolonlara yapışması nedeniyle veya kayma kamaları kullanmak suretiyle geliştirilmiş dolgu duvarlı çerçeve davranışı, gerekse CFRP'nin çerçevedeki kolon ve kirişe yine CFRP'den yapılmış ankrajlarla bağlanması, hep çerçeve ile dolgu duvarın beraber çalışması sonucunu elde etmeye yöneliktir. Deneyler çerçeve ve duvarın birlikte davranışının sağlanabileceğini ve numunenin bu davranışının sadece en büyük yatay yük (P_{G1}) düzeyine kadar değil, önerilen göçme yükü ve yerdeğiştirmesi (P_{G2} , Δ_{G2}) ve hatta göçme yükü ve yerdeğiştirmesi (P_{G3} , Δ_{G3}) düzeyine kadar korunduğunu göstermektedir, (Bknz. Şekil 4.48). Bu birlikte davranışın en önemli özelliği dolgu duvardan önce tekil çubuklar olan kolon ve kirişin artık serbestçe şekildeğiştirmeyeceğidir. Basit hesaplar ve deneysel gözlemler birlikte çalışmayı işaret etmektedir. Böyle bir durumda yapısal modelde yeralacak elemanların birbirinden ayrı elemanlar olması gözlenilen davranışla uyum içinde olamaz. Başka bir deyişle, dolgu duvarsız çerçeve davranışında alınan deformasyon sınırlarını güçlendirilmiş dolgu duvarlı durumda geçerli saymak mümkün değildir. Böyle durumlarda tüm şekildeğiştirmelerin bileşkesi anlamına gelecek olan görelî kat ötelemesi oranı ile çalışmak daha gerçekçi olacaktır.

4.4.7.2 Dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin davranışı

Güçlendirilmiş numuneler N2 ve N3'te görelî kat ötelemesi oranı, sırasıyla, %1 ve %0.75 iken dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritler kopmuştur. Numune N2'de CFRP kopmasından dolayı yatay yükteki düşüş, itmede 64.23 kN ve çekmede 50.65 kN'dur. Bu yatay yükteki düşüşlerin, CFRP kopmadan hemen önce numune tarafından taşınan yatay yüke oranı, sırasıyla, %26 ve %22'dir. Numune N3'te ise CFRP şerit kademeli olarak kopmuş ve yatay yükte 23 kN'luk, başka bir deyişle %10'luk, bir düşüş olmuştur.

4.4.7.3 Güçlendirilmiş dolgu duvarın davranışı

CFRP uygulanmış dolgu duvarın davranışını daha iyi anlamak için güçlendirilmiş numuneler detaylı incelenmiştir. Burada örnek olarak Numune N2 sunulmaktadır. Numune N2 ilk yerdeğiştirme adımlarında güçlendirilmiş dolgu duvarı oluşturan unsurlar olan sıva, tuğla ve CFRP şeritler bir bütün olarak çalışmıştır. İlerleyen adımlarda yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinde yükte düşme olmuş ve bundan sonra sıva, tuğla ve CFRP elemanları görelî kat ötelemesi oranı %0.4 düzeyinde birbirinden ayrılmaya başlamıştır. Sonraki adımlarda yatay yükte biraz artma görülmüş, duvar hasarları ilerlemiş, tuğlalar ve sıvalarda hasar artarak kırılma ve dökülme gözlenmiştir. Artan yerdeğiştirme adımlarında dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerin kopmasından sonra görelî kat ötelemesi oranı %1 seviyelerinde duvarda büyük hasarlar gözlenmiş ve yatay yük değerleri iyice düşmüştür.

4.4.8 Hasar durumu çizelgesi

Betonarme çerçevelerin dolgu duvarlarının FRP ile güçlendirilmesi nispeten yeni bir uygulamadır. Bu uygulama “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de dolgu duvarların güçlendirilmesi için önerilmiş olduğundan sayısal hesabının irdelenmesi ve geliştirilmesi oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu şekilde güçlendirilmiş betonarme çerçeveler için “DBYBHY” (2007)’de verilmiş olan elemanların hasar sınırlarının ve onlara bağılı olarak belirlenen sistem performans seviyelerinin değerlendirilebilmesi ve geliştirilebilmesi için bu konuda yapılmış deneysel çalışmaların sonuçlarının detaylı olarak incelenmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca belirlenmiş olan hasar bölgelerinde numunelerin hasar durumlarının tanımlanmış olması, yapısal modelde sistem elemanlarını temsil eden çubuk elemanlara atanan yük-yerdeğiştirme eğrilerinin kritik yerdeğiştirme değerlerine karar verilmesi için faydalı olacaktır. Bu doğrultuda, bu çalışmanın, Bölüm 2’de özetlenmiş olan önceki çalışmaların ve gelecekte yapılacak olan çalışmaların deney sonuçlarının bu amaca uygun olacak şekilde sunulmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

Bu nedenlerle, güçlendirilmiş numunelerin hepsinin hasar adımları bir çizelgede toplanarak bir hasar durumu çizelgesi hazırlanmıştır. Hasar durumu çizelgesinin ilk iki sayfası Çizelge 4.3’te, tümü ise Ek B’de sunulmuştur. Hasar durumu çizelgesinde sistem elemanları ayrı ayrı ele alınmış ve her bir görelî kat ötelemesi oranı adımı

gözlenen hasarlar kayıt edilmiştir. Çizelgede bütün güçlendirilmiş numuneler için o adımda ortak olan hasarlar yazılmış, eğer o adımda sadece bir numuneye özgü bir hasar gözlenmişse önce numunenin adı belirtilmiştir.

Çizelgenin ilk kolonlarında “DBYBHY” (2007)’de güçlendirilmiş dolgu duvarlar ve doğrusal elastik yöntemle yapılan hesap için kolon ve perdeler için hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları verilmiştir. FEMA 306 (1998)’da dolgu duvarlar için dört adet davranış şekli tanımlanmıştır. Bunlar yatay bir harç tabakası boyunca kayma, diyagonal çatlama, köşe kırılması ve düzlemdışı devrilmedir. Bir karşılaştırma yapabilmek amacı ile bu davranışlar için FEMA 306 (1998)’da verilmiş olan sınırlar da hasar durum çizelgesinde yer almaktadır.

Verilen tüm sınırlara göre numunelerin hasar durumunun değerlendirmesi yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- “DBYBHY” (2007)’de güçlendirilmiş dolgu duvarlar için verilen minimum hasar bölgesi sınırı (MN) olan görelî kat ötelemesi oranı %0.15’in uygun olduğu gözlenmiştir. Belirgin hasar bölgesinin üst sınırı olan güvenlik sınırı (GV) için verilen değer %0.35’in konservatif kaldığı ve deneylerin bu sınırın belli bir ölçüde arttırılabileceği işaret etmektedir.
- FEMA 306 (1998)’da güçlendirilmemiş dolgu duvarların diyagonal çatlama başladığı görelî kat ötelemesi oranı sınırı %0.25’tir. Güçlendirilmiş dolgu duvarlarda diyagonal çatlaklar daha önceki adımlarda başlamış olmasına rağmen, bu görelî kat ötelemesi oranından sonra duvar boyunca ilerlemeye ve birleşmeye başlamıştır.
- “DBYBHY” (2007)’de sayısal hesabı doğrusal elastik yöntemle yapılan kolon ve perdeler için verilen minimum hasar bölgesi (MN) sınırı %1’e gelindiğinde Numune N3’ün kolonlarında ciddi hasarların olduğu gözlenmiştir. Bu durum, önceden de açıklandığı gibi güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin bütünleşik davranışı nedeniyle kolon ve kirişlerin dolgu duvarsız çerçeve davranışlarının geçerli olmadığını ve hasar bölgesi sınırları seçilirken buna da dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.3 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
							Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda	
Minimum hasar bölgesi	Minimum hasar bölgesi		0.05	İlk eğilme çatlakları (d* $\leq$ 1 mm)		Diyagonal okumaların doğrusal bölgeden çıktığı değer.		N3 : Kirişte CFRP ankraj elemanları civarında bir çatlak	
			0.1			– Önceki adımlarda oluşan eğik çatlakların genişliği (d*~ 0.1 mm) ve boyu artmış. – Diyagonal CFRP şeritler çevresinde yeni eğik çatlaklar (d*~0.1 mm) – Duvar-kiriş arayüzünde ayrılma, (d*~0.1mm). – N3 : Kolonlardan başlayıp, duvar üzerinde devam eden eğik çatlaklar.		Mesnet yerlerinde çatlaklar. N3 : Kiriş ankraj civarlarında çatlaklar.	– Bütün güçlendirilmiş numunelerde önemli hasar adımları. Özellikle basınç diyagonali ve çerçevedeki çatlaklar için. – N4 numunesi diğerlerine göre daha az çatlamış. Güçlendirilmiş dolgu duvar için seçilmiş olan sınır oldukça uygun.

Çizelge 4.3 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görel Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görel Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
							Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda	
MN % 0.15									
Belirgin hasar bölgesi	Minimum hasar bölgesi		0.2		N4 : Kirişte kayma çatlağı ve kiriş-kolon birleşim yerinde kiriş içine giden çatlak.	Yeni diyagonal çatlaklar.	Basınç etkisindeki CFRP diyagonal üst köşelerde duvardan hafifçe ayrılmış.		
		Güçlendirilmemiş dolgu duvarda diyagonal çatlama ve köşe kırılmalarının başlangıcı	0.25	– Kayma çatlakları d*~0.1 mm – Dolgu duvardaki çatlaklar ile kolondaki çatlaklar birleşmiş. – Kolon çatlakları d*~0.1mm	– Kayma çatlakları d*~0.1mm – Kiriş-kolon birleşim bölgesi civarında çatlak – N3 : Bu çatlakların genişliğinde önemli artış olmuş ve bunlar kolonlar üzerinde kayma çatlakları olarak devam ediyor.	– Duvar çatlakları d*~0.5 mm – N4 : Sıvada kabarma.	– Basınç diyagonal duvardan belirgin biçimde ayrılmış – N4 : CFRP’nin gergin/gevşek olması gözleniyor.	N4 : Basınç çubuğunun mesneti kalkmış.	– Basınç diyagonalinde bir köşeden diğer köşeye çatlakların ilerlemesi ve birleşmesi başlamış. – Sistem hala bütün çalışıyor.
Kısaltmalar: ¹ Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007), ² Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan görel kat ötelemesi oranları, (Çizelge 7.5, DBYBHY, 2007), ³ Doğrusal elastik yöntemlerle yapılan hesapta kolon ve perdeler için görel kat ötelemesi oranı hasar sınırları, (Çizelge 7.6, DBYBHY, 2007), ⁴ Güçlendirilmemiş tuğla dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan görel kat ötelemesi oranları, (FEMA 306, 1998), d* : çatlak genişliği.									

5. İKİ KATLI-TEK AÇIKLIKLI BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ

5.1 İki Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numuneleri

Sekiz adet yaklaşık olarak ½ ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunesi çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiştir. Numuneler, kolon düşey donatıları sürekli veya kat seviyesinde bindirmeli ekli olacak şekilde iki grup olarak üretilmişlerdir. İki farklı CFRP ile güçlendirme uygulaması yapılarak yapısal davranışları incelenmiştir.

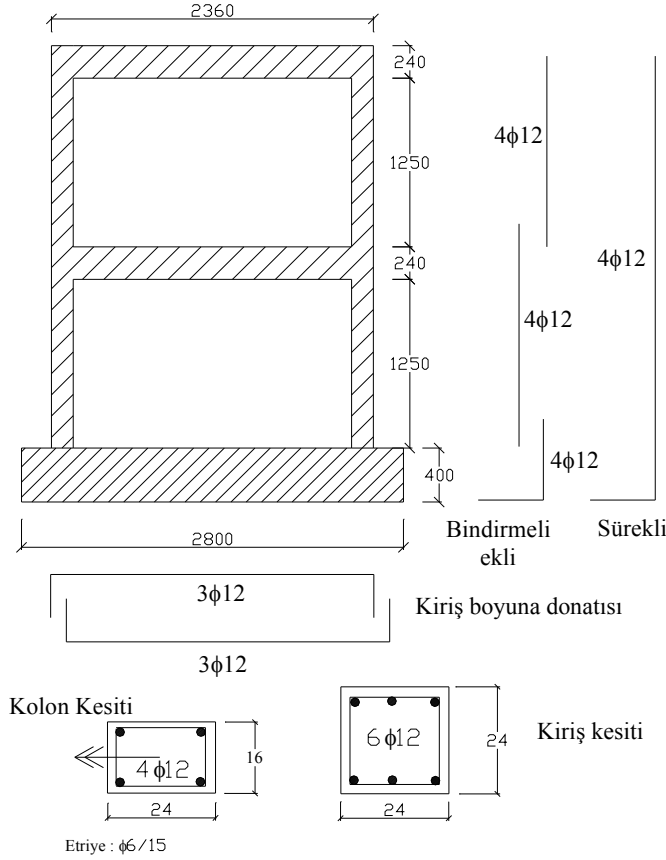
İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri Ortadoğu Teknik Üniversitesi yürütücülüğündeki “NATO SfP-977231 : Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings” ve TÜBİTAK-ICTAG-I 575 no’lu projeler kapsamında yapılmıştır. Bu uluslararası çalışmada İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı katılımcılardan biri olarak yer almıştır.

Tüm numunelerdeki dolgu duvarlar yatay delikli fabrika tuğlası ile üretilmiştir. Tuğla boyutları ve malzeme özellikleri Bölüm 3.1.1’de verilmiştir. 135 mm kalınlığındaki tuğlalar deliklerine dik doğrultuda ikiye kesilmiş ve dolgu duvarlar tuğla delikleri yatay harç tabakalarına dik olacak şekilde üretilmişlerdir. Herbir numunenin sıva ve harç malzeme özellikleri Bölüm 3.1.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir. Betonarme çerçeve numunelerinin beton ve çelik malzeme özellikleri Çizelge 3.5 ve 3.6’da özetlenmiştir.

Dolgu duvarlı numunelerde duvarlar, tek katlı-tek açıklıklı numunelerden farklı olarak, betonarme çerçevenin bir yüzüne hem yüz olacak şekilde eksantrik olarak örülmüşlerdir. Bu tip üretim uygulamada sıkça yapılmaktadır. Dolgu duvarların güçlendirilmesinde CFRP uygulaması sıvalı duvar üstüne yapılmıştır. Bütün güçlendirilmiş numunelerde CFRP No.1 ve Epoksi-1 kullanılmıştır. CFRP ve epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.7 ve 3.8’de görülmektedir.

İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin boyutları ve donatı detayları laboratuvar yükleme koşullarına, pratikteki uygulamalara ve NATO SfP-977231 projesi kapsamında yürütülmüş olan önceki çalışmalara göre belirlenmiştir, Şekil 5.1,

(Akgüzel, 2003 ve Ersoy ve diğ., 2003). Kolon düşey donatıları kat seviyelerinde bindirmeli ekli olan numunelerin donatılarının bindirme boyu $20\phi=240$ mm'dir ve uçlarında kanca yapılmamıştır.



Şekil 5.1 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin boyutları ve donatı detayları, (ölçüler mm cinsindendir).

Numunelerde donatı olarak yumuşak çelik kullanılmış, düğüm noktalarında enine donatı yerleştirilmemiş, düğüm noktası civarında enine donatı sarılma bölgeleri oluşturulmamış ve enine donatılarda kancalar 135° kıvrılmamıştır.

Numuneler kolon düşey donatısı sürekli veya kat seviyesinde bindirmeli ekli olmasına göre iki gruba ayrılmaktadır, Çizelge 5.1. Herbir grupta bir adet dolgu duvarsız (BC-0 ve BL-0) ve bir adet sıvalı dolgu duvarlı (IC-0 ve IL-0) referans numuneleri vardır. Öncelikle biri sürekli düşey donatılı ve diğeri bindirmeli ekli düşey donatılı olan iki sıvalı dolgu duvarlı numune (sırasıyla, IC-C1 ve IL-C1) her iki yüzüne CFRP uygulanarak güçlendirilmiş ve bu güçlendirme şekli 'C1' olarak isimlendirilmiştir. İkinci aşamada her iki gruptan birer numunenin (IC-C2 ve IL-C2) sıvalı dolgu duvarlarının bir yüzüne iki kat CFRP uygulanmış ve bu güçlendirme şekli 'C2' olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca kolon düşey donatıları bindirmeli ekli

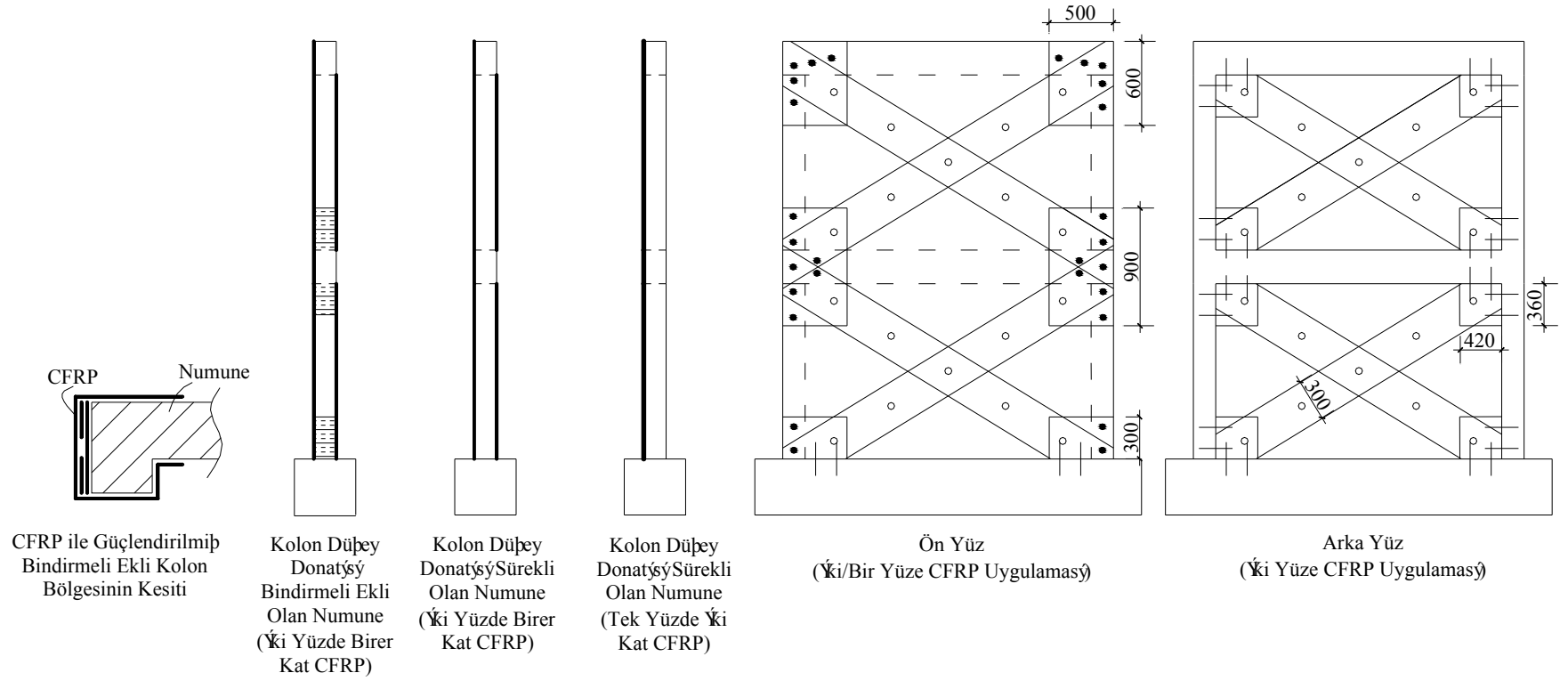
olan numunelerde, ek bölgesinde CFRP sargı yapılmıştır. Numunelerin CFRP uygulanma şekilleri, NATO Sfp-977231 projesi kapsamında diğer üniversitelerde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir, (Akgüzel, 2003 ve Ersoy ve diğ., 2003).

Çizelge 5.1 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerin özellikleri.

Numune Adı	Dolgu Duvar	Kolon Düşey Donatısı	Güçlendirme Detayı
BC-0	Yok	Sürekli	Yok
BL-0	Yok	Bindirmeli ekli	Yok
IC-0	Sıvalı dolgu duvar	Sürekli	Yok
IL-0	Sıvalı dolgu duvar	Bindirmeli ekli	Yok
IC-C1	Sıvalı dolgu duvar	Sürekli	Dolgu duvarların iki yüzü üzerinde CFRP diyagonaller
IL-C1	Sıvalı dolgu duvar	Bindirmeli ekli	Dolgu duvarlar iki yüzü üzerinde CFRP diyagonaller ve bindirmeli ek bölgesinde CFRP sargı
IC-C2	Sıvalı dolgu duvar	Sürekli	Dolgu duvarların tek yüzü üzerinde iki kat CFRP diyagonaller
IL-C2	Sıvalı dolgu duvar	Bindirmeli ekli	Dolgu duvarların tek yüzü üzerinde iki kat CFRP diyagonaller ve bindirmeli ek bölgesinde CFRP sargı

5.2 Numunelerin Güçlendirilme Aşamaları

İlk olarak iki sıvalı dolgu duvarlı numune (IC-C1 ve IL-C1) her iki yüzüne CFRP uygulanarak güçlendirilmiş ve bu güçlendirme şekli ‘C1’ olarak isimlendirilmiştir. Uygulamada dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemlerin her iki yüzüne de CFRP yapıştırmak her zaman mümkün olamamaktadır. Bu durum gözönünde bulundurularak, iki adet numuneye tek yüze CFRP uygulaması yapılmış, böylece tek yüzde uygulamanın çift yüzde uygulamayla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Buna göre kolon düşey donatıları sürekli olan IC-C2 ve kolon düşey donatılarında bindirmeli ek olan IL-C2 numunelerinin dolgu duvarlarının sadece bir yüzüne CFRP şeritler yapıştırılmış ve bu güçlendirme şekline ‘C2’ ismi verilmiştir. ‘C1’ ve ‘C2’ güçlendirme şekillerinin detayları şematik olarak Şekil 5.2’de verilmiştir.



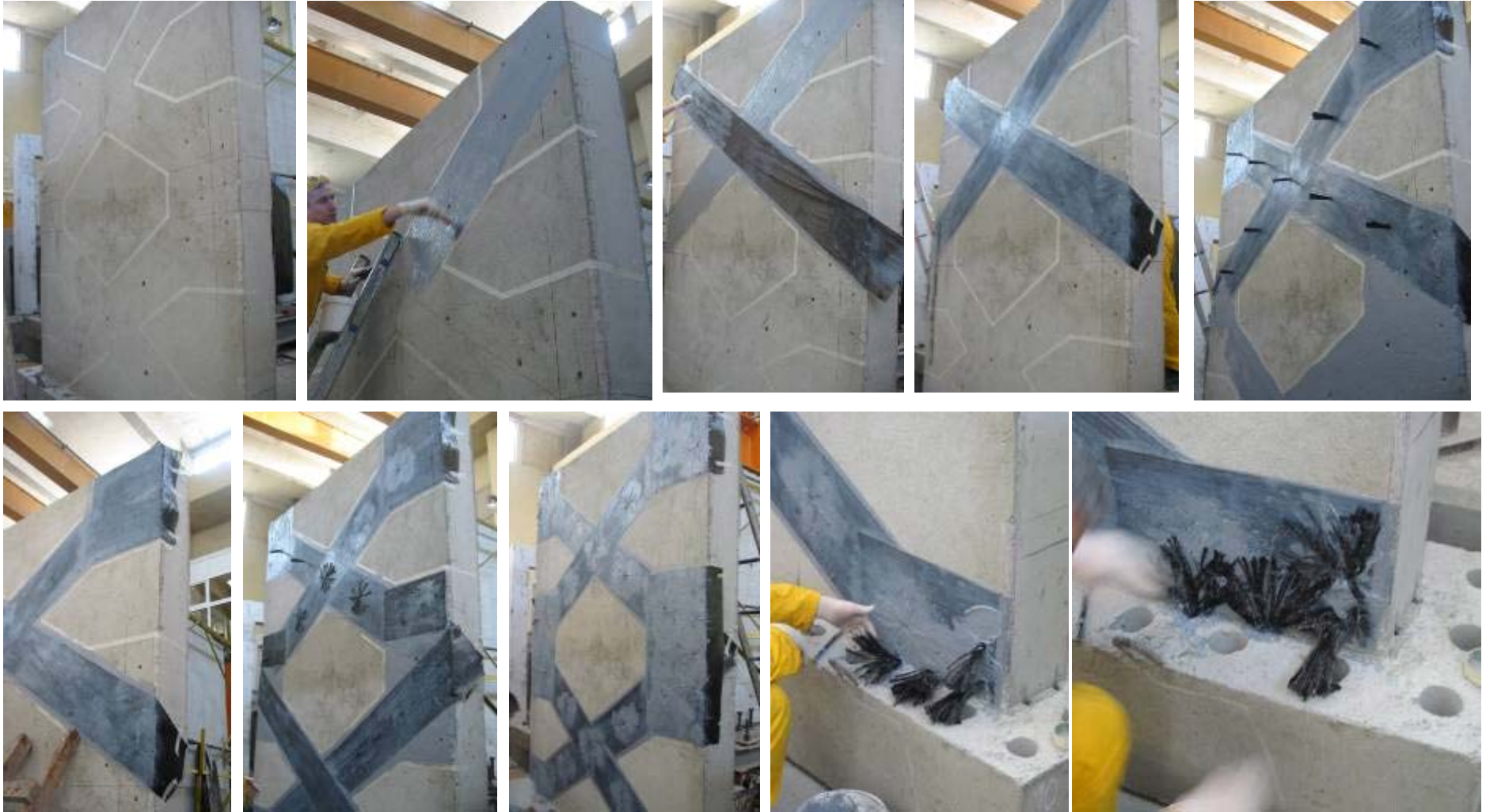
Şekil 5.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin güçlendirilme detayları, (ölçüler mm cinsindendir).

‘C1’ güçlendirmesinde, uygulamanın ilk aşaması kolon düşey donatısı sürekli ve bindirmeli ekli olan numuneler için aynıdır. Öncelikle iki kattaki dolgu duvarların her iki yüzüne, duvar diyagonalleri doğrultusunda birer kat CFRP şerit epoksi ile yapıştırılmıştır, Şekil 5.2 ve 5.3. Bu CFRP şeritlerin genişlikleri 300 mm’dir. Duvarın iki yüzündeki diyagonal CFRP şeritler, duvarın içinden geçen CFRP’den yapılmış ankrajlar ile birbirine bağlanmıştır.

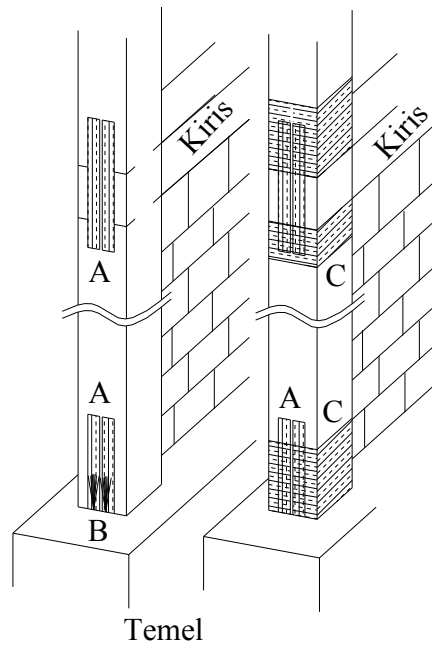
Duvar köşelerinde, birinin lif doğrultusu düşey diğerinin ise yatay olacak şekilde birer kat CFRP yapıştırılarak, diyagonal CFRP şerit ile taşınacak olan yükün köşelerde nispeten daha geniş bir alana yayılması düşünülmüştür. Diyagonal CFRP şerit tarafından taşınacak yükü, betonarme çerçeve elemanlarına aktarmak için kolon ve kirişlere ikişer adet CFRP ankraj yapılmıştır. CFRP şeritlerin temele olan bağlantıları da CFRP ankrajlar ile sağlanmıştır, Şekil 5.4. CFRP ankrajları yapmak için çerçeve elemanlarına ve temele yaklaşık olarak 120 mm genişliğinde ve 200 mm derinliğinde delikler delinmiştir. CFRP ankraj uygulaması, güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinde yapıldığı gibidir.

Kat seviyelerinde yetersiz bindirmeli ekli olan numunede (IL-C1) ‘C1’ güçlendirmesinin ikinci aşamasında ilave CFRP uygulaması yapılmıştır. İlk olarak, yetersiz bindirme boyu ekli olan kısımlarda, kolon köşeleri yuvarlatılarak CFRP yapıştırmaya uygun hale getirilmiştir. Daha sonra kolonların dış yüzlerine, düşey donatıya paralel olacak şekilde düşey CFRP şeritler yapıştırılmıştır, Şekil 5.5’teki A’ya bakınız. Düşey CFRP’nin miktarı, bindirmeli ek yapılmış olan kolonun çekme tarafındaki düşey donatı ile aynı çekme dayanımına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Bu düşey CFRP’nin temele bağlantısı CFRP ankrajlar ile sağlanmıştır, Şekil 5.5’teki B’ye bakınız. Son olarak lif doğrultusu yatay olan bir kat CFRP ile kolon sarılmıştır, Şekil 5.5’teki C’ye bakınız. Bu işlemlerin aşamaları Şekil 5.6’da görülmektedir.

‘C2’ güçlendirmesinde dolgu duvarların çerçeve elemanlarına hem yüz olan yüzlerine CFRP uygulanmıştır, Şekil 5.2 ve 5.7. IC-C2 ve IL-C2 numunelerinde, dolgu duvarların bir yüzüne diyagonalleri doğrultusunda ikişer kat CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Bu şeritlerin genişliği 300 mm’dir. ‘C1’ güçlendirmesinde olduğu gibi CFRP ankrajlar kullanılarak bu şeritlerin çerçeve elemanlarına bağlantısı yapılmıştır. Diyagonal CFRP şeritlerin dolgu duvar yüzeylerinden ayrılmasını önlemek amacı ile bunlar CFRP ankrajlar ile duvarın diğer yüzüne bağlanmıştır, Şekil 5.7. CFRP ankrajlar, CFRP uygulanmamış olan yüzde sıvanın üzerine



Şekil 5.3 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerine CFRP uygulaması.





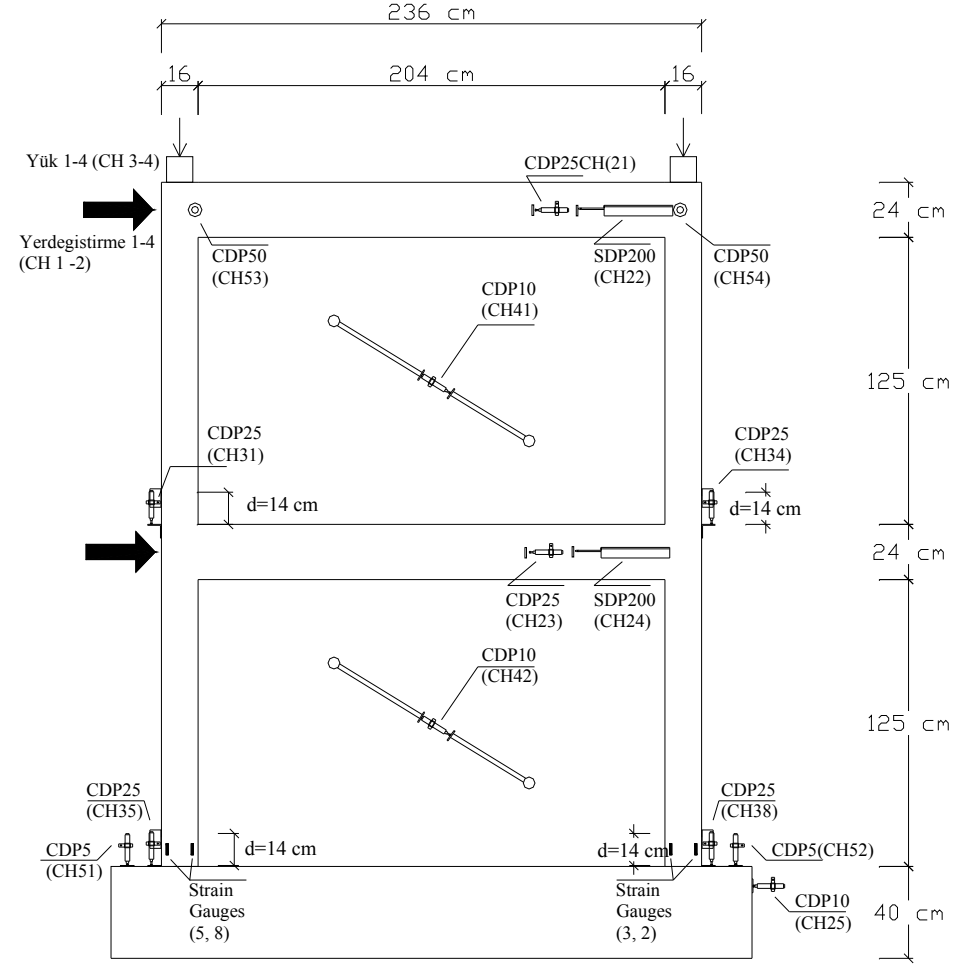
Şekil 5.7 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinde tek yüze CFRP uygulaması ‘C2’.

yayılarak yapıştırılmıştır. Kolon düşey donatısında bindirmeli ek olan numune IL-C2’de, kolonun ek olan yerlerinde, ‘C1’ uygulamasının ikinci aşamasında açıklandığı gibi kolon yan yüzlerine CFRP şeritler yapıştırılmış ve bu bölge CFRP ile sarılmıştır, Şekil 5.5 ve 5.6.

Kolon düşey donatılarında bindirmeli ek olan IL-C1 numunesinin deneyi iki kere tekrarlanmıştır. İlk deneyde, diyagonal CFRP şeritleri temele bağlayan CFRP ankrajların derinliği yeterli olmadığı için ankrajlar yerlerinden çıkmış ve sistem erken göçmeye gitmiştir. Bu numunedeki çatlaklar epoksi enjeksiyon ile tamir edildikten, hasarlı CFRP şeritler yenilendikten ve temeldeki CFRP ankrajlar yeterli derinlikle yeniden üretildikten sonra numune yeniden test edilmiştir.

5.3 Deney Yükleme ve Ölçüm Düzeneği

İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneler çevrimsel yatay yükler etkisinde yerdeğiştirme kontrollü olarak denenmiştir. Yatay yükleme ± 250 kN yük ve ± 300 mm yerdeğiştirme kapasiteli ayrı ayrı kontrol edilen iki adet hidrolik veren ile yapılmıştır. Yatay yükler numuneye kiriş hizalarından, yükün katlara dağılımı ikinci ve birinci kat seviyelerinde, sırasıyla, 2/3 ve 1/3 oranından olacak şekilde, ucu mafsallı rijit çelik kiriş kullanılarak etkitilmiştir. Numune deney düzeneği Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yükleme ve ölçüm düzeneği.

Kolonlara, kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak %23'ü kadar yük uygulanmıştır. Normal kuvvet hidrolik pompalar kullanılarak rijit bir çelik kiriş aracılığı ile kolonlara aktarılmış ve deney esnasında değeri yük ölçer ile ölçülerek kontrol edilmiştir.

Deneyde herbir hedef yerdeğiştirme adımı numuneye itme ve çekme olmak üzere birer kez uygulanmıştır. Hedef yerdeğiştirme adımları ve bunlara karşı gelen toplam kat ötelemesi oranları (δ_i/H_t) Çizelge 5.2'de verilmiştir. Toplam kat ötelemesi oranları, numunenin ikinci katının yatay yerdeğiştirmesinin (δ_i) toplam numune yüksekliğine (H_t) bölünmesi ile hesaplanmıştır.

Deney esnasında, kat seviyelerinden düzlemiçi yatay yerdeğiştirme değerleri yerdeğiştirme ölçerler kullanılarak (LVDT) ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numunenin iki katındaki dolgu duvarlarının her iki diyagonalleri üzerinden yerdeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Kolonların alt ve üst uçlarındaki yerdeğiştirme değerleri yerdeğiştirme ölçerler ile ölçülmüştür. Ayrıca kolon düşey donatılarının şekildeğiştirme değerleri, donatılara yerleştirilmiş olan şekildeğiştirme ölçerler (strain gauge) ile kaydedilmiştir. Numunelerin düzlemdışı yerdeğiştirme değerleri, temelin ötelenmesi ve dönmesi yerdeğiştirme ölçerler ile ölçülerek deney süresince kontrol edilmiştir. Deney sırasında çatlak ölçümleri yapılmış ve hasar durumları kayıt edilmiştir. Numunelerin ölçüm düzeneği Şekil 5.8'de görülmektedir.

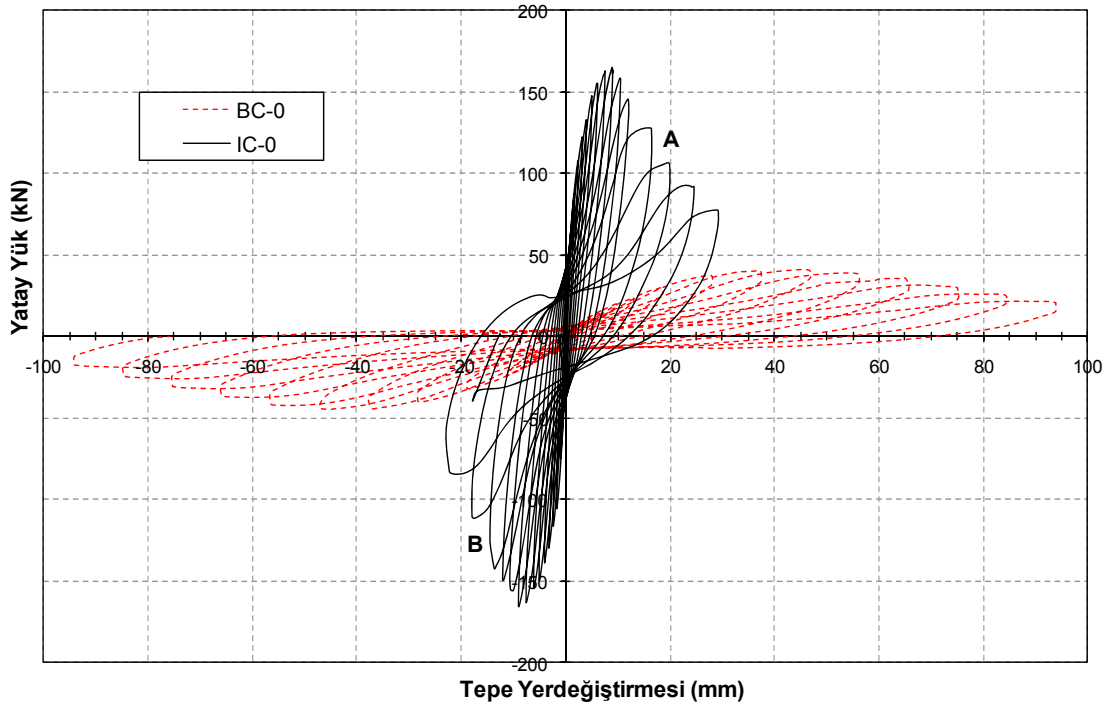
Çizelge 5.2 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi toplam kat ötelemesi oranı (δ_i/H_t) değerleri.

δ_i (mm)	δ_i/H_t (%)	Tekrar Sayısı		δ_i (mm)	δ_i/H_t (%)	Tekrar Sayısı		δ_i (mm)	δ_i/H_t (%)	Tekrar Sayısı
0.47	0.016	1		7.55	0.264	1		32.90	1.150	1
0.94	0.032	1		9.00	0.315	1		37.60	1.315	1
1.65	0.057	1		10.50	0.367	1		47.00	1.643	1
2.35	0.035	1		12.00	0.419	1		56.40	1.972	1
3.20	0.111	1		15.40	0.539	1		65.80	2.300	1
4.00	0.139	1		18.50	0.647	1		75.20	2.629	1
5.05	0.177	1		23.50	0.822	1		84.60	2.958	1
6.10	0.213	1		28.20	0.986	1		94.00	3.287	1
δ_i : İkinci kat hedef tepe yerdeğiştirmesi, δ_i/H_t : δ_i 'e karşı gelen toplam kat ötelemesi oranı, H_t : Numune yüksekliği										

5.4 Deney Sonuçları

5.4.1 Numuneler BC-0 ve IC-0

Kolon düşey donatıları sürekli olan referans numuneler dolgu duvarsız çerçeve ve dolgu duvarlı çerçevenin, sırasıyla, BC-0 ve IC-0, deney verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri Şekil 5.9’da verilmiştir. Bu diyagramlar incelendiğinde, dolgu duvarlı çerçeve IC-0’ın yatay rijitliğinin dolgu duvarsız çerçeve BC-0’inkinden oldukça yüksek olduğu görölmektedir. Ayrıca IC-0’ın yatay yük taşıma kapasitesi BC-0’den yaklaşık 4 kat daha büyüktür. Fakat yükteki bu artışın ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar devam etmediğine de dikkat edilmelidir. IC-0’de 15.4 mm adımında ($\delta/H_t = \%0.539$) birinci kat kolonlarının üst kısmında oluşan ve kiriş-kolon düğüm noktasının içerisine doğru yönelen çatlaklar oluşmuş ve bu adımda yatay yükte bir düşüş gözlenmiştir, Şekil 5.9’da ‘A’ ve ‘B’ye bakınız. Sözü edilen çatlakların genişliği 23.5 mm yerdeğiştirme adımında ($\delta/H_t = \%0.822$) artmış ve bir sonraki yerdeğiştirme adımında (28.2 mm, $\delta/H_t = \%0.986$), bu kayma çatlakları kolonu göçmeye götürmüştür, Şekil 5.10.



Şekil 5.9 : IC-0 ve BC-0’nın yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.

Dolgu duvarsız numune BC-0’da hasar düğüm noktaları ve kolonların temel seviyelerinde yoğunlaşmış olmasına rağmen, dolgu duvarlı numune IC-0’de çatlaklar

alt kat kolonlarına, etriyelerin bulunduğu yerlerde, yayılı olarak meydana gelmiştir, Şekil 5.10. IC-0'ın dolgu duvarında birkaç diyagonal çatlak gözlenmişse de duvardaki asıl önemli hasar birinci kat dolgu duvarının köşelerindeki ezilmedir. İkinci kat dolgu duvar ve çerçevesinde önemli bir hasar gözlenmemiştir. IC-0'deki diğer önemli hasar ise dolgu duvarın çerçeve elemanlarından ayrılmasıdır.

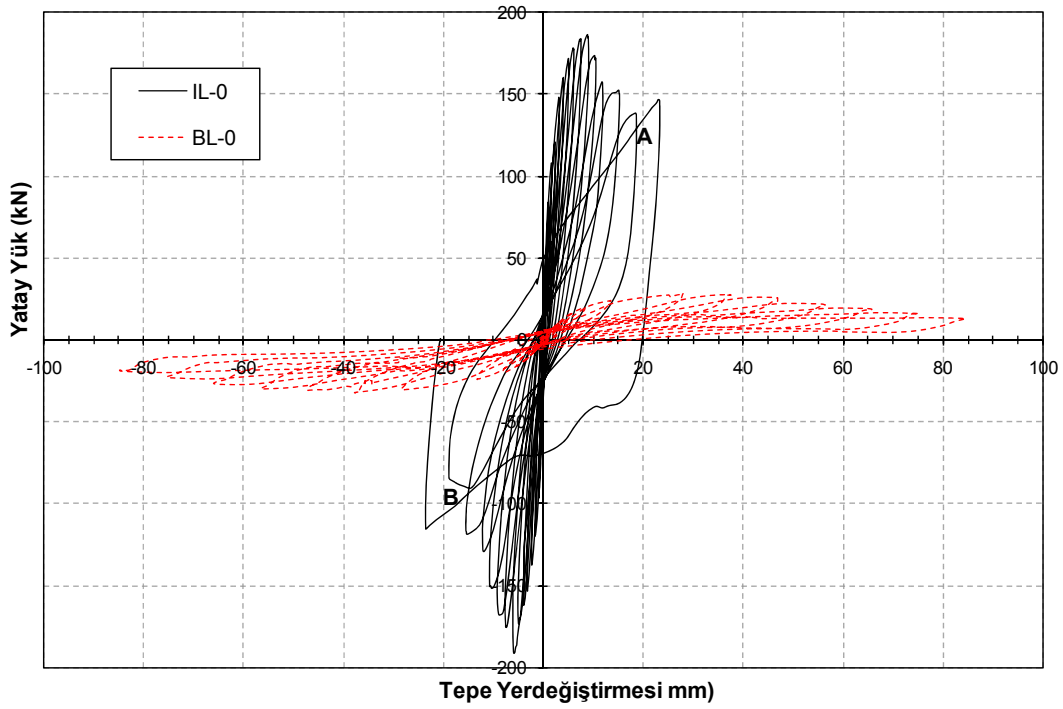


Şekil 5.10 : IC-0'ın hasar durumu.

5.4.2 Numuneler BL-0 ve IL-0

Kolon düşey donatılarında bindirmeli ek olan referans numuneler dolgu duvarsız çerçeve ve dolgu duvarlı çerçevenin, sırasıyla, BL-0 ve IL-0, deney verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri Şekil 5.11'de verilmiştir. Bu diyagramlar incelendiğinde, dolgu duvarlı çerçeve IL-0'ın yatay rijitliğinin dolgu duvarsız çerçeve BL-0'dan oldukça büyük olduğu görülmektedir. BL-0 ve IL-0 numunelerinin hasar durumu, kolon düşey donatıları sürekli olan numuneler BC-0 ve IC-0'ın hasar durumuna benzer olmuştur. Dolgu duvarlı numune IL-0'da birinci kat kolonlarında eğilme çatlakları oluşmuş, birinci kat dolgu duvarında köşelerde ezilme ve genişliği büyük bir diyagonal çatlak gözlenmiş ve birinci kat kolonlarının üst

uçlarında kayma çatlakları meydana gelmiştir, Şekil 5.12. Yine ikinci kat çerçeve elemanlarında ve dolgu duvarında önemli bir hasar oluşmamıştır. 18.5 mm yerdeğiştirme adımıyla ($\delta_t/H_t = \%0.647$) birinci kat kolonunun üst ucunda oluşan kayma çatlaklarının genişliği ileri adımlarda artmıştır. Bu bölgedeki betonun ezilmesi ve kolon düşey donatılarının akması ile 23.5 mm yerdeğiştirme adımıyla ($\delta_t/H_t = \%0.822$) sistem göçmüştür. Sözü edilen kolon kayma çatlaklarının yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi diyagramına etkisi Şekil 5.11’de ‘A’ ve ‘B’de görülmektedir.



Şekil 5.11 : BL-0 ve IL-0’ın yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.

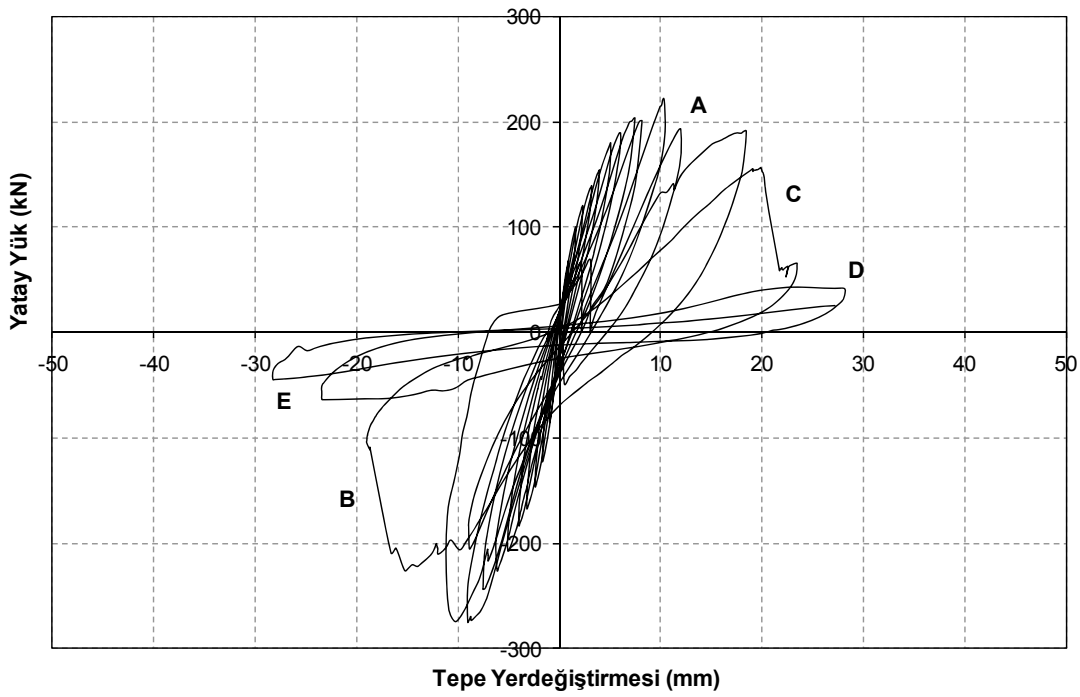
5.4.3 Numuneler IC-C1 ve IL-C1

Kolon düşey donatıları sürekli olan, iki yüzü de CFRP ile güçlendirilmiş numune IC-C1’in deney verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 5.13’te ve hasar durumu Şekil 5.14’te verilmiştir. Dolgu duvarlı referans çerçevelerde olduğu gibi bu numunede de birinci kat kolonlarında eğilme çatlakları oluşmuştur. 9 mm yerdeğiştirme adımıyla ($\delta_t/H_t = \%0.315$) itibaren dolgu duvar üzerindeki diyagonal CFRP şeritler, özellikle köşelere yakın bölgelerde duvardan ayrılmaya başlamıştır. Bu numunede, diğer numunelerden farklı olarak, üst kat dolgu duvarında da diyagonal çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. 12 mm yerdeğiştirme adımıyla ($\delta_t/H_t = \%0.419$) sıvanın parçalandığı ve CFRP’deki ayrılmanın arttığı

gözlenmiştir. Hasardaki bu önemli artışın etkileri yatay yük-tepe yerdeğiştirme çevrim eğrisinde yükte düşüş olarak görülmektedir, Şekil 5.13'te 'A'ya bakınız.



Şekil 5.12 : IL-0'ın hasar durumu.



Şekil 5.13 : IC-C1'in yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.



Şekil 5.14 : IC-C1'in hasar durumu.

18.5 mm yerdeğiştirme adımının ($\delta/H_t = \%0.647$) çekme çevriminde birinci kat kolonlarının üst ucunda kayma çatlakları oluşmuş ve bu adımda çekme etkisindeki diyagonal CFRP şeritlerin ikisi ardarda kopmuştur. Diyagonal CFRP şeritlerin koptuğu kesit, dolgu duvarın diyagonal olarak çatladığı bölgenin hemen üstüne gelmektedir. Diyagonal CFRP şeritlerin kopmasından dolayı yükteki ani düşüş, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisinde görülmektedir, Şekil 5.13'te 'B'ye bakınız. Dolgu duvarın diğer diyagonalleri üzerindeki iki CFRP şerit ise çekme gerilmeleri etkisinde kaldıkları bir sonraki yerdeğiştirme çevriminde kopmuşlardır, Şekil 5.13'te 'C'ye bakınız. Birinci kat dolgu duvar üzerindeki tüm diyagonal CFRP şeritler çekme gerilmeleri etkisinde teker teker koptuktan sonra, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri dolgu duvarsız çerçeve referans numunelerinin eğrilerine yaklaştırmışlardır, Şekil 5.13'te 'D' ve 'E'ye bakınız. Bundan sonra birinci kat kolonlarının üst ucundaki kayma çatlaklarının genişlikleri artmış ve bu bölgedeki betonda ezilme olmuş, böylece sistem göçmüştür, Şekil 5.14.

Kolon düşey donatıları bindirmeli ekli olan, her iki yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune IL-C1 iki kere denenmiştir. İlk yapılan deneyde diyagonal CFRP şeritlerin temele bağlantılarını yapan CFRP ankrajlar yetersiz olduğundan ileri yerdeğiştirme adımlarında numunenin, diğer numunelerden farklı olarak toptan göçmeye gittiği gözlenmiş ve deney sonlandırılmıştır.

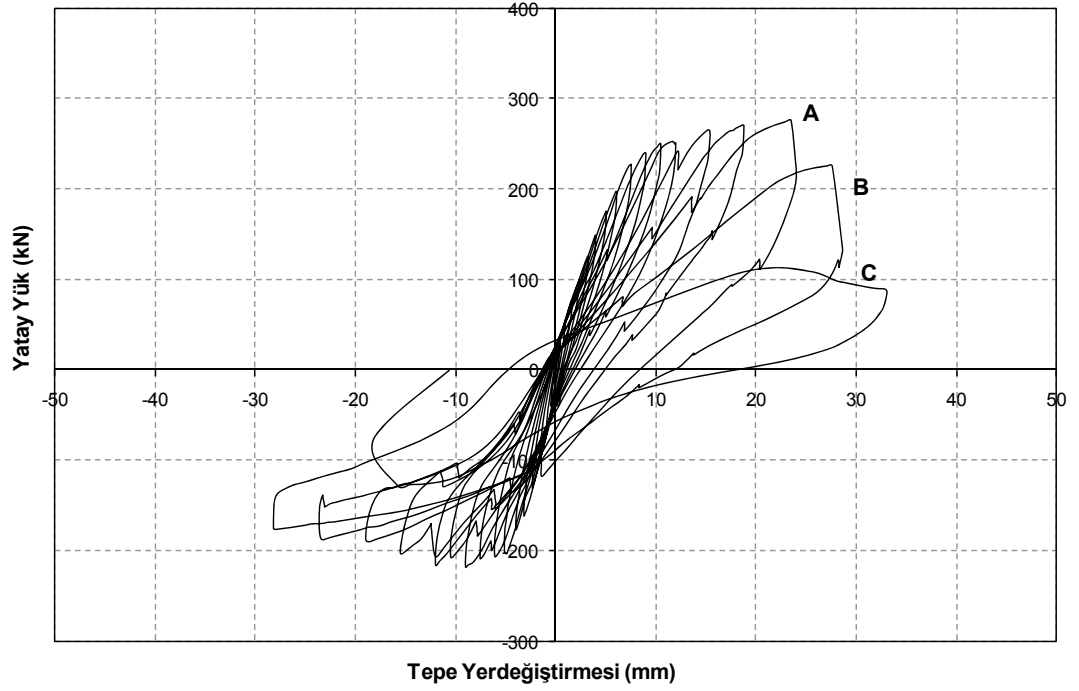
Bu ilk deneyde, küçük yerdeğiştirme adımlarından itibaren temele CFRP ankrajların olduğu bölgeler kabarmaya başlamıştır, Şekil 5.15. CFRP temel ankraj boyları yetersiz olduğundan bazıları deliklerinden çıkmış ve diyagonal CFRP-temel bağlantısı yetersiz kaldığından duvar ve kolonların temel seviyesinden tamamen ayrılmadığı gözlenmiştir. Numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde artış olmasına rağmen temelden ayrılmanın belirginleştiği adımlardan itibaren ilerleyen

yerdeğiştirme adımlarında yatay yükte artış azalmış ve sabite yakın devam etmiştir. Bunun üzerine deney durdurulmuş, CFRP ankrajların yenilenmesi ve mevcut hasarların tamir edilmesinden sonra numunenin yeniden denenmesine karar verilmiştir. Bu aşamada birinci kat dolgu duvarında birkaç çatlak oluşmasına rağmen çerçeve elemanlarında ve duvarda önemli bir hasar yoktur. IL-C1 numunesinin ikinci deneyine başlanmadan önce, birinci kat kolonlarında olmuş olan eğilme çatlaklarına epoksi enjeksiyon yapılmış, ilk kat dolgu duvarın temel seviyesindeki CFRP'nin ve duvarın hasarlı bölümleri ile temel CFRP ankrajları yenilenmiştir.



şekil 5.15 : IL-C1'in ilk deneyindeki hasar durumu.

IL-C1'in ikinci deneyi verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi şekil 5.16'da ve hasar durumu şekil 5.17'de verilmiştir. Bu deneyde numunenin hasar durumu, IC-C1'in hasar durumuna benzerdir. Diyagonal CFRP şeritler duvar üzerinden ayrılmış ve 23.5 mm yerdeğiştirme adımımda ($\delta/H_t = \%0.822$) ekme gerilmeleri etkisinde kopmuştur, şekil 5.16'da 'A' ve 'B'ye bakınız. Bundan sonra tuğlar parçalanmıştır, şekil 5.16'da 'C'ye bakınız. En son diyagonal CFRP şerit de koptuktan sonra güvenlik sebeplerinden dolayı deneye son verilmiştir.



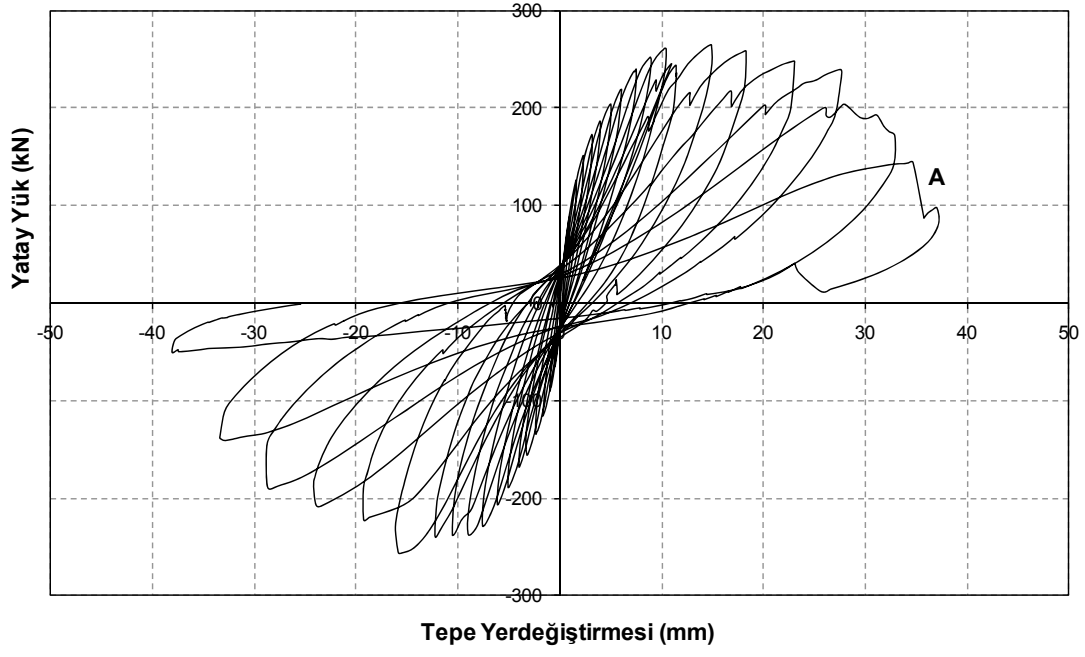
Şekil 5.16 : IL-C1'in ikinci deneyi yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.



Şekil 5.17 : IL-C1'in ikinci deneyindeki hasar durumu.

5.4.4 Numuneler IC-C2 ve IL-C2

Kolon düşey donatıları sürekli olan, bir yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune IC-C2'in deney verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 5.18'de ve hasar durumu Şekil 5.19'da verilmiştir. Bu numunede ilk hasarlar 3.20 mm yerdeğiştirme adımımda ($\delta_v/H_t = \%0.111$) gözlenmiştir. Bu adımda ilk kat dolgu duvarın sıvasında çatlaklar oluşmuştur. Dolgu duvar üzerindeki diyagonal CFRP şeritler 9.00 mm yerdeğiştirme adımımda ($\delta_v/H_t = \%0.315$) duvar üzerinden ayrılmaya başlamıştır. 10.5 mm adımımda ($\delta_v/H_t = \%0.367$) ise numunede ciddi



Şekil 5.18 : IC-C2'nin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.

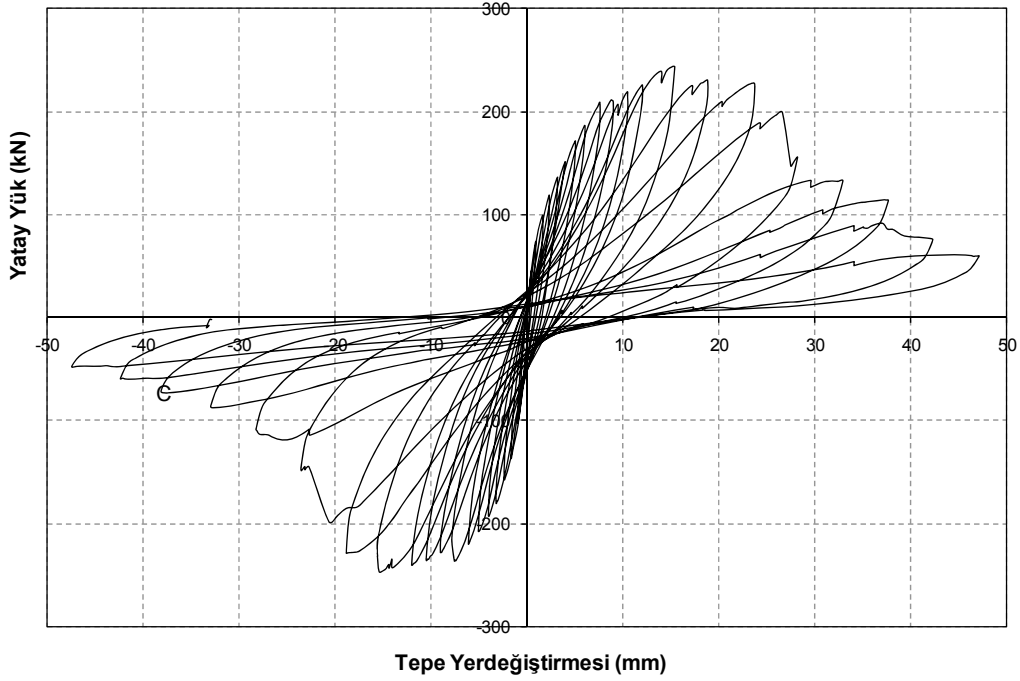


Şekil 5.19 : IC-C2'nin hasar durumu.

hasarlar olduğu gözlenmiştir. İkinci kat dolgu duvarında eğik çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar birinci kat kirişinde de devam ederek birinci kat dolgu duvarı üzerinde ilerlemiştir. Bu tip hasar daha önceki numunelerde net olarak gözlenmemiştir. Yine bu yerdeğiştirme adımı, numunenin arka yüzünde birinci kat dolgu duvarının sıvası üzerindeki CFRP ankrajların çevresi çatlamıştır. 23.50 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H_t = \%0.822$) çerçeve ve özellikle birinci kat dolgu duvarında önemli çatlaklar oluşmuş ve bazı tuğlaların ezildiği gözlenmiştir. Numunenin arka yüzünde birinci kat dolgu duvarının sıvası üzerindeki CFRP ankrajların saçakları duvar üzerinden kalkmıştır. Bu hasar CFRP ankrajların, diyagonal CFRP şeritlerin taşıdığı yükü duvarın arka yüzüne başarı ile aktardığını göstermiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında birinci kat kolonlarının üst kısmında kesme çatlakları oluşmuştur. 37.6 mm yerdeğiştirme adımının ($\delta/H_t = \%1.315$) çekmesine gidilirken diyagonal CFRP şerit kopmuştur, Şekil 5.18’de ‘A’ya bakınız. Bu yerdeğiştirme adımına devam edilirken, birinci kat kolonunun üst kısmındaki kesme çatlağı büyümüş, betonda ezilme ve kolon düşey donatılarında burkulma olmuştur. Bu hasarlar sonucunda numune göçmüştür, Şekil 5.19.

Kolon düşey donatıları bindirmeli ekli olan, bir yüzü CFRP ile güçlendirilmiş numune IL-C2’nin deney verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrisi Şekil 5.20’de ve hasar durumu Şekil 5.21’de verilmiştir. Bu numunede 9.00 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H_t = \%0.315$) birinci kat dolgu duvarı üzerindeki diyagonal CFRP şerit duvar üzerinden ayrılmıştır. İkinci kat dolgu duvarında eğik çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar birinci kat kirişi üzerinde devam ederek birinci kat dolgu duvarı üzerinde ilerlemiştir. 23.5 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H_t = \%0.822$) birinci kat kolonlarının üst kısımlarında kesme çatlakları oluşmuş, alt kısmındaki kolonu saran CFRP sargısı düşey olarak yırtılmış ve yükte düşüş meydana gelmiştir. Bir sonraki yerdeğiştirme adımı diğer birinci kat kolonun alt kısmındaki CFRP sargısında yırtılma ve yükte düşme olmuştur. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında, birinci kat dolgu duvarında önemli hasarlar olduğu gözlenmiştir. 37.6 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H_t = \%1.315$) dolgu duvarı temele bağlayan CFRP ankrajlarda sıyrılma olmuştur. 47.00 mm yerdeğiştirme adımı ($\delta/H_t = \%1.643$) birinci kat dolgu duvarı önemli ölçüde göçmüş, arka yüz dolgu duvarı üzerindeki CFRP ankrajların saçakları sıva üzerinden ayrılmış olmasına rağmen, numune yük taşımaya devam etmiştir. Buna rağmen numunenin taşıdığı yük

çok az olduğu, numunede ciddi hasarlar gözlemlendiği ve diğer numunelerde bu yerdeğiştirme adımına kadar yükleme yapılamadığı için deneyin tamamlanmasına karar verilmiştir.

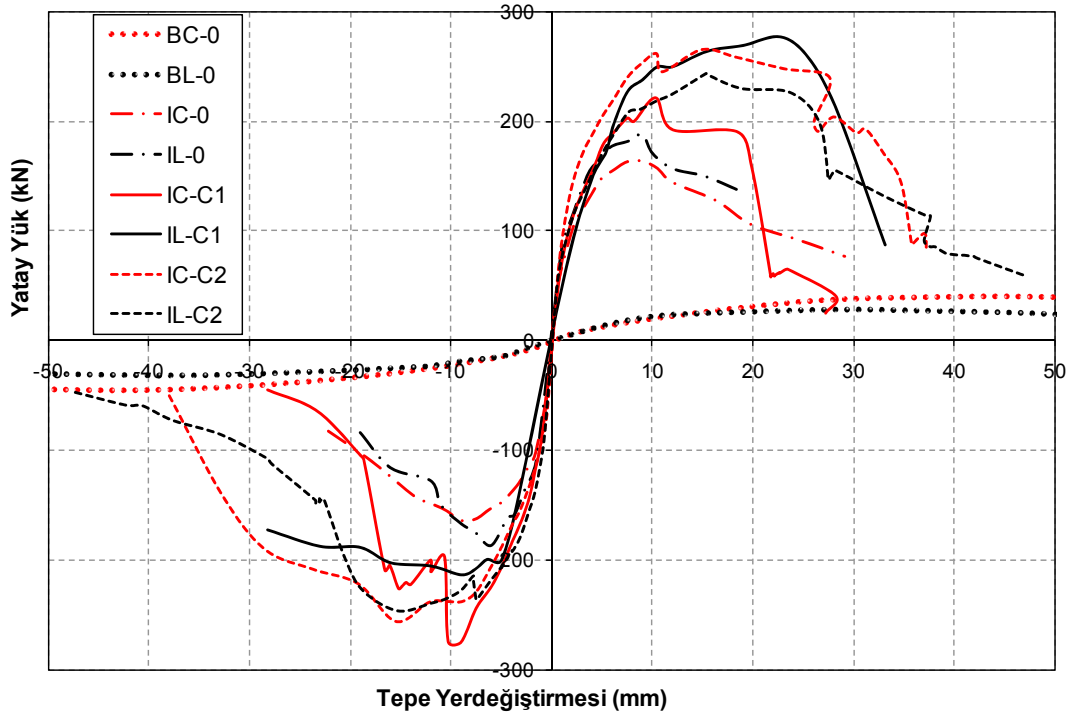


Şekil 5.20 : IL-C2'nin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri.



Şekil 5.21 : IL-C2'nin hasar durumu.

Karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile tüm iki katlı-tek açıklıklı numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 : İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi zarf eğrileri.

5.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yatay yük-tepe yatay yerdeğiştirmesi diyagramlarının yatay rijitlik ve taşıdıkları en büyük yatay yük açısından yapılan karşılaştırılmalarına ve deneysel gözlemlere dayalı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneylerinde olduğu gibi dolgu duvarlı betonarme numunelerinin yatay rijitlikleri ve en büyük yatay yük değerleri dolgu duvarsız numunelerinkinden oldukça yüksektir. Dolgu duvarlı numunelerin CFRP ile güçlendirilmesi, yatay rijitliği ve taşıdıkları en büyük yatay yük değerlerini arttırmıştır.
- Diyagonal CFRP şeritlerin çekme gerilmeleri etkisinde kopması, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrilerine yatay yükte ani düşüş olarak yansımıştır. İleri yerdeğiştirme adımlarında birinci kattaki diyagonal CFRP şeritlerin hepsi koptuğunda, yatay yük-tepe yerdeğiştirme çevrim eğrileri dolgu duvarsız numunelerin eğrilerine doğru yaklaşmıştır. Bu sonuç CFRP'nin sisteme getirdiği yatay yük taşıma kapasitesinin artışının

kopmadan sonra ortadan kalkmasına rağmen sistemin hala bir miktar yatay yük taşıyabildiğini göstermektedir.

- Kolon düşey donatısı sürekli olan ve bindirmeli ekli olan güçlendirilmemiş dolgu duvarlı referans numuneler, sırasıyla, IC-0 ve IL-0'ın başlangıç yatay rijitlikleri birbirlerine oldukça yakındır. Fakat IL-0'ın en büyük yatay yük değeri, IC-0'den yaklaşık olarak %15 daha fazladır. IL-0'ın yetersiz bindirmeli ekli olmasından dolayı bu oranın tam tersi olması beklense de, IL-0'ın beton basınç dayanımının IC-0'den büyük olduğuna dikkat edilmelidir.
- Yatay yükün numuneye kat seviyelerinde rijit bir çelik kiriş aracılığı ile etkitilmesi göçme şeklini belirleyen etken olmuştur. Böyle bir yükleme ile ikinci kat çerçeve elemanları ve dolgu duvarlarında önemli hasarlar oluşmazken, hasar meydana gelmesi açısından kritik bölgeler birinci kat kolonlarının ve dolgu duvarının üst uçları olmuştur.
- Dolgu duvarsız numunelerde hasar kolon-kiriş düğüm noktalarında ve birinci kat kolonlarının alt uçlarında yoğunlaşmıştır. Dolgu duvarlı numunelerde ise birinci kat kolonlarındaki eğilme çatlakları kolon boyunca yayılı durumdadır. Bu hasar şekilleri, dolgu duvarsız numunelerde çerçeve tipi davranış olduğu, numunelere dolgu duvar eklenmesi ile sistemin daha çok bir perde davranışına yaklaşmasına neden olduğunu göstermektedir.
- Güçlendirilmemiş dolgu duvarlı çerçevelerde, duvarda diyagonal çatlaklar olduğu gözlenmesine rağmen dolgu duvardaki asıl önemli hasar duvar köşelerinin ezilmesi olmuştur. Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrileri incelendiğinde, dolgu duvarların yatay yük taşıma kapasitelerine olan katkısının bu köşe ezilmelerinden sonra oldukça azaldığı görülmektedir.
- Tek katlı-tek açıklıklı numunelerde olduğu gibi CFRP ile güçlendirilme, dolgu duvarlarındaki köşe ezilmesini önlemiş ve duvardaki diyagonal çatlakların daha büyük bir alana yayılmasına sebep olmuştur. Deney sonunda birinci kat dolgu duvarları önemli ölçüde hasar görmüş olmasına rağmen güçlendirilmiş numunelerde de dolgu duvarlar tamamen göçmemiştir.
- Dolgu duvarın içinden geçen CFRP ankrajların etkin olarak çalıştığı, güçlendirmenin tek yüze yapıldığı numuneler IC-C2 ve IL-C2'de açıkça gözlenmiştir. Ayrıca bu numunelerde yapılan gözlemler, dolgu duvarın tek

yüzüne CFRP uygulamasında duvarın üzerindeki diyagonal CFRP şeritlerin CFRP ankrajlar ile diğer yüzdeki sıvanın üzerine bağlanmasının önemini göstermiştir.

- Çerçeve elemanlarında ve temelde yeterli derinlikte ve özenli üretilmiş CFRP ankraj elemanları göçmeye kadar oldukça iyi çalışmışlardır. Bu açıdan kolon düşey donatıları bindirmeli ekli olan güçlendirilmiş numune IL-C1'in iki deneyinin sonuçları oldukça önemlidir. Birinci deneyde uygulama derinliklerinin yetersiz olmasından dolayı temeldeki CFRP ankrajlar deney esnasında yerinden çıkmış ve kolon ile duvarların temelden tamamen ayrılması ile sistem göçmeye gitmiştir. Numune tamir edilerek ikinci kere denenmiş ve bu defa diğer güçlendirilmiş numune ile benzer davranış ve hasar durumu olduğu gözlenmiştir. Buna göre bu tür bir güçlendirmede CFRP uygulamasının, özellikle ankrajların, özenli yapılmaması sistem davranışını ve göçme şeklini değiştirebilmektedir. İlk deney sırasında her ne kadar en büyük yatay yük değeri artmışsa da, CFRP ankrajların temelle bağlantısı kesildikten sonra sistem toptan göçmeye neden olacak şekilde davranış göstermiştir.
- Güçlendirilmiş bindirmeli ekli numune IL-C1'in ikinci deneyinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi çevrim eğrilerinin itme ve çekme adımlarında simetrik değildir. Bunun en önemli sebebi ilk deneyden sonra bazı bölgelerinin tamir edilmiş olmasıdır. Bu nedenlerden dolayı bu numunenin davranışının genellenmesi ve diğer güçlendirilmiş numune ile karşılaştırılması doğru değildir.
- CFRP güçlendirmesinin dolgu duvarın tek yüzüne iki kat olarak yapıldığı numunelerde, tek yüze uygulamanın oldukça etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirmenin dolgu duvarların iki yüzüne birer kat (C1) ve tek yüzüne iki kat (C2) uygulandığı numuneler karşılaştırıldığında yatay rijitlik ve taşıdıkları en büyük yatay yük açısından önemli bir fark gözlenmemiştir.

6. TEORİK ÇALIŞMALAR

Belirli bazı numunelere dayalı olarak gerçekleştirilen ve her zaman sınırlı sayıda olabilen deneysel çalışma sonuçlarını genelleylebilmek amacıyla, deneylerle ulaşılan benzer sonuçlara teorik yoldan da yaklaşmak önemlidir. Yapı sistemlerinin bu yolla elde edilecek genel yatay yük taşıma kapasitelerinden, yapının bütünü için öngörülecek bir güvenlik katsayısıyla geriye dönülüp işletme yüklerinin tanımlanabileceği açıktır. Bu amaçlarla güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin yük-yerdeğiştirme bağıntılarına teorik yoldan da ulaşmak üzere aşağıda açıklanan yaklaşım yolları benimsenmiştir.

Öncelikle “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de verilmiş esaslardan yola çıkılarak hazırlanan yapısal modelle elde edilebilen sonuçlar üretilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçların yeterliliği, deneysel veriler ve gözlemlerden yararlanılarak, tartışılmış ve uygulama açısından irdelenmiştir.

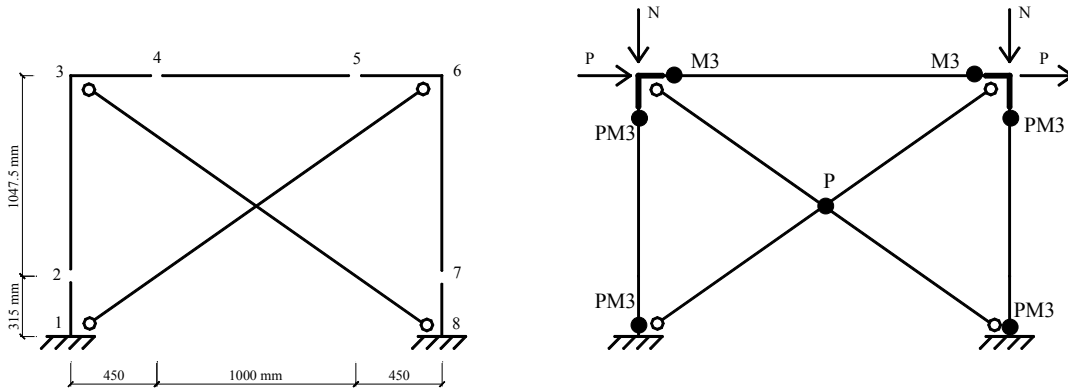
Bu çalışmanın kapsamında, CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı tuğla duvarların çok sayıdaki basit kayma deneyi sonuçları da irdelemeler aşamasında gözönünde bulundurulmuştur.

6.1 DBYBHY (2007)’e Göre Yapısal Modelleme

Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yapısal modeli ilk olarak “DBYBHY” (2007)’deki esaslara göre yapılmıştır. Bu esaslar Bölüm 2.5’te detaylı olarak açıklanmıştır. Modelin kurulması aşamasında SAP2000 v10 (2006) bilgisayar programından yararlanılmıştır. Burada amaçlanan, dolgu duvarları FRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin ilgili yönetmelikteki esaslarına göre modellenmesinde uygulamacıların karşılaşması olası zorlukları belirlemek ve kurulan modelin hesap sonuçlarını deneysel veriler ile karşılaştırılarak etkinliğini saptamaya çalışmaktır.

6.1.1 Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarsız betonarme çerçeve numunesi yapısal modeli

Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin yapısal modellerinin hazırlanması yukarıda açıklandığı gibi “DBYBHY” (2007)’te verilmiş olan modelleme esaslarına göre yapılmıştır. Öncelikle 8 düğüm noktalı ve 7 adet çubuktan oluşan çerçeve modeli oluşturulmuştur, Şekil 6.1. Betonarme kiriş ve kolonları temsil eden çubukların kesit ve donatı detaylarında numunelerin özelliklerine uyulmuştur, Şekil 4.2. Çubuk çerçeve modeli kolon alt uçlarından ankastre mesnetlenerek numunelerin laboratuvar zeminine bağlanan temelleri modellenmiştir. Numunelerin kiriş-kolon düğüm noktalarını modelde doğru ifade edebilmek amacı ile kiriş ve kolon çubuklarının birleşim bölgelerine programda bulunan “Rijit Uç Bölgeleri” atanmıştır. “Rijit Uç Bölgeleri”nin uzunlukları, kiriş ve kolonların boyutlarına göre numunede düğüm noktasının içerisinde kalan eleman parçaları kadar olacak şekilde belirlenerek rijit bölge katsayısı olarak 0.5 verilmiştir.



Şekil 6.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunenin çubuk elemanlarla kurulan yapısal modeli.

Modelde kiriş-kolon birleşim düğüm noktalarından deney boyunca numunelere yükleme kirişi yardımı ile uygulanan normal kuvvetler etkitilmiştir, Şekil 6.1. Yatay yükler ise gerçek deprem etkilerine yaklaşabilmek üzere, kirişin sağ ve sol uçlarından eşit olarak tek yönlü uygulanmıştır.

Yapısal modelin kolon ve kiriş çubuk elemanlarında, betonarme çerçeve numunelerinin deneysel olarak belirlenen donatı ve beton karakteristik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Deney günü beton basınç dayanımı olan numunelerde bu değerler, bu malzeme değeri olmayan numuneler N2 ve N3’te ise 28 günlük beton basınç dayanımı esas alınmıştır, Çizelge 3.4. Sargılı ve sargısız beton modeli olarak

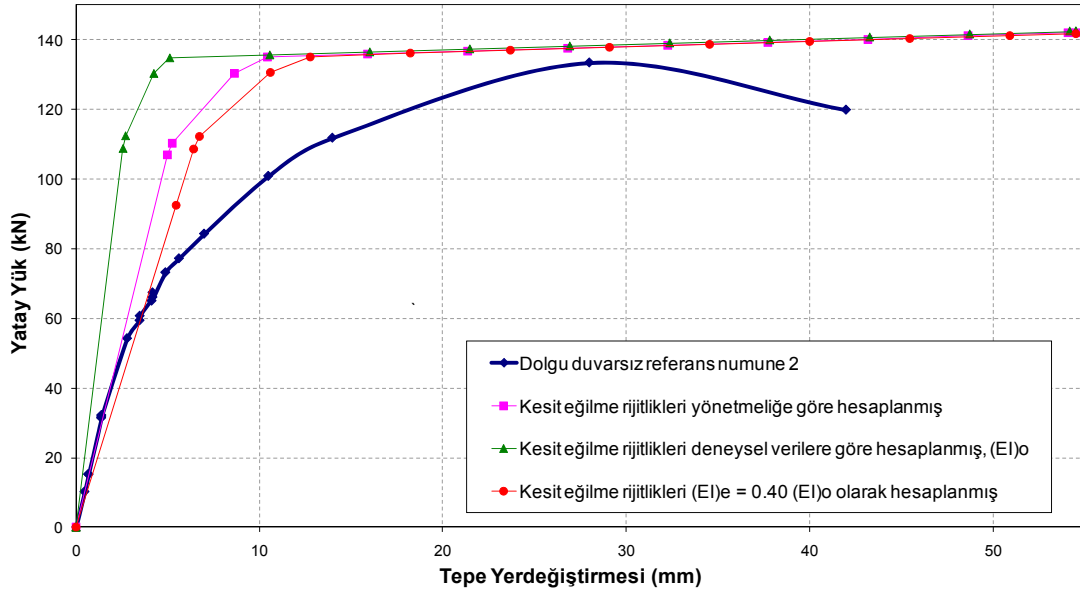
“DBYBHY” (2007)’te, yeralan Mander ve diğ. (1988) gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları kullanılmıştır. Dolgu duvarsız referans numune 2’nin deneysel olarak elde edilen beton elastisite modülü değeri, TS 500-Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Standardı (2000) ve Mander ve diğ. (1988)’de verilen denklemlere göre hesaplanmış elastisite modülü değerleri ile karşılaştırılmıştır. Mander ve diğ. (1988)’deki denklemle hesaplanan elastisite modülü değerinin deneysel elde edilen elastisite modülüne daha yakın sonuç verdiği görülmüştür. Buna göre beton elastisite modülü deneysel olarak belirlenememiş numuneler için bu denklem kullanılmıştır.

Dolgu duvarsız referans numune 2’nin ön modelinde kiriş ve kolonlarda eğilme rijitliklerinin hesaplanma yöntemine göre üç farklı çözüm yapılmıştır, Şekil 6.2. Birinci çözümde kiriş ve kolonlarda betonun deneysel elastisite modülü değeri ile kesit geometrisine bağlı hesaplanmış *çatlamamış kesit eğilme rijitlikleri* kullanılmıştır. Diğer iki çözümde ise *çatlamış kesitlerin eğilme rijitlikleri* dikkate alınmıştır. Çatlamış kesitlerin eğilme rijitliği gözönüne alınırken ilk olarak kolonlara etkiyen normal kuvvetin eğilme rijitliğine etkisi ihmal edilmiş ve kiriş ile kolonlarda etkin eğilme rijitliği çatlamamış kesitin eğilme rijitliğinin %40’ına eşit alınmıştır, $((EI)_e = 0.40(EI)_o)$. Daha sonra kiriş ve kolonların çatlamış kesit eğilme rijitlikleri, “DBYBHY” (2007)’te, 7.4.13 maddesinde tarif edildiği gibi tanımlanmıştır. Buna göre eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri, $(EI)_e$; (a) kirişlerde çatlamamış kesitlerin eğilme rijitliklerinin %40 olarak $((EI)_e = 0.40(EI)_o)$, (b) kolonlarda ise eksenel basınç kuvveti (N_D) değerine göre aşağıda verilen denklemlerle hesaplanan değer ile tanımlanmıştır.

$$\frac{N_D}{(A_c f_{cm})} \leq 0.10 \text{ olması durumunda } (EI)_e = 0.40 (EI)_o \quad (6.1a)$$

$$\frac{N_D}{(A_c f_{cm})} \geq 0.40 \text{ olması durumunda } (EI)_e = 0.80 (EI)_o \quad (6.1b)$$

Burada A_c kolon brüt kesit alanını, f_{cm} mevcut beton dayanımını göstermektedir.



Şekil 6.2 : Dolgu duvarsız referans numune 2'nin farklı eğilme rijitlikleri kullanılarak kurulmuş yapısal modellerinin analitik sonuçları.

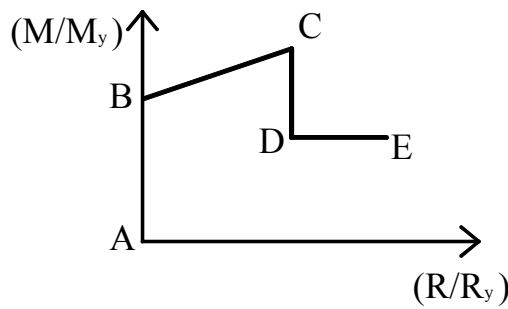
Etkin eğilme rijitliklerinin yatay yükler uygulanmadan önce, sistemde var olan kolon aksenal basınç kuvvetlerine göre hesaplanıp modelde yeralması dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Sisteme yatay yükler etkidiğinde kolonlardaki aksenal basınç kuvvetleri yatay yükleme yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak, bir kolonda basınç diğer kolonda çekme olacak şekilde değişecek ve eğilme rijitliklerinin hesaplandığı ilk durum geçerli olmayacaktır. Dolayısıyla kesitlerdeki eğilme rijitliklerinin her yükleme adımındaki değişimi yeterince iyi ifade edilememektedir.

Dolgu duvarsız referans numune 2'nin ön modelinde kiriş ve kolonlarda farklı eğilme rijitlikleri tanımlamalarına göre yapılan çözümler beraber değerlendirilmiştir, Şekil 6.2. Hem gerçek davranışın daha iyi ifade edilmesiyle elde edilmiş analitik sonucun deneysel eğri ile daha uyumlu olması, hem de “DBYBHY” (2007)'deki model tarifine tam olarak uyulması açısından bundan sonraki betonarme çerçeve modelin kesitlerinde eğilme rijitliği yönetmeliğin 7.4.13 maddesinde tarif edildiği şekilde kullanılmıştır.

Numune üzerinde gözlenmiş olan kalıcı şekildeğiştirmelerin yakından izlenmesi ile sağlanan yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinin seçilmiş noktaları için çözümler yapılmıştır. Bahsedilen yaklaşımda kolonun küçük parçaları üzerindeki etkin eğilme rijitlikleri, çatlak derinliğine bağlı olmak üzere ayrı ayrı saptanmıştır. Bu özellikleri plastik mafsallık hipotezi ile aktarma şansı bulunmamaktadır. SAP2000 v10 (2006) programıyla elde edilen itme eğrisi ile bu şekilde yapılan çözümden elde edilen yük-

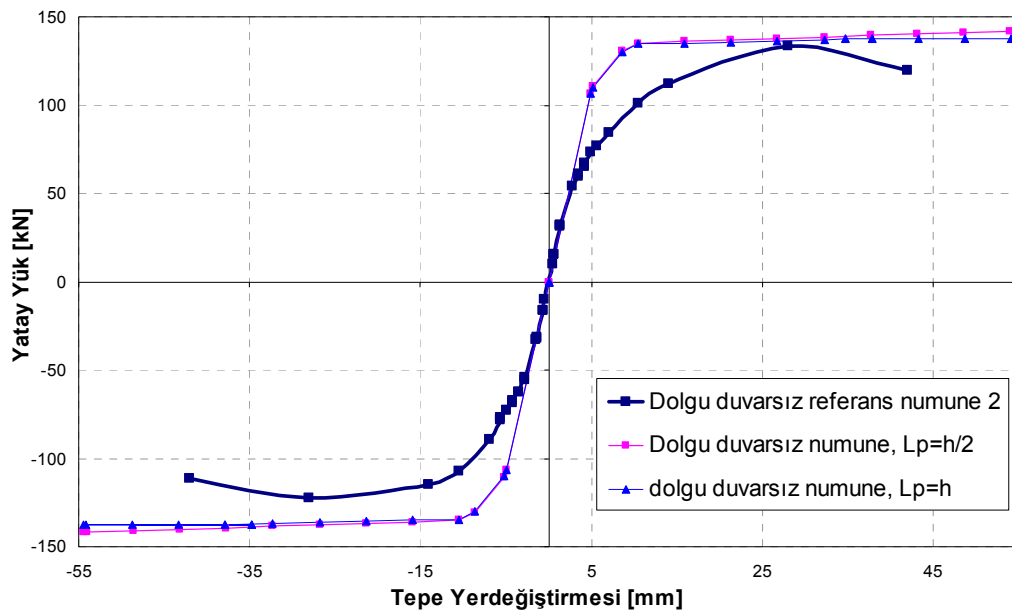
yerdeğiştirme eğrisi arasındaki fark, eğrinin kalıcı şekildeğiştirmelerin yayılı olduğu bölgede de önemli değişiklikler gösterebilmesidir. Nitekim bu bölge içerisinde kalıcı şekildeğiştirmelerin büyüklüğüne göre çatlamış kesite ait eğilme rijitliği (EI) değerlerinin, $(EI)_0$ 'ın %6'sına kadar indiği gözlenmektedir. Çatlamış kesitlerde etkin atalet momenti hesaplanırken kesitin çatlamamış bölümü ile kesitin tüm donatıları gözönünde bulundurulmuştur.

Yapısal modelin doğrusal elastik olmayan çözümünde, çubuk elemanların malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışını modellemek için plastik mafsallara hipotezi (yığılı plastik davranış modeli) esas alınmıştır. Çubuk uç bölgelerinde rijit uç bölgelerinin bitimine plastik mafsallar atanmıştır. Plastik mafsalların davranış özellikleri betonarme kesitlerin hesaplanan moment-eğrilik ilişkileri ile belirlenmiştir, şekil 6.3. Bu şekilde M_y kesitin akma eğilme momenti değerini, R_y ise kesitin M_y 'ye karşı gelen dönme değerini göstermektedir. Kirişlerde sadece eğilme momenti etkisine göre eğilme momenti ($M3$) plastik mafsalları, kolonlarda ise normal kuvvet ve eğilme momentinin birlikte etkimesi halinde karşılıklı etkinin ve yükleme sırasında çubuktaki normal kuvvet değişiminin de dikkate alınabildiği eksenel yük-eğilme momenti ($P-M3$) plastik mafsalları tanımlanmıştır. Yapılan ön hesaplarda, artan yükleme adımlarında kirişin sol ucunda plastik mafsalları oluştuğunu göstermiştir, ama bu tür bir plastik mafsallaşma deney numunelerinde gözlenmemiştir. Yatay yüklemeyi yapmak amacı ile kirişin iki yüzüne sabitlenen çelik yükleme kirişinin rijitliği nedeniyle teorik ve deneysel sonuçlar arasında böyle bir fark olabileceği düşünölmüştür, şekil 4.8. Modelde kirişin sol ucundaki plastik mafsalları akma momenti değerinin arttırılarak modifiye edilmesi ile teorik ve deneysel sonuçların birbirine uygun olması sağlanmıştır.



şekil 6.3 : Yapısal modelde kullanılan plastik mafsalların davranış modeli örneği.

“DBYBHY” (2007)’de, plastik mafsal boyu (L_p) olarak adlandırılan plastik şekildeğiştirme bölgesi uzunluğu, çalışan doğrultudaki kesit boyunun (h) yarısı alınması önerilmiştir, ($L_p = 0.5h$). Deneysel gözlemler plastik mafsal boyunun çalışan doğrultudaki kesit boyu (h) kadar alınmasının daha doğru olduğunu göstermiştir. Her iki durum için de model çözülmüş ve iki çözüm arasında büyük bir fark olmadığı, ama deneysel gözleme göre seçilen plastik mafsal boyunun deneysel eğriye daha yakın sonuç verdiği görülmüştür, Şekil 6.4. Çalışmanın bu bölümünde yönetmelikte tarif edilen modelin etkinliği araştırıldığından, bu bölümde yeralan yapısal modellerde plastik mafsal boyu yönetmelikte önerildiği gibi alınmıştır.



Şekil 6.4 : Dolgu duvarsız referans numune 2’nin deneysel yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisinin, farklı plastik mafsal boyları (L_p) ile hazırlanmış yapısal modellerin analitik sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Betonarme çerçeve modelinin doğrusal elastik olmayan hesabında, öncelikle kolon normal yükleri için doğrusal olmayan statik çözüm yapılmış, sonra bu yükleme durumunun sonuçları başlangıç koşulları olarak alınarak yatay yükler etkisinde artımsal itme analizi yapılmıştır. Artımsal itme analizinde plastik mafsallaşma olduğunda sistemin boşaltma ve yeniden yüklemesi için yük-yerdeğiştirme eğrilerinde negatif eğriliklerin bulunması durumunda da geçerli olan başlangıç kirişi yöntemi kullanılarak yeniden yükleme yöntemi seçilmiştir.

Numunelerin artımsal itme analizinde elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç rijitlikleri ve en büyük yatay yük değerleri, karşılaştırılmak amacıyla deneysel verileri ile aynı çizelgede verilmiştir, Çizelge 6.1.

Çizelge 6.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri sonuçları ve artımsal itme analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Deneysel Sonuçlar								“DBYBHY” (2007)’deki esaslara göre yapılan artımsal itme analizi sonuçları		Karşılaştırma			
	P_{max}^{+} (kN)	P_{max} (kN)	Δ_{max}^{+} (mm) (δH)	Δ_{max} (mm) (δH)	K_{int}^{+} (kN/mm)	K_{int}^{-} (kN/mm)	P_{max}^a (kN)	K_{int}^a (kN/mm)	$\frac{P_{max}^a}{P_{max}^{+}}$	$\frac{P_{max}^a}{P_{max}^{-}}$	$\frac{K_{int}^a}{K_{int}^{+}}$	$\frac{K_{int}^a}{K_{int}^{-}}$		
Dolgu Duvarsız Numune 2	133.43	122.55	27.99 %2	27.99 %2	23.59	22.78	141.99	21.45	1.06	1.16	0.91	0.94		
Dolgu Duvarlı Numune N1	130.93	228.75	5.69 %0.4	4.83 %0.35	87.39	84.22	154.67	36.02	1.18	0.68	0.41	0.43		
Numune N2	330.10	311.91	4.90 %0.35	7.07 %0.5	228.25	227.96	163.34	33.99	0.49	0.52	0.15	0.15		
Numune N3	239.69	278.11	7.05 %0.5	10.67 %0.75	181.53	209.48	166.70	35.68	0.69	0.59	0.19	0.17		
Numune N4	225.25	217.31	5.31 %0.4	15.64 %1	154.34	122.59	193.55	37.72	0.86	0.89	0.24	0.31		

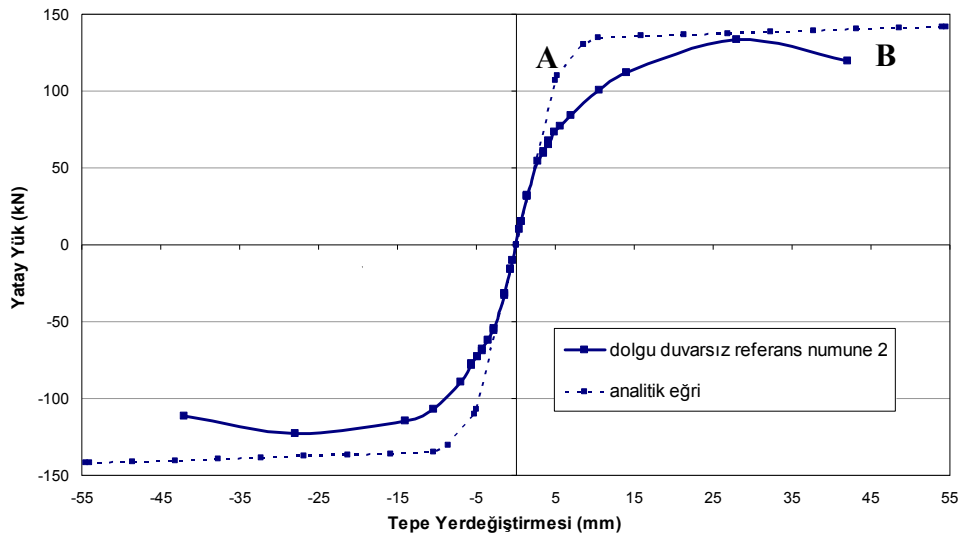
P_{max}^{+}, P_{max} : Sırasıyla, itme ve çekme adımlarında taşınan en büyük yatay yük, $\Delta_{max}^{+}, \Delta_{max}$: Sırasıyla, P_{max}^{+}, P_{max} ’a karşı gelen yerdeğiştirme değerleri, δH : Göreli kat öteleme oranı, K_{int}^{+}, K_{int}^{-} : Sırasıyla, itme ve çekme adımlarındaki başlangıç rijitliği değerleri, P_{max}^a : Modelin artımsal itme analizi ile hesaplanan en büyük yatay yük değeri, K_{int}^a : Modelin artımsal itme analizi ile hesaplanan başlangıç rijitliği değeri.

6.1.2 Dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı referans numunelerin modelleri ve analitik sonuçları

6.1.2.1 Dolgu duvarsız referans numune 2

Dolgu duvarsız referans numune 2'nin yukarıda detayları açıklandığı gibi kurulan yapısal modelinin artımsal itme analizinden ve deneysel verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri karşılaştırmak amacı ile birlikte gösterilmiştir, Şekil 6.5. Şekil 6.5 ve Çizelge 6.1 değeriendirildiğinde, modelin en büyük yatay yükünün, deneysel en büyük yatay yüke yakın olduğu görölmektedir. Deneysel eğrinin ve analitik eğrinin başlangıç rijitlikleri de yakın değerielerdir. Plastik masfal hipotezi kullanarak kurulan modelin artımsal itme analizi, numunenin adım adım hasar görerek her adımda rijitliğinin değeriştiği bölgeleri iyi bir şekilde ifade edememektedir, Şekil 6.5'te A'ya bakınız. Aynı şekilde numunenin en büyük yatay yüke gelmesinden sonra sistemde görölen yük azalması ile artımsal yük analizinin sonuçları arasında farklar bulunmaktadır, Şekil 6.5'te B'ye bakınız.

Dolgu duvarsız numune 2'nin deneysel gözlemlerine göre numune göçmeye geldiğinde kolon uç bölgelerinde beton ezilmesi ve dökölmesi, düşey donatılarda plastik şekildeğiştirme görölmüştür. Artımsal itme analizi sonuçlarında da buna uygun hasarlar gözlenmiş ve sistemde her iki kolonun uç bölgelerinde plastik mafsallar oluşmuştur. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması, modelin dolgu duvarsız numuneyi yeterince yakın temsil edebildiğini göstermiştir.

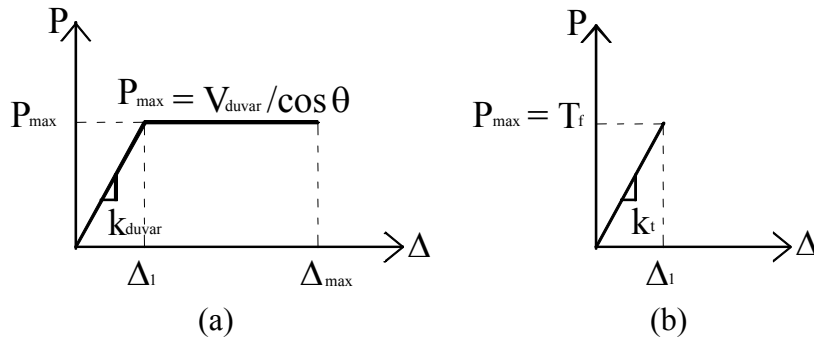


Şekil 6.5 : Dolgu duvarsız numune 2'nin deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

6.1.2.2 Dolgu duvarlı numune N1

Dolgu duvarlı numune N1'in yapısal modelinin kurulması için öncelikle dolgu duvarsız referans numunede açıklandığı gibi çerçeve elemanları modellenmiştir. Bu bölümde anlatılan modelde dolgu duvar özellikleri belirlenirken “DBYBHY” (2007)'ye uyulmuştur. Buna göre dolgu duvar, iki ucu mafsallı köşegen eşdeğer basınç çubuğu ile modellenmiştir. Dolgu duvar malzeme özellikleri olarak ilgili yönetmelikte verilen boşluklu fabrika tuğlası malzeme özellikleri alınmıştır. Duvar elastisite modülü (E_{duvar}) 1000 MPa, duvar basınç dayanımı (f_{duvar}) 1.0 MPa ve duvar kesme dayanımı (τ_{duvar}) 0.15 MPa olarak kullanılmıştır.

Eşdeğer basınç çubuğu itme analizinde elasto-plastik pekleşmesiz bir eleman olarak modellenmiştir, Şekil 6.6a. Bunun için eşdeğer basınç çubuğuna bir adet eksenel yük (P) mafsalı atanmış ve dolgu duvar malzeme özellikleri ile aşağıda açıklandığı gibi hesaplanan değerlerle eksenel yük mafsalının gerekli büyüklükleri verilmiştir.



Şekil 6.6 : İtme analizinde yapı modelinde, köşegen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları olarak idealleştirilmiş güçlendirilmiş dolgu duvarın elasto-plastik davranışı.

Eşdeğer basınç çubuğunun boyutları, eksenel rijitliği ve eksenel akma dayanımı Bölüm 2.5.1'de açıklandığı gibi yapılmıştır. Buna göre eşdeğer basınç çubuğunun genişliği,

$$a_{duvar} = 0.175 (\lambda_{duvar} h_k)^{-0.4} r_{duvar} \quad (6.2)$$

ve

$$\lambda_{duvar} = \left[\frac{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}{4E_c I_k h_{duvar}} \right]^{1/4} \quad (6.3)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada h_k kolon boyu, r_{duvar} dolgu duvar köşegen uzunluğu, E_{duvar} dolgu duvar elastisite modülü, E_c çerçeve betonu elastisite modülü, t_{duvar} ve h_{duvar} güçlendirilmiş duvarın kalınlığı ve yüksekliği, I_k kolonun atalet momenti ve θ köşegenin yatay ile olan açısıdır. Dolgu duvar kalınlığı t_{duvar} olarak tuğla kalınlığı ve iki yüzdeki sıva tabakalarının kalınlıklarının toplamı olarak alınmıştır.

Köşegen basınç çubuk elemanının eksenel rijitliği (k_{duvar});

$$k_{duvar} = \frac{a_{duvar} t_{duvar} E_{duvar}}{r_{duvar}} \quad (6.4)$$

ile hesaplanmıştır. Kesme dayanımı; köşegen çubuğun eşdeğer basınç kuvveti dayanımının yatay bileşeni olarak kabul edilmiştir. Yatay kesit alanı A_{duvar} olan güçlendirilmiş dolgu duvarının kesme kuvveti dayanımı (V_{duvar});

$$V_{duvar} = A_{duvar} \tau_{duvar} \quad (6.5)$$

ile hesaplanmıştır. Buna göre eşdeğer basınç çubuğunun eksenel akma dayanımı (P_{max});

$$P_{max} = V_{duvar} / \cos \theta \quad (6.6)$$

olmaktadır. Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel akma yerdeğiştirmesi (Δ_I);

$$\Delta_I = P_{max} / k_{duvar} \quad (6.7)$$

olarak hesaplanmıştır.

Eşdeğer basınç çubuğunun yapacağı en büyük eksenel yerdeğiştirme Δ_{max} 'ın hesabı için “DBYBH” (2007)’de bir değer önerilmemiş olduğundan farklı yaklaşımlar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öncelikle “DBYBH” (2007), Çizelge 7.5’te verilmiş olan güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları dikkate alınmıştır. Çizelge 7.5’e göre güçlendirilmiş dolgu duvarda görelî kat ötelemesi oranı (δ/H), minimum hasar sınırı (MN) için 0.0015 ve güvenlik sınırı (GV) için 0.0035’tir. Buna göre eşdeğer basınç çubuğunun Δ_{max} ’ın ilk değeri güvenlik sınırı (GV) görelî kat ötelemesi oranına göre hesaplanmıştır.

Diğer bir değerlendirme için FEMA 356 (2000)'da dolgu duvarların doğrusal olmayan hesabında kullanılması önerilen yük-yerdeğiştirme sınırlarından, (Çizelge 7-9), yararlanılmıştır. Sözü edilen çizelgede, betonarme çerçevenin yatay yük dayanımının dolgu duvar yatay yük dayanımına oranına, (β) , ve dolgu duvarın genişlik/en (L_{duvar}/h_{duvar}) oranına bağlı olarak eşdeğer basınç çubuğu için en büyük kısılma (d) ve güvenlik sınırını (LS) belirleyen kısılma değerleri önerilmiştir. Bu değerler görelî kat ötelemesi oranı cinsinden verilmiştir. Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri için çizelgeden okunan değerler, $(\beta = 3.46-2.91$ ve $L_{duvar}/h_{duvar} = 1.42$ olmak üzere), $d = \%1.07$ ve $LS = \%0.8$ olmaktadır. Belirlenen bu değerler için de iki ayrı çözüm yapılmıştır. İlgili çizelgede en elverişsiz değerler, $\beta < 0.7$ ve $L_{duvar}/h_{duvar} = 2$ koşulu için önerilen $d = \% 0.3$ ve $LS = \%0.2$ 'dir.

Başka bir seçenek olarak deneysel veriler ve gözlemler yardımıyla bir Δ_{max} değeri hesaplanmıştır. Dolgu duvarlı numune N1'de en büyük yatay yüke ulaşılan ve deney fotoğrafları incelendiğinde dolgu duvar köşe kırılmasının gerçekleştiği gözlenen görelî kat ötelemesi oranı (δ/H) $\%0.4$ 'tir. Güçlendirilmiş dolgu duvarlı numuneler için ise numunelerin hasar durumlarının değerlendirildiği Çizelge 4.3'ten yararlanılmıştır, (Bknz. Bölüm 4.4.8). Güçlendirilmiş numunelerin en büyük yatay yüke ulaştığı ve dolgu duvarların bundan sonra gözle görülür şekilde ağır hasara uğradığı görelî kat ötelemesi oranı olan $\%0.5$, Δ_{max} değerinin hesaplanması için sınır değer olarak seçilmiştir.

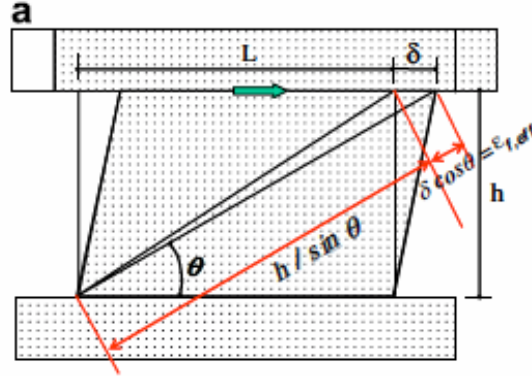
Seçilen görelî kat ötelemesi sınırlarına göre eşdeğer basınç çubuğunun yapacağı en büyük kısılma (Δ_{max}) değerleri, Binici ve diğ. (2007)'de yapılan varsayım gözönüne alınarak;

$$\Delta_{max} = \delta \cdot \cos \theta \quad (6.8)$$

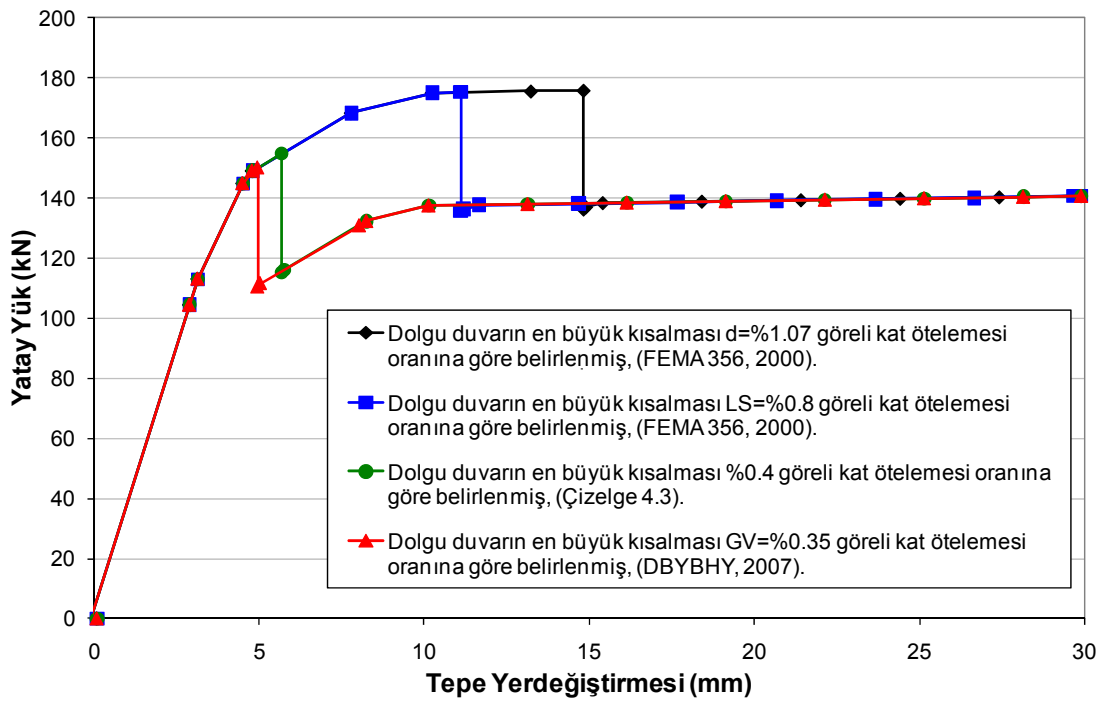
olarak hesaplanmıştır, Şekil 6.7. Burada δ görelî kat ötelemesi değeridir.

Farklı görelî kat ötelemesi oranı sınırlarına göre belirlenen Δ_{max} değerleri ile elde edilen analitik eğriler bir diyagram üzerinde gösterilmiştir, Şekil 6.8. Görüldüğü gibi modelde basınç çubuğu için verilen Δ_{max} sınırının, en büyük yatay yükü ve basınç çubuğunun devreden çıktığı yerdeğiştirme adımını değiştirdiği için dikkatli seçilmesi önemlidir. Buna göre Δ_{max} 'ın deneysel verilerle uyumlu olarak belirlenmesi daha uygun görülmektedir. Dolgu duvarlı numune N1 için $\%0.4$ ve güçlendirilmiş dolgu

duvarlı numuneler için %0.5 görelî kat ötelemesi oranları Δ_{max} 'ın hesabı için sınır değerler olarak seçilmiştir. Δ_{max} 'ın belli bir değerinden sonra sistemin en büyük yatay yükünün çok fazla değişmediğine de dikkat edilmelidir.



Şekil 6.7 : Basit kayma etkisindeki dolgu duvarın şekil değişimi, (Binici ve diğ., 2007).



Şekil 6.8 : Dolgu duvar eşdeğer basınç çubuğunda en büyük kışalmanın farklı görelî kat ötelemesi oranlarına göre belirlendiği Numune N1'in analitik eğrileri.

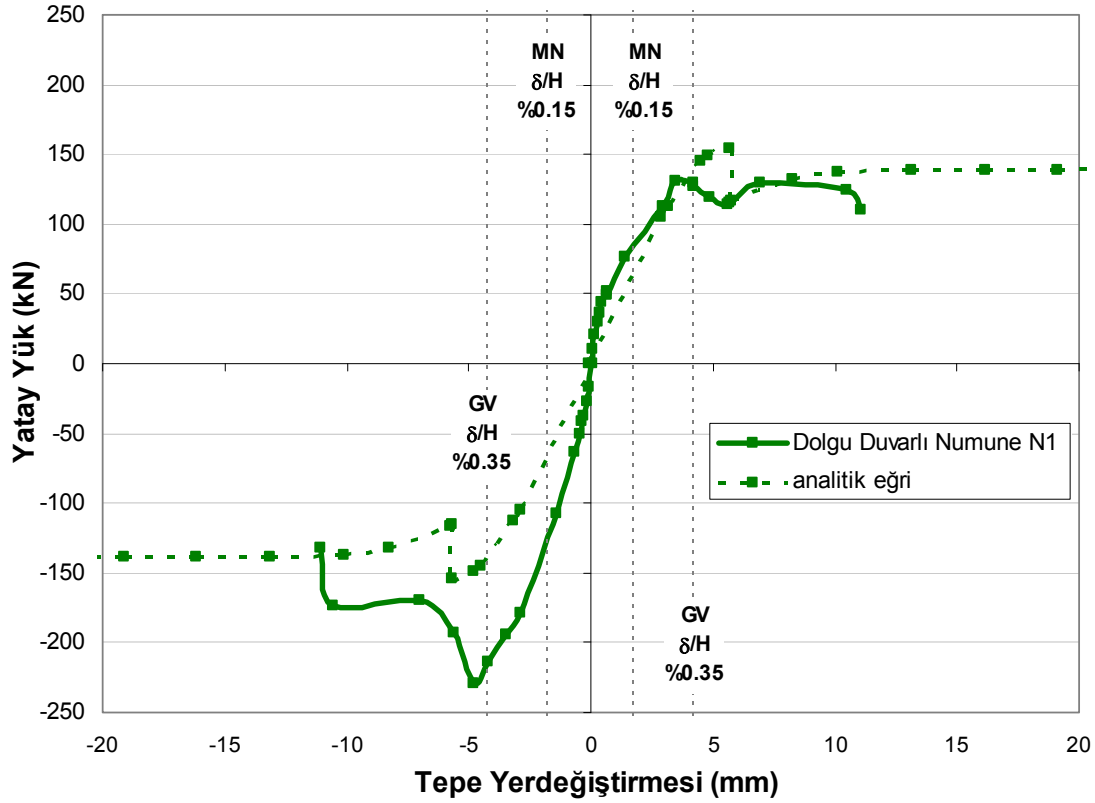
Dolgu duvarlı numunelerin verilen denklemlere göre hesaplanmış olan eşdeğer basınç ve çekme çubuğu değerleri toplu halde Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Dolgu duvarlı referans numune N1'in artımsal itme analizinden ve numunenin deneysel verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri, karşılaştırmak amacıyla, birlikte gösterilmiş (Şekil 6.9) ve karşılaştırmalı değerler

Çizelge 6.2 : Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri yapısal modellerinin eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının “DBYBHY” (2007)’ye göre hesaplanan değerleri.

Numune Adı	Eşdeğer basınç çubuğu							Eşdeğer çekme çubuğu				
	a_{duvar} (mm)	k_{duvar} (kN/mm)	P_{max} (kN)	Δ_1 (mm)	ε_1 (%)	Δ_{max} (mm)	ε_{max} (%)	w_f (mm)	k_t (kN/mm)	T_f (kN)	$\Delta_1 = \Delta_{max}^f$ (mm)	ε_{max}^f (%)
Dolgu Duvarlı Numune N1	269.53	20.08	48.38	2.41	0.12	5.45	0.26	-	-	-	-	-
Numune N2	264.71	19.72	48.38	2.45	0.12	6.81	0.33	264.71	6.49	40.55	6.24	0.30
Numune N3	266.93	19.88	48.38	2.43	0.12	6.81	0.33	266.93	6.55	40.89	6.24	0.30
Numune N4	270.29	20.13	48.38	2.40	0.12	6.81	0.33	270.29	6.63	41.40	6.24	0.30
Kısaltmalar: <i>Eşdeğer basınç çubuğunun;</i> a_{duvar}: genişliği, k_{duvar}: eksenel rijitliği, P_{max}: eksenel akma dayanımı, Δ_1: akma yerdeğiştirme, ε_1: akma şekildeğiştirme, Δ_{max}: en büyük yerdeğiştirme değeri, ε_{max}: en büyük şekildeğiştirme değeri. <i>Eşdeğer çekme çubuğunun;</i> w_f: genişliği, k_t: eksenel rijitliği, T_f: çekme dayanımı, Δ_{max}^f: en büyük yerdeğiştirme değeri, ε_{max}^f: en büyük şekildeğiştirme değeri.												

Çizelge 6.1’de verilmiştir. Buna göre modelin en büyük yatay yükünün deneysel eğrinin en büyük yatay yüküne yakın olduğu gözlenirse de deneysel eğrinin ve modelin eğrisinin başlangıç rijitliklerinin birbirlerine yakın olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.9 : Dolgu duvarlı numune N1’in deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

6.1.3 Güçlendirilmiş numunelerin modelleri ve analitik sonuçları

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar yapı modelinde, “DBYBHY” (2007)’de tarif edildiği gibi köşegen basınç ve çekme çubukları çifti ile temsil edilmişlerdir. Güçlendirilmiş numunelerin yapısal modelinin kurulmasında öncelikle çerçeve elemanları ve dolgu duvarı temsil eden eşdeğer basınç çubuğu yukarıda detayları verildiği gibi modellenmiştir.

Bölüm 6.1.2’de açıklandığı gibi güçlendirilmiş numunelerin eşdeğer basınç çubuğuunda en büyük kısalma sınırı (Δ_{max}) için %0.5 görelî kat ötelemesi oranına karşı gelen değeri seçilmiştir. Çekme çubuğuğunun çekme dayanımı (T_f) ;

$$T_f = 0.003.E_f.w_f.t_f \quad (6.9)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada E_f lifli polimer şeritin elastisite modülünü, w_f genişliğini, t_f ise kalınlığını ifade etmektedir. İlgili yönetmelikte w_f değerinin a_{duvar} 'dan daha büyük alınamayacağı belirtilmiştir. Buna göre numunelerde kullanılan diyagonal CFRP şeritler 300 mm genişliğinde olmasına rağmen modelde çekme çubuğu genişliği a_{duvar} değerine eşit alınmıştır. Çekme çubuğunun eksenel rijitliği (k_t);

$$k_t = \frac{w_f t_f E_f}{r_{duvar}} \quad (6.10)$$

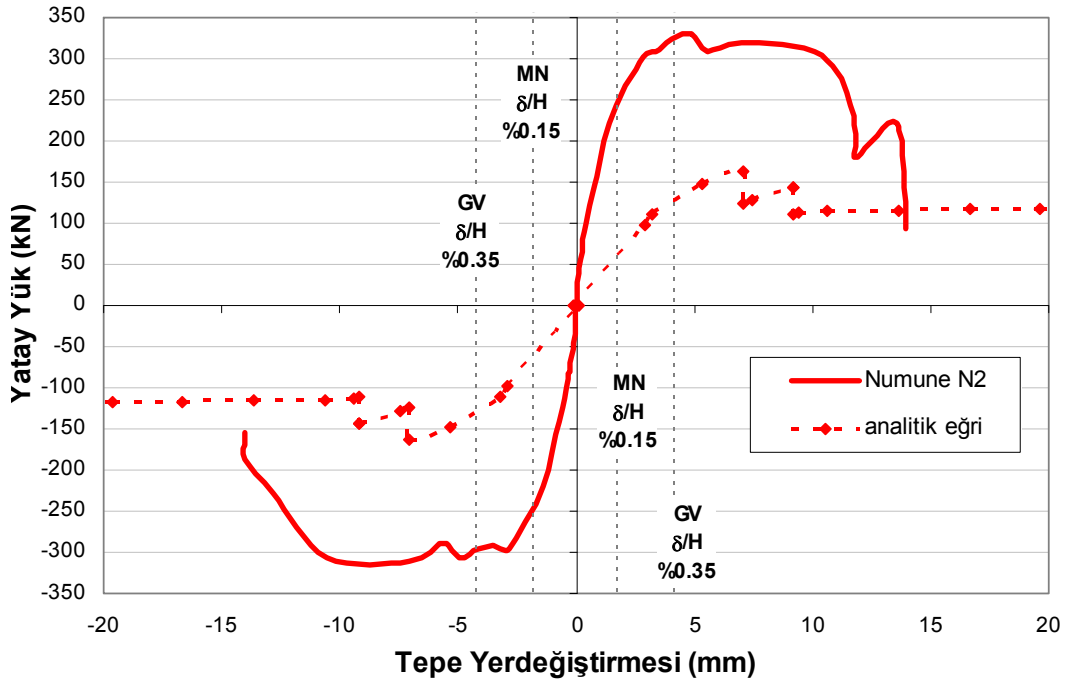
olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer çekme çubuğuna bir adet eksenel yük (P) mafsalı atanmış ve hesaplanan çekme dayanımı (T_f) ile eksenel rijitlik (k_t) kullanılarak eksenel yük (P) mafsalının özellikleri verilmiştir. FRP malzeme özellikleri nedeniyle eşdeğer çekme çubuğunun doğrusal elastik davrandığı kabul edilmiştir, (ACI 440, 2001 ve FIB Bulletin 14, 2001). Eşdeğer çekme çubuğunun yapacağı en büyük kısalma (Δ_{max}^f);

$$\Delta_{max}^f = T_f / k_t \quad (6.11)$$

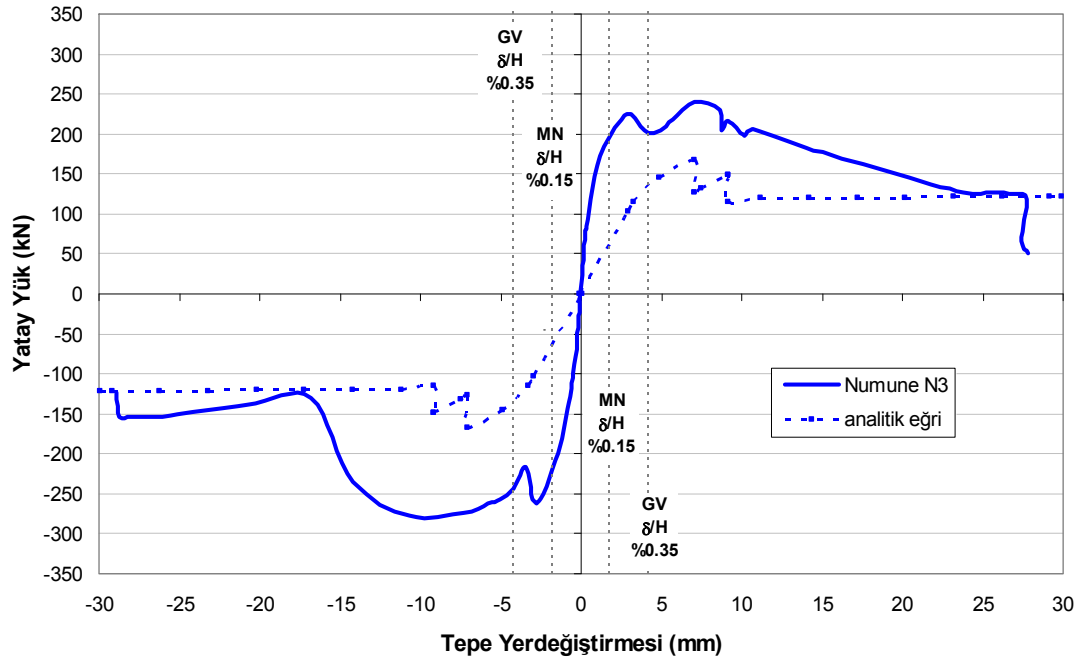
olarak hesaplanmıştır. Bu değer eşdeğer çekme çubuğunun %0.3 şekildeğiştirmesine karşı gelmektedir.

Güçlendirilmiş dolgu duvarlı numuneler N2, N3 ve N4'ün artımsal itme analizinden ve deneysel verilerinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri karşılaştırmak amacı ile Şekil 6.10-12'de birlikte gösterilmiş ve karşılaştırmalı değerler Çizelge 6.1'de verilmiştir.

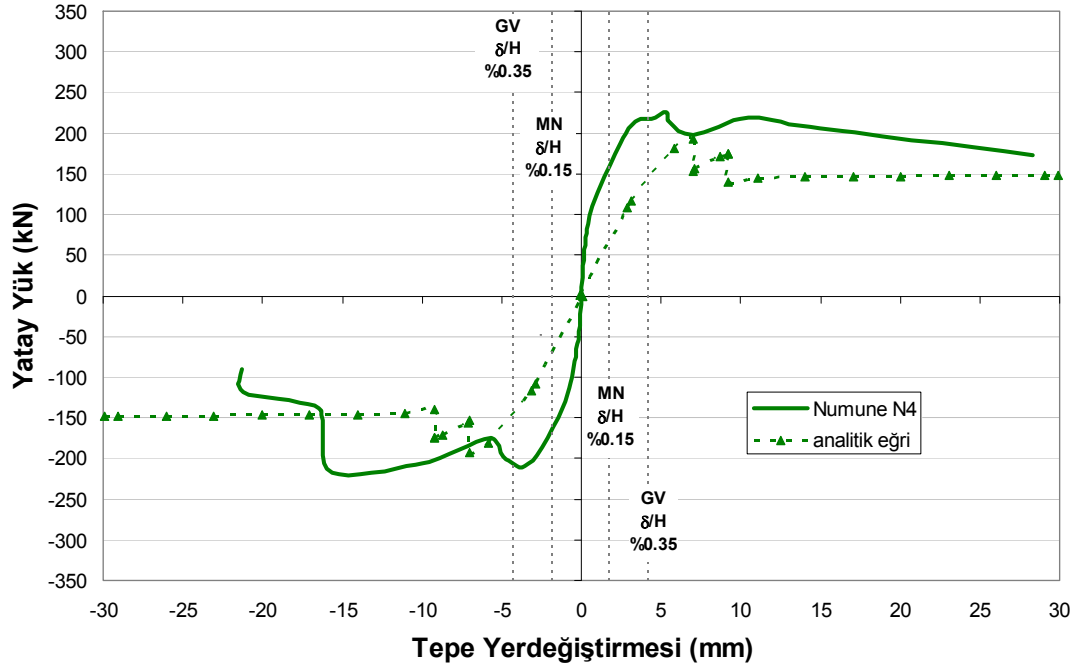
Bu değerler karşılaştırıldığında, yapısal modelin güçlendirilmiş numunelerin en büyük yatay yük ve başlangıç rijitliği değerlerine yeteri kadar yakın sonuçlar vermediği görülmektedir. Numune N4'ün deney verilerinin analitik sonuçlara, diğer numunelere göre, daha yakın olduğu görülmektedir. Bu durum değerlendirilirken, Numune N4'te diyagonal CFRP şeritlerin dolgu duvar üzerine yapıştırılmadığına dikkat edilmelidir. Böylece çekmeye etkisindeki epoksiye doyurulmamış ve dolgu duvar ile etkileşim içinde olmayan CFRP şeritler ve basınç etkisindeki davranışına CFRP'nin katılımı olmayan dolgu duvar, yapısal modelde kabul edilen davranışlara daha yakın olmaktadır.



şekil 6.10 : Güçlendirilmiş numune N2'nin deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.



şekil 6.11 : Güçlendirilmiş numune N3'ün deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.



Şekil 6.12 : Güçlendirilmiş numune N4’ün deneysel ve analitik olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrileri.

6.1.4 Analitik sonuçların değerlendirilmesi

“DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara göre kurulan yapısal modelin değerlendirilmesi için dolgu duvarı temsil eden eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının davranışını belirleyen hesap adımlarının incelenmesi önemlidir, (Bknz. denklemler 6.2-11).

Yapısal modelde dolgu duvarı temsil eden basınç çubuğunun davranışını belirleyen parametreler; doğrusal bölgede duvar elastisite modülü (E_{duvar}), doğrusal olmayan bölgede ise eksenel akma dayanımı (P_{max}) ve en büyük kısalma değeridir (Δ_{max}), (Bknz. Şekil 6.6 ve denklemler 6.2-6.8).

“DBYBHY” (2007)’de dolgu duvarların elastisite modülü (E_{duvar}) ve kayma dayanımları (τ_{duvar}) için, sırasıyla, 1000 ve 0.15 MPa değerleri önerilmiştir. Ayrıca bu değerlerin hesaplanmasında güçlendirilmiş duvarın kompozit kesit yapısının dikkate alınabileceği de belirtilmiştir. Önerilen bu malzeme değerleri, güçlendirilmiş dolgu duvarları oluşturan sıva, tuğla ve CFRP unsurlarından sadece tuğla elemanların ilgili malzeme özelliklerini dikkate almaktadır. Bölüm 3 ve 4’te sunulmuş olan deney sonuçları, dolgu duvar üzerindeki sıvanın ve CFRP şeritlerin duvarların basınç dayanımına olumlu katkısı olduğunu göstermiştir. Modelde eşdeğer basınç çubuğuna

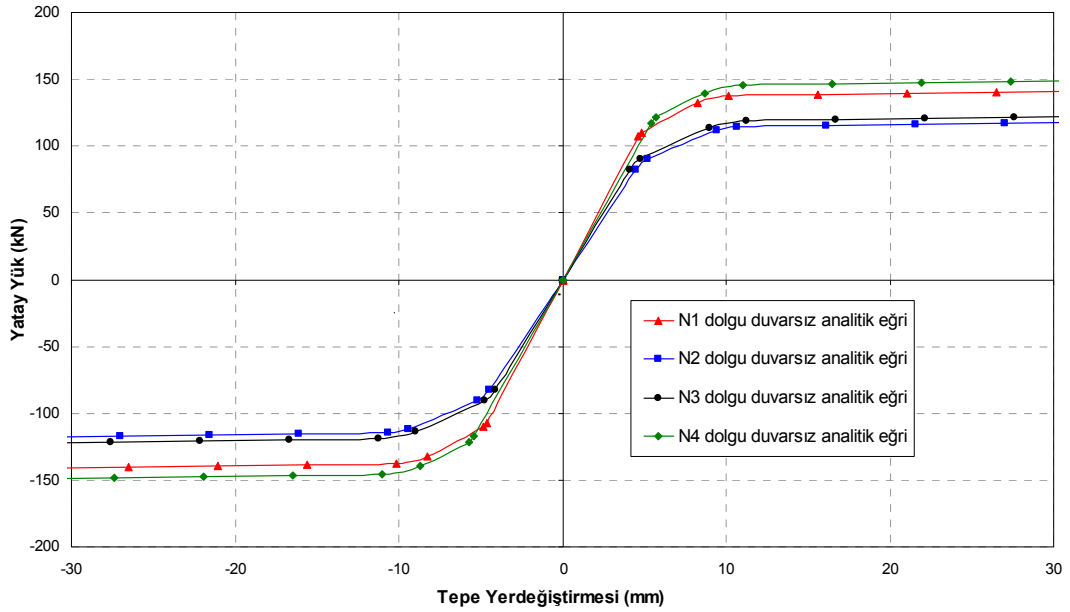
bu katkıların yansıtılması gerekirken, “DBYBHY” (2007)’de bu parameterlere yer vermeyen başka bir yaklaşım bulunmaktadır, (Bknz. Çizelge 6.2’de P_{max} değerleri).

Dolgu duvar numunelerinin basit kayma deneyleri sonuçlarına göre duvar elastisite modülünün sıvasız numuneler için 2500 MPa ve sıvalı numuneler için 6000 MPa alınabileceği görülmektedir, (Bknz. Bölüm 3.2.5).

Betonarme çerçeve içerisine yerleştirilmiş olan güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş dolgu duvarlar basınç çubuğu oluşturduğu sürece kayma dayanımları üzerinde normal gerilmelerin de mutlaka katkısı bulunmaktadır. Ancak basınç çubuğunun genişliği ve bunun içerisindeki normal gerilme dağılım şekli çok değişik parametrelere bağlı olduğundan, kayma dayanımı için normal gerilmelerin varlığından dolayı artan en büyük değerler yerine, daha gerçekçi ve küçük değerler kullanmak anlaşılabilir bir davranıştır. Dolgu duvarda bir sürekli harç tabakası boyunca kayma ile göçen duvar dayanımını (V_{duvar}) tarif edilirken, bir üst ve alt sınır elde etmek için dolgu duvarların basit kayma deneylerinde iki eksenli gerilme etkisindeki numunelerin eşdeğer kayma dayanımı (τ_{me}) sonuçlarından da yararlanılabilecektir, (Bölüm 3.2.5). Sıvalı dolgu duvar numunelerinde ortalama τ_{me} değeri 1.14 MPa iken sıvalı güçlendirilmiş numunelerde 1.628 MPa ile 0.740 MPa arasında değişmektedir. Aynı şekilde harç basınç dayanımından malzemenin çekme dayanımına geçilmesi de, normal gerilmenin etkisi olmadığı τ_{oe} değerleri için alt ve üst sınırlar hakkında fikir vermektedir. Basit kayma deneylerinden hesaplanan τ_{oe} değerleri 0.88-0.60 MPa arasında ve tek katlı-tek açıklıklı betonarme numunelerin duvar harç dayanımlarından hesaplanan τ_{oe} değerleri 1.11-0.65 MPa arasında değişmektedir. Bütün bu yaklaşık değerlerin “DBYBHY” (2007)’de önerilen 0.15 MPa değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Buna göre modeldeki basınç çubuğunun eksenel akma dayanımı (P_{max}) belirlenirken daha yüksek duvar kayma dayanımı seçilmesi mümkün olduğu söylenebilir, (Bknz. Denklemler 6.5-6).

Numunelerin “DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara göre hazırlanmış yapısal modellerinin sonuçlarının, Bölüm 6.1.2 ve 6.1.3’te verildiği gibi teker teker incelenmesinden sonra bir genel değerlendirme yapılmıştır. Buna göre basit varsayımlar yapılarak yaklaşık bir hesap ile CFRP ile güçlendirmenin dolgu duvarlara katkısı incelenmiştir. Öncelikle dolgu duvarlı N1 numunesi ve

güçlendirilmiş numunelerin dolgu duvarsız çerçeve modelleri hazırlanmıştır, Şekil 6.13.



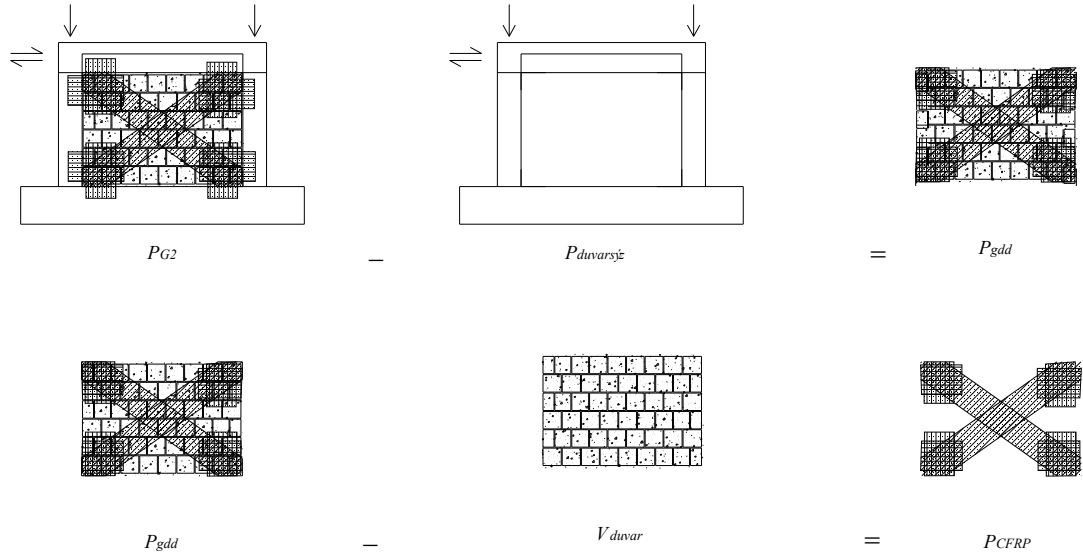
Şekil 6.13 : Dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numunelerin dolgu duvarsız yapısal modellerinin analitik yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

Numunelerin analizik eğrilerinde, deneysel yük-yerdeğiştirme eğrilerine göre önerilen göçme yerdeğiştirmelerine (Δ_{G2}), (Bknz. Bölüm 4.4.3), karşı gelen yük değerleri ($P_{duvarsız}^a$) belirlenmiş ve önerilen göçme yükleri (P_{G2}) ile karşılaştırılmıştır, Çizelge 6.3. Her bir numunede, önerilen göçme yükünden, numunenin dolgu duvarsız modelinin karşı gelen yük değeri itme ve çekme adımları için çıkarılmıştır, ($P_{G2} - P_{duvarsız}^a$). Numunenin yatay yük değerlerine güçlendirilmiş dolgu duvarların katkısını yaklaşık olarak ifade eden bu değerler (P_{gdd}) Çizelge 6.3'te verilmiştir, (Bknz. Şekil 6.14).

Güçlendirilmiş dolgu duvarların yatay yüke katkısı (P_{gdd}) dolgu duvarların basınç etkisinde taşıyacağı yük ve CFRP'nin katkısı olarak iki kısımda incelenebilir. Karmaşık olan bu karşılıklı etkileşimde, sözü edilen katkılar kesin olarak ayrılmasa da yapılan varsayımlar ile belli bir yaklaşıklıkla ifade edilebilir. Dolgu duvarların katkısını “DBYBHY” (2007)’de verilen (6.5) denklemine göre ve yine yönetmelikte verilen malzeme dayanımları ile hesaplanırsa bütün numuneler için V_{duvar} değeri, güçlendirmenin varlığından ve tipinden bağımsız olmak üzere, 39.53 kN olmaktadır. V_{duvar} dolgu duvar katkısının, güçlendirilmiş dolgu duvarın yatay yüke katılımından

Çizelge 6.3 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçevelerin artımsal itme analizi sonuçlarının irdelenmesi.

Numune Adı	P^+_{G2} (kN)	P^-_{G2} (kN)	Δ^+_{G2} (mm) (δH)	Δ^-_{G2} (mm) (δH)	$P_{duvarsiz}^a$ (kN)	P^+_{gdd} (kN)	P^-_{gdd} (kN)	P^+_{CFRP} (kN)	P^-_{CFRP} (kN)	$\frac{P^+_{CFRP}}{P^+_{G2}}$	$\frac{P^-_{CFRP}}{P^-_{G2}}$	$\frac{P^+_{CFRP}}{P^*_{CFRP}}$	$\frac{P^-_{CFRP}}{P^*_{CFRP}}$
Dolgu Duvarlı Numune N1	109.87	174.53	11.06 %0.78	10.57 %0.75	137.65	-27.78	36.88	-	-	-	-	-	-
Numune N2	303.29	306.63	10.43 %0.75	10.52 %0.75	114.85	188.44	191.78	148.92	152.26	0.49	0.49	0.70	0.72
Numune N3	205.76	235.59	10.67 %0.75	14.23 %1	118.89	86.87	116.7	47.35	77.18	0.23	0.33	0.22	0.36
Numune N4	207.01	190.24	14.34 %1	16.22 %1.1	146.29	60.72	43.95	21.19	4.43	0.10	0.02	0.21	0.02
P^+_{G2}, P^-_{G2} : Sırasıyla, itme ve çekme adımları için önerilen göçme yükü, $\Delta^+_{G2}, \Delta^-_{G2}$: P^+_{G2}, P^-_{G2} 'ye karşı gelen yerdeğiştirme değerleri, δH : Göreli kat ötelemesi oranı, $P_{duvarsiz}^a$: Numunenin dolgu duvarsız analitik eğrisinde Δ_{G2} 'ye karşı gelen yük değeri, P^+_{gdd} : Güçlendirilmiş dolgu duvarın yatay yüke katkısı, ($P_{G2} - P_{duvarsiz}^a$), V_{duvar} : Dolgu duvarın taşıdığı yatay yük, P_{CFRP} : CFRP'nin yatay yüke katkısı, ($P^+_{gdd} - V_{duvar}$), P^*_{CFRP} : CFRP'nin yük taşıma kapasitesi.													



Şekil 6.14 : Güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin analitik irdelenmesi.

(P_{gdd}) çıkarılması ile geriye kalan tüm etkiler CFRP katkısı (P_{CFRP}) içerisinde toplanmıştır, Çizelge 6.3.

Görüldüğü gibi P_{CFRP} değerleri değişik şekillerde güçlendirilmiş numuneler için farklı olmaktadır. CFRP'nin çerçeve elemanlara fiziksel bağlantısının en iyi şekilde yapılarak, entegrasyonun en iyi şekilde sağlandığı numune N2'de CFRP katkısı beklenildiği gibi en büyüktür. Buna göre “DBYBHY” (2007)’de önerilen denklemler ile hesaplamalarda CFRP'nin uygulanma ve çerçeve elemanlarına bağlantı değişikliklerinin yapısal modele yansıtılmasında önemli güçlükler bulunduğunu söylemek mümkündür.

CFRP'nin deney sırasında koptuğu gözönüne alınarak, Çizelge 3.7’de verilen malzeme özellikleri ile çekme etkisindeki CFRP şeritlerin taşıyabileceği en büyük çekme kuvvetinin yatay bileşeni 212.21 kN olarak hesaplanmıştır. Yapılan yaklaşık hesabın sonuçları, numunelerde uygulanan CFRP şeritlerin çekme kapasitelerinin etkin biçimde kullanılmadığını göstermektedir. Duvar kayma dayanımı için yönetmeliğin öngördüğü düşük değer gözönüne alınmış olsa da dolgu duvara uygulanan CFRP'nin malzeme özelliklerine göre hesaplanan taşıma kapasitesinin, çerçeveye entegrasyonun en iyi olduğu N2 numunesinde yaklaşık %70’ine ve diğer numunelerde yaklaşık olarak %35’ine ulaşılabilir. Yukarıda açıklandığı gibi yapılan deneylerde duvar kayma dayanımı “DBYBHY” (2007)’de önerilen değerden

daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum da gözönüne alınırsa CFRP'den yararlanma oranının daha da düşeceği anlaşılmaktadır.

Burada dikkati çeken başka bir olgu da taşıma kapasitesine kadar zorlanmadığı açık olan dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritlerinin deneyin ileri adımlarında kopmakta oluşudur. Çekme kapasitesine ulaşmadan ortaya çıkan kopma, CFRP şeritlerin epoksi uygulanması ile gevrekleşmesi ve çevrimsel yatay yükleme altında basınç etkisinde kaldığı zaman burkulmadan da zarar görebileceği anlamına gelmektedir.

6.2 Kullanılan Yapısal Model

“DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara göre hazırlanan yapısal model temel alınarak ve deneysel veriler ile gözlemlerin değerlendirilmesiyle, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri için bir yapısal model hazırlanmıştır. Bu yapısal model için yapılan yaklaşımlar, seçilen sınır değerler ve hesaplamalar detaylı olarak açıklanmış ve tartışılmıştır. Yapısal model hazırlanırken önceki çalışmalarda önerilen modellerden ve deneysel verilerden de yararlanılmıştır.

Kullanılan yapısal modelde betonarme çerçeve elemanları Bölüm 6.1’de detayları açıklandığı gibi tanımlanmış, fakat deneysel gözlemlere bağlı olarak bazı değişiklikler yapılmıştır. Buna göre kolon ve kiriş uç bölgelerine yerleştirilen plastik mafsalların boyları, numunelerde gözlenildiği gibi yaklaşık olarak kesit yüksekliği kadar ($L_p=h$) olacak şekilde seçilmiştir.

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvar bir eşdeğer basınç ve bir eşdeğer çekme çubuğu ile modellenmiştir, Şekil 6.1. Eşdeğer diyagonal çubuklar için belirlenen sınırlar ve seçilen büyüklükler aşağıda verilmiştir.

6.2.1 Güçlendirilmiş dolgu duvar modeli

Dolgu duvarlı çerçevelerin yapısal modeli kurulurken, dolgu duvarların iki ucu mafsallı eşdeğer diyagonal çubuklar ile modellenmesi basit, etkili ve tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemin, dolgu duvarlar için önerilen modelleme esasları incelenerek ve deneysel veriler ile uyumlu olması için gerekli değişiklikler yapılarak, FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların modellenmesi için kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin dolgu duvarlarının eşdeğer diyagonal çubuk ile modellendiği çalışmalarda, sadece eşdeğer basınç çubuğunun

kullanıldığı, (Hakam, 2000, El-Dakhakhni, 2002, Al-Chaar ve Lamb, 2002 ve Atmaca, 2008), ve bir eşdeğer basınç çubuğu ile bir eşdeğer çekme çubuğunun beraber kullanıldığı, (Binici ve Özcebe, 2006 ve Binici ve diğ., 2007), yaklaşımlar vardır.

Yapısal modelde dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğu olarak tanımlanabilmesi için öncelikle duvarın rijitlik ve yatay yük kapasitelerinin hesaplanması gerekmektedir. Eşdeğer basınç çubuğu rijitliğinin belirlenmesi için eşdeğer çubuk genişliği seçilmelidir. Bölüm 2.3'te özetlendiği gibi eşdeğer çubuk genişliğinin hesaplanması için farklı yaklaşımlar vardır. Bu çalışmada, "DBYBHY" (2007)'de verilen denklem benimsenmiştir, (Stafford-Smith ve Carter, 1969 ve Mainstone, 1971).

Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde dolgu duvarın göçme şekli etkili olmaktadır, (FEMA 306, 1998 ve Paulay ve Priestley, 1992). Dolgu duvarların yatay yük taşıma kapasitesi; hasar durumu ve göçme şeklini kontrol eden davranışa bağlı olarak farklı denklemlerle hesaplanmaktadır. Bu nedenle güçlendirilmiş dolgu duvarların göçme şekillerinin incelenmesi gereklidir.

6.2.1.1 Güçlendirilmiş dolgu duvarların göçme şekilleri

Dolgu duvarlar için genel olarak tanımlanmış göçme şekilleri dört tiptir. Bunlar *bir harç tabakası boyunca kayma*, *köşe kırılması*, *diyagonal çatlama* ve *düzlemsel göçmedir*, (FEMA 306, 1998 ve El-Dakhakhni ve diğ., 2003).

Bir harç tabakası boyunca kayma, genel olarak *genişlik/en* oranının yüksek ve harcın tuğla elemanlara oranla zayıf olduğu dolgu duvarlarda gözlenmektedir. Bu tip göçme şeklinde yaklaşık olarak duvar yüksekliğinin yarısı seviyesinde duvarda, tüm duvar genişliği boyunca ve kolonlarda yatay çatlaklar oluşmaktadır. Süneklik seviyesi yüksek bir göçme şeklidir.

Köşe kırılması göçme şeklinde, dolgu duvarın basınç diyagonal köşelerinde duvar parçalanarak dökülmektedir. Bu göçme şekli genel olarak zayıf duvar elemanları ve çerçeve birleşim bölgeleri ile güçlü çerçeve elemanlarının birlikte olduğu durumlarda olmaktadır.

Diyagonal çatlama, yatay yük etkisindeki dolgu duvarlı çerçevede dolgu duvarın basınç diyagonalinin bir köşesinden diğer köşesine doğru uzanan çatlaklar şeklinde olmaktadır. Bu göçme şekli zayıf çerçeve elemanları ve zayıf birleşim bölgesi

olduğunda veya dolgu duvarın çerçeve elemanlarına oranla daha güçlü olduğu durumlarda meydana gelmektedir.

Düzlemsel yükler etkisindeki dolgu duvarların göçme şekli bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Beklenildiği gibi CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların hasar ve göçme şekilleri, dolgu duvarlar için yukarıda açıklanan hasar ve göçme şekillerinden biraz daha farklı olmaktadır. Dolgu duvarın CFRP ile güçlendirilmesi ile çerçevenin kısmen bütünleşik davranmasını sağlamaktadır. CFRP ile güçlendirilerek, duvarın çerçevenin içerisinde daha uzun süre göçmeden kalması ve yatay yüke katkısının devam etmesi sağlanmaktadır. Dolgu duvar çekme çubuğunda CFRP'nin kendi dayanımına göre sınırlı bir katkısı olmaktadır. Bütün bu davranış farklılıkları CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı numunelerin, dolgu duvarlı numunelerden farklı ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Dolgu duvarları FRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin davranışları ve göçme şekilleri, farklı çalışmalarda deneysel olarak elde edilmiştir. Bu deneylerde numunelerin özellikleri ve FRP uygulanma şekilleri bazı değişiklikler içermektedir. *Bu deneysel çalışmanın* yapısal modelinin kurulmasında yararlanılmak amacı ile dolgu duvarlara FRP uygulamasının deney numunelerindeki benzer şekilde olan çalışmaların sonuçlarının özetlenmesi önem taşımaktadır.

Binici ve Özcebe (2006) ve Binici ve diğ. (2007)'de FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar için iki göçme şekli olduğu söylenmiştir. Tanımlanan ilk göçme şeklinde dolgu duvarın üzerindeki FRP şeritleri çerçeve elemanlara bağlayan FRP ankrajların göçmesiyle, FRP'nin taşıdığı yük dolgu duvar basınç çubuğuna aktarılmakta ve bunun sonucunda dolgu duvarda köşe kırılması ile göçme olmaktadır. Bu göçme şeklinin, eşdeğer çekme çubuğunun yaklaşık olarak 0.002-0.003 şekildeğiştirme durumunda meydana geldiği ve FRP ankrajların doğru düzenlenmesi ile engellenebileceği açıklanmıştır. İkinci göçme şeklinin ise FRP şeritlerin dolgu duvar üzerinden kalkması ile başladığı belirtilmiştir. Bunun devamında dolgu duvar üzerinde önceki adımlarda oluşmuş olan yatay çatlakların büyümesi ve FRP şeritlerin çekme çubuğu etkisini kaybetmesi ile dolgu duvarın bir harç yüzeyi boyunca kayarak göçmesi gerçekleşmektedir. FRP'nin duvar üzerinden kalkmasının, eşdeğer çekme çubuğunda yaklaşık olarak 0.006 şekildeğiştirme değerine karşı geldiği de belirtilmiştir. Bu çalışmada tanımlanan göçme şekilleri, çeşitli deneysel çalışmaların

sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmiştir, (Erdem ve diğ., 2006, Özcebe ve diğ., 2003 ve Akgüzel, 2003).

Atmaca (2008), değişik şekillerde FRP uygulanmış, çeşitli dolgu duvar *genişlik/en* oranı olan numunelerde gözlenen göçme şekillerini toplu olarak vermiştir. Güçlendirilmiş dolgu duvarlarda, bir harç tabakası boyunca kayma ve diyagonal çubuğun basınç kırılması şeklinde göçme gözlenmiştir. Dolgu duvar üzerindeki FRP şeritlerin ve FRP ankrajların kopması FRP’de gözlenen göçme şekilleridir. Ayrıca kolonlarda kayma, eğilme ve çekme etkisindeki kolonda çekme olmak üzere üç ayrı göçme şekli olduğu bildirilmiştir. Numunelerde, ayrı ayrı tanımlanan bu göçme şekillerinden biri veya birkaçı birlikte meydana geldiği görülmüştür. Buna göre üç farklı göçme durumu tanımlanabileceği söylenmiştir. Bunlar bir harç tabakası boyunca kayma şeklinde göçme, dolgu duvar basınç diyagonalinin göçmesi ve toptan dönme ile göçmedir.

Altın ve diğ. (2008), 1/3 ölçekli ve dolgu duvar *genişlik/en* oranı 1.73 olan CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve numunelerinin deneysel sonuçlarına göre göçme şekillerini vermiştir. Güçlendirilmemiş dolgu duvarlı numune %0.4 görelî kat ötelemesi oranında köşe kırılması ile göçmüştür. Dolgu duvarın iki yüzüne de çapraz CFRP şeritlerin uygulandığı numunelerde, yaklaşık olarak %0.57 görelî kat ötelemesi oranında CFRP şeritlerin kopması ile göçme olduğu gözlenmiştir. Dolgu duvarın tek yüzü güçlendirilmiş olan numunelerde ise duvar üzerindeki çapraz CFRP şeritin duvar üzerinden kalkması ve arkasından CFRP ankrajların kopması ile göçme gerçekleşmektedir. Bu tek taraflı güçlendirilmiş numunelerde %0.50-0.61 görelî kat ötelemesi oranları civarından yatay yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.

Bu deneysel çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı numunelerde dolgu duvarların hasar durumları ve göçme şekilleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır, (Bknz. Bölüm 4). Güçlendirilmemiş numunede dolgu duvarda köşe kırılması göçme şekli gözlenmiştir. Güçlendirilmiş numunelerde dolgu duvar köşelerinde CFRP şeritlerin üzerine iki kat ek CFRP tabakalar konulması ve şeritlerin çerçeve elemanlarına bağlanması nedeni ile duvar köşe bölgeleri deney sonuna kadar göçmemiştir. Diğer bir deyişle bu şekilde yapılan uygulama güçlendirilmiş dolgu duvarın köşe kırılması göçme şeklini ortadan kaldırmıştır. Güçlendirilmiş dolgu duvarlarda genel olarak diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Bir harç tabakası boyunca tüm duvarın genişliğini geçecek şekilde kayma ile göçme gözlenmemiştir.

Numune N2 ve N3'te dolgu duvar üzerindeki CFRP şeritler, sırasıyla, %1 ve %0.75 görelî kat ötelemesi oranlarında kopmuştur. CFRP şeritlerin kopmasıyla dolgu duvarlara aktarılan yük artmış ve bu adımlardan sonra dolgu duvar oldukça hasarlanarak kısmen parçalanmıştır. Bu nedenle dolgu duvarların da %0.75 görelî kat ötelemesi oranlarına geldiğinde göçtüğü kabul edilebilir. CFRP şeritlerin epoksi kullanılmadan duvara uygulandığı numune N4'te de %0.75 görelî kat ötelemesi oranı civarında CFRP liflerde kopma olduğu gözlenmiştir. Çerçeveye bağlantıyı sağlayan CFRP elemanlar ve duvarıçı CFRP ankrajlarda ise herhangi önemli bir hasar gözlenmemiştir.

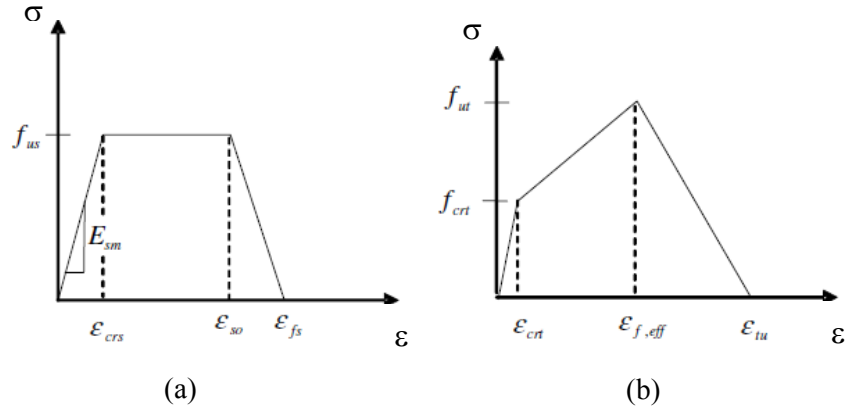
Çerçeveye bağlantısı yapılan ve köşelerinin korunduğu CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvar ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar yerinde tutulmuş ve yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmuştur. Böylece beklenildiği gibi çerçeve elemanlarına dolgu duvarlar ile temas ettiği bölgelerden kayma kuvvetleri aktarılmış ve özellikle kolonlarda kayma çatlakları gözlenmiştir. Numune N3 ve N4'te bu kayma çatlakları çok büyük değerler olarak sistemin göçmesinde etkili olmuştur, (Görelî kat ötelemesi oranı %2).

Yukarıda açıklandığı gibi farklı deneysel çalışmalarda değişik davranış ve göçme şekilleri gözlenmiştir. Dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde yapılmış olan çalışmalar, dolgu duvar *genişlik/en* oranının, çerçeve elemanları ile duvarın yatay yük dayanım oranının ve tuğla ile harç dayanım oranının, sistem davranış ve göçme şekillerini belirleyen parametreler olduğunu göstermektedir, (FEMA 356, 2000 ve FEMA 306, 1998). Buna göre sayılan parametrelerin farklı olduğu değişik ölçekli numunelerin deneysel sonuçlarının birlikte incelenmesi gerektiği görülmektedir. Deneysel verilerin, numunelerin birbirinden farklı yapısal ve deneysel özelliklerine dikkat edilerek toplanması ile bir veritabanı oluşturulabilir. Böylece dolgu duvarlarda olduğu gibi FRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar için de belirlenen parametrelere bağlı olarak göçme şekilleri, hesap yöntemleri ve yapısal model için gerekli sınır değerleri ortaya konulabilir.

6.2.1.2 Eşdeğer basınç çubuğu

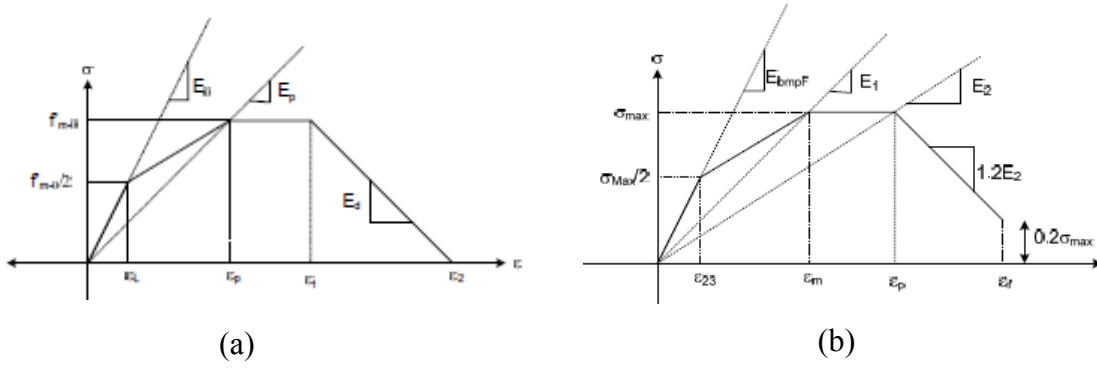
Eşdeğer basınç çubuğunun davranış biçimini belirleyen büyüklüklerin arasında *duvarın elastisite modülü, duvar elemanlarının kayma ve basınç dayanımları, ve yerdeğiştirme sınırları* bulunmaktadır.

Binici ve Özcebe (2006) ve Binici ve diğ. (2007)'de güçlendirilmiş dolgu duvarları modelleyen eşdeğer basınç çubuğu için üç doğrulu bir davranış modeli önerilmiştir, Şekil 6.15. Burada eşdeğer basınç çubuğunun dayanımı, dolgu duvarın *bir harç boyunca kayması ve köşe kırılması* göçme şekillerine göre hesaplanan yatay yük kapasitelerinden en küçüğü olarak belirlenmektedir. Eşdeğer basınç çubuğunun şekildeğiştirme sınırları için üç değer verilmiştir. Bu sınır değerler dolgu duvarın güçlendirilmiş olup olmadığına bağlı olarak değişmektedir. Güçlendirilmemiş dolgu duvarlar için duvarın sünekliği olmayacağı kabul edilmiştir. FRP ile güçlendirme olması halinde ise göçme şekildeğiştirmesi, FRP şeritlerin göçme şekline bağlı olarak 0.01 veya 0.02 olarak önerilmektedir.



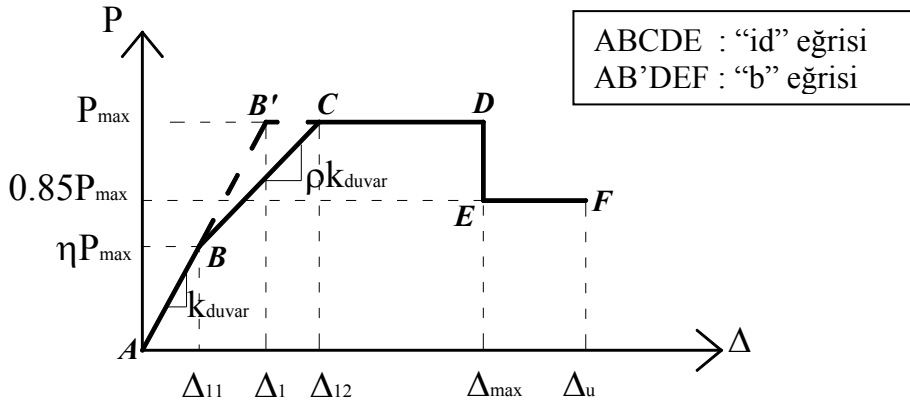
Şekil 6.15 : Binici ve diğ. (2007) tarafından önerilen eşdeğer basınç (a) ve çekme (b) çubukları gerilme-şekildeğiştirme modelleri.

El-Dakhkhni (2002) ve Atmaca (2008), dolgu duvar eşdeğer basınç çubuğu için çok doğrulu gerilme-şekildeğiştirme eğrileri önermişlerdir, Şekil 6.16. El-Dakhkhni (2002), dolgu duvarın ortotropik özellik gösterdiği varsayımı ile malzeme özelliklerini diyagonal yüklenme yönünde açısal olarak dönüştürerek kullanmıştır. Eşdeğer basınç çubuğunun dayanımı dolgu duvar *köşe kırılması* göçme şekline göre hesaplanmaktadır. Atmaca (2008), eşdeğer basınç çubuğu eksenel yük değerlerini *bir harç tabakası boyunca kayma ve diyagonal çatlama* göçmelerine göre hesaplayarak, bunlardan küçük olanını eksenel yük kapasitesi olarak seçmektedir. Dolgu duvarlara uygulanan FRP'nin katkısı, duvar elastisite modülü ve basınç dayanımlarına bir katsayı ile etkimektedir. Önerilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisindeki şekildeğiştirme sınırları FRP uygulaması ve duvar *genişlik/en* oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 6.16 : El-Dakhkhni (2002) (a) ve Atmaca (2008) (b) tarafından önerilen eşdeğer basınç çubuğu gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

Bu çalışmada kullanılan yapısal modelde, dolgu duvarı temsil eden diyagonal eşdeğer basınç çubuğu davranışı için önerilen model Şekil 6.17’de verilmiştir. Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisini tanımlayan yük ve yerdeğiştirme sınırlarının belirlenmesi aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 6.17 : Yapısal modelde kullanılan diyagonal eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük-yerdeğiştirme modelleri.

Bölüm 6.1.3 ve 6.1.4’te de açıklandığı gibi güçlendirilmiş sıvalı dolgu duvarın elastisite modülünün, basınç ve kayma dayanımlarının “DBYBHY” (2007)’de önerilenden daha yüksek olduğu deneyler ile gözlenmiştir. Buna göre dolgu duvarların elastisite modülü, basit kayma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesine göre belirlenerek 6000 MPa alınmıştır, (Bknz. Bölüm 3.2.5).

Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi hesabı için duvarın *bir harç tabakası boyunca kayarak göçmesi* ve *diyagonal çatlamlarla göçmesi* olmak üzere iki farklı göçme durumunu gözönüne alan denklemler kullanılmıştır ve hesaplanan bu eksenel yük kapasitelerine, sırasıyla, $(P_{max})_{hk}$ ve $(P_{max})_{dç}$ denilmiştir.

$(P_{max})_{hk}$, denklemler (6.5) ve (6.6) ile bulunmaktadır. Bu denklemlerde duvar kayma dayanımı (τ_{duvar}) olarak, kaymanın yaklaşık olarak bir harç tabakası boyunca olacağı varsayımı ile, numunelerin harç çekme dayanımları kullanılmıştır. Numunelerin harç çekme dayanımlarına, deneysel elde edilen harç basınç dayanımlarından, (Çizelge 3.2),

$$f_{ctk} = 0.35\sqrt{f_{ck}} \quad (6.12)$$

ile geçilmiştir, (TS 500, 2000). Burada f_{ctk} çekme dayanımını ve f_{ck} ise basınç dayanımını göstermektedir.

Dolgu duvarın diyagonal çatlama ile göçmesini gözönüne alan eksenel yük kapasitesi $(P_{max})_{dç}$;

$$(P_{max})_{dç} = a_{duvar} t_{duvar} f_{me} \quad (6.13)$$

ile hesaplanmıştır. Burada a_{duvar} eşdeğer çubuk genişliğini, t_{duvar} dolgu duvar kalınlığını, f_{me} ise dolgu duvar eşdeğer basınç dayanımını göstermektedir.

Bölüm 6.2.1.1’de açıklandığı gibi güçlendirilmiş dolgu duvarlarda köşelere uygulanan CFRP tabakalarından dolayı duvarın *köşe kırılması* önlenmektedir. Dolayısıyla dolgu duvarın daha ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar iki eksenli gerilmeye maruz kaldığı düşünülebilir. Bu yaklaşımla, güçlendirilmiş dolgu duvarlarda eşdeğer basınç dayanımı olarak duvar basit kayma deneyleri sonuçlarından belirlenen f_{me} değerleri kullanılmıştır, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Güçlendirilmiş dolgu duvarlı numuneler N2 ve N3’te f_{me} 5 MPa alınmıştır. Güçlendirilmemiş basit kayma numuneleri incelenerek, dolgu duvarlı numune N1’de f_{me} 4 MPa olarak belirlenmiştir. Diyagonal CFRP şeritlerin dolgu duvar üzerine yapıştırılmadan uygulandığı numune N4’te, basınç çubuğuna sadece sıva ve duvar elemanlarının katkısının olacağı düşünülerek, f_{me} 4 MPa olarak seçilmiştir. Bütün numunelerin eşdeğer basınç çubuğu özellikleri ve hesaplanan eksenel yük kapasiteleri Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Yukarıda verilen denklemlerle hesaplanan $(P_{max})_{hk}$ ve $(P_{max})_{dç}$ değerlerinden küçük olanı eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi (P_{max}) olarak seçilmiştir.

Çizelge 6.4 : Yapısal modelde dolgu duvarları temsil eden eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının özellikleri.

	Numune Adı Parametre	Numune N1	Numune N2	Numune N3	Numune N4
Malzeme Özellikleri	E_{duvar} (MPa)	6000	6000	6000	6000
	f_{me} (MPa)	4	5	5	4
	τ_{duvar} (MPa)	0.73	0.71	1.11	0.64
Eşdeğer basınç çubuğu	a_{duvar} (mm)	225.31	221.29	223.14	225.95
	$(P_{max})_{hk}$ (kN)	235.44	228.99	357.99	207.06
	$(P_{max})_{dç}$ (kN)	139.69	171.49	172.93	140.09
	k_{duvar} (kN/mm)	100.69	98.89	99.73	100.99
	Δ_{max} (mm)	4.45	5.57	5.57	5.57
	ϵ_{max} (%)	0.21	0.27	0.27	0.27
	Δ_u (mm)	8.35	8.35	8.35	8.35
	ϵ_u (%)	0.4	0.4	0.4	0.4
Eşdeğer çekme çubuğu	w_f (mm)	-	300	300	300
	k_t (kN/mm)	-	7.36	7.36	7.36
	T_f (kN)	-	61.27	61.27	61.27
	$\Delta_l = \Delta_{max}^f$ (mm)	-	8.32	8.32	8.32
	ϵ_{max}^f (%)	-	0.4	0.4	0.4
E_{duvar} : Dolgu duvar elastisite modülü, f_{me} : Duvar eşdeğer basınç dayanımı, τ_{duvar} : Duvar kayma dayanımı, a_{duvar} , w_f : Sırasıyla, eşdeğer basınç ve çekme çubuk genişliği, k_{duvar} , k_t : Sırasıyla, eşdeğer basınç ve çekme çubuğu rijitliği, $(P_{max})_{hk}$, $(P_{max})_{dç}$: Sırasıyla, harç tabakası boyunca kayma ve diyagonal çatlama göçme şekillerine göre dolgu duvar eksenel yük kapasiteleri, T_f : Eşdeğer çekme çubuğu eksenel yük kapasitesi, Δ_{max} , ϵ_{max} , Δ_u , ϵ_u : Sırasıyla, eşdeğer basınç çubuğu en büyük yüke karşı gelen yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme, göçme yerdeğiştirmesi ve şekildeğiştirmesi, Δ_{max}^f , ϵ_{max}^f : Sırasıyla, eşdeğer çekme çubuğu en büyük yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeleri.					

Şekil 6.17’de önerilen eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi modelinin, A, B ve C noktaları ile işaretlenmiş olan başlangıç bölümü, dolgu duvarların basit kayma deneyleriyle ulaşılan yük-yerdeğiştirme eğrilerinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesiyle bulunan değerler kullanılarak belirlenmiştir, (Bknz. Bölüm 3.2.5, Şekil 3.26 ve Çizelge 3.11). Bu sonuçların değerlendirilmesi ile CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlar için η ve ρ değerleri yaklaşık olarak, sırasıyla, 0.55 ve

0.35 olarak alınmıştır. Güçlendirilmemiş dolgu duvarlar için η ve ρ değerleri ise, sırasıyla, 0.70 ve 0.25 olarak önerilebilmektedir. Bunlara karşılık gelen sınır yerdeğiştirme değerleri ise k_{duvar} aracılığı ile,

$$\Delta_{11} = (\eta P_{\max}) / k_{duvar} \quad (6.14)$$

$$\Delta_{12} = ((P_{\max} - \eta P_{\max}) / \rho k_{duvar}) + \Delta_{11} \quad (6.15)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada k_{duvar} , eşdeğer basınç çubuğunun eksenel rijitliğini ifade etmektedir, (Denklem (6.4)).

Bu öneriye karşı, hesaplamalarda basitliği korumak ve SAP2000 v10 (2006) programından yararlanmak üzere, eşdeğer basınç çubuğunun yük-yerdeğiştirme eğrisi için A-B'-D-E-F noktaları ile belirlenmiş davranış modeli de kullanılarak artımsal itme analizi yapılmış ve ABCDE noktaları ile önerilen modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Burada eşdeğer basınç çubuğunda başlangıç bölgesi iki doğrulu olan eğrinin (A-B-C-D-E) kullanıldığı çözüme (*Analitik Eğri*)_{id} ve basitleştirilmiş eğrinin (A-B'-D-E-F) kullanıldığı çözüme (*Analitik Eğri*)_b denilmiştir. Yük-yerdeğiştirme eğrisindeki B' noktasını belirleyen Δ_I yerdeğiştirme değeri denklem (6.7) ile hesaplanmaktadır.

Eşdeğer basınç çubuğunun yük-yerdeğiştirme eğrisinin düşüş kolu (D-E-F), tek katlı-tek açıklıklı numunelerin deney sonuçları ile Bölüm 4.4 ve 6.1.2'de yapılmış değerlendirmelere göre seçilmiştir. Güçlendirilmiş numunelerde taşınan en büyük yatay yüke %0.5 görelî kat ötelemesi oranında ulaşılmış ve bu değerden sonra dolgu duvarda önemli hasarlar olduğu gözlenmiştir. Buna göre eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesinin sona erdiği kabul edilen yerdeğiştirme (Δ_{max}) %0.5 görelî kat ötelemesi oranına karşı gelen değer olacak şekilde hesaplanmıştır, (Denklem (6.8)). Güçlendirilmemiş numunede ise Δ_{max} , %0.4 görelî kat ötelemesi oranına karşı gelen değer olarak belirlenmiştir.

Güçlendirilmiş numunelerde dolgu duvarların %0.75 görelî kat ötelemesi oranlarına geldiğinde göçtüğü kabul edilebileceği görülmüştür, (Bknz. Bölüm 6.2.1.1). Ayrıca tek katlı-tek açıklıklı numunelerinin yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesiyle belirlenen ve numunenin kararlılığını koruduğu değer olan yerdeğiştirme (Δ_{G2}) yaklaşık olarak %0.75 görelî kat ötelemesi oranına karşı

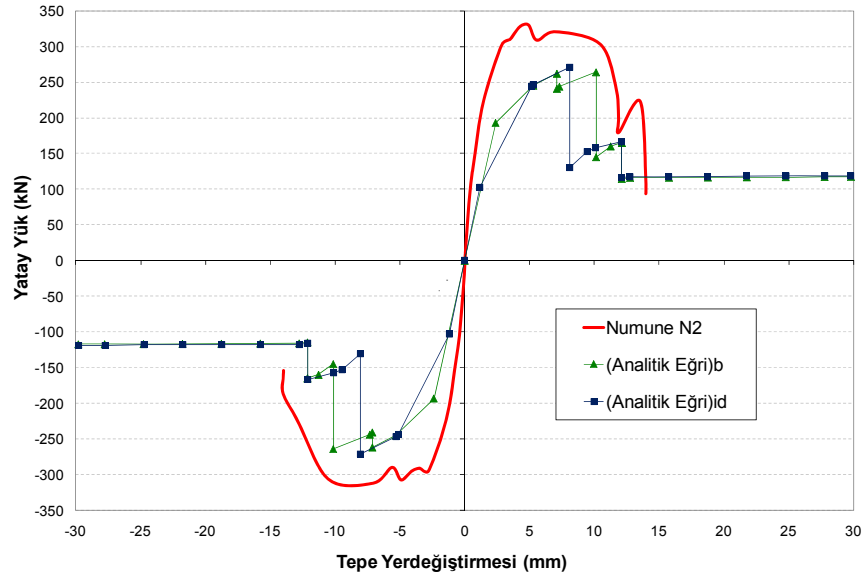
gelmektedir, (Bknz. Bölüm 4.4.1 ve Çizelge 4.2). Buna göre eşdeğer basınç çubuğunun göçme yerdeğiştirmesi (Δ_u) %0.75 görelı kat ötelemesi oranına göre hesaplanmıştır.

Eřdeęer basınç çubuğunda Δ_{max} 'a ulaşıldıktan sonra dolgu duvarda hasarların artması ile yük taşıma değerinde düşme olacağı düşünülerek, yük-yerdeğiştirme eğrisinde E noktası belirlenmiştir. E noktasının koordinatı, en büyük eksenel yükün %0.85'ine karşı gelecek şekilde tanımlanmıştır. Bu değer tek katlı-tek açıklıklı numunelerin iki doğrulu olarak idealleştirilen yük-yerdeğiştirme eğrilerine göre belirlenen önerilen göçme yükünün (P_{G2}) en büyük yatay yüke oranı incelenerek sečilmiřtir, (Bknz. Bölüm 4.4.1 ve Çizelge 4.2).

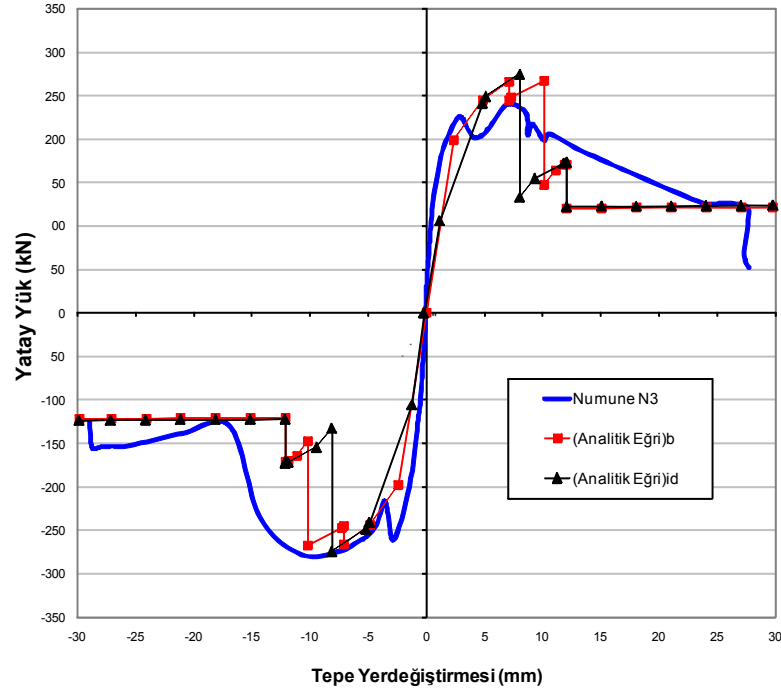
Yapısal modelde eşdeğer basınç çubuğu eksenel yük-yerdeğiştirme modelinin “*id*” ve “*b*” eğrileri olarak alınması ile elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, iki durumda da başlangıç rijitliği ve yatay yük taşıma kapasitesilerinin oldukça yakın çıktığı görölmektedir. şekil 6.18'de her iki durum için de Numune N2 ve Numune N3'ün sonuçları verilmiştir.

6.2.1.3 Eşdeğer çekme çubuğu

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin modellenmesinde dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğunun yanında eşdeğer çekme çubuğu ile ifade edilmesi Bölüm 2'de özetlenmiş olan önceki çalışmalar içerisinde sadece Binici ve Özcebe (2006) ve Binici ve diğ. (2007)'de yer almaktadır. Birbirini tamamlayan bu çalışmalarda, eşdeğer çekme çubuğunun davranışı üç doğrulu olarak tanımlanmıştır, şekil 6.15. İlk doğrunun sınırını belirleyen f_{crt} , eşdeğer çekme çubuğunun dayanımına FRP ile birlikte dolgu duvar ve sıvanın etkisini de dikkate almıştır. Eşdeğer çekme çubuğunun dayanımını belirleyen f_{ut} , sadece FRP'nin özelliklerinden hesaplanmaktadır. Önerilen şekildeğiştirme sınırları olan ϵ_{crt} sıvanın deneysel verilerinden, $\epsilon_{f,eff}$ tanımlanmış göçme şekillerine göre belirlenmiş değerlerden belirlenmektedir. ϵ_{tu} ise $\epsilon_{f,eff}$ 'un yaklaşık olarak üç katı olarak alınmıştır. Çalışmada $\epsilon_{f,eff}$ için CFRP çerçeve ankrajlarının göçmesi ile meydana gelen göçme şekli halinde 0.002-0.003 ve CFRP'nin dolgu duvar üzerinden kalkması ile meydana gelen göçme şekli halinde 0.006 değerleri önerilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.18 : Numune N2 (a) ve N3'ün (b) eşdeğer basınç çubuğu için iki farklı eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi kullanılarak hazırlanmış yapısal modellerin analitik sonuçları.

Altın ve diğ. (2008), 1/3 ölçekli dolgu duvarları CFRP ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve numuneyi deneylerinde, CFRP şeritler üzerine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler ile kritik noktalardaki şekildeğiştirme değerleri belirlenmiştir. Buna göre iki yüzü CFRP şeritler ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı numunelerde CFRP şeritlerin kopması 0.0042-0.0054 şekildeğiştirme değerleri arasında olmaktadır. Dolgu duvarın tek yüzü güçlendirilmiş numunelerde CFRP şeritlerin 0.0028-0.0032 şekildeğiştirme

değerleri arasında CFRP ankraj elemanların göçmesi gerçekleşmiştir. Tek yüzü güçlendirilmiş numunelerde basınç kuvveti etkisindeki CFRP şeritlerin duvar üzerinden kalkarak göçmesi 0.002 şekildeğiştirme değerinde olmuştur.

Bu çalışmada güçlendirilmiş dolgu duvarları temsil eden eşdeğer çekme çubuğunun FRP malzeme özellikleri dolayısıyla doğrusal elastik davrandığı kabul edilmiştir, (ACI 440, 2001 ve FIB Bulletin 14, 2001), (Bknz. Şekil 6.6b). Eşdeğer çekme çubuğunun çekme dayanımı ve eksenel rijitliği Bölüm 6.1.3'te açıklandığı gibi hesaplanmış ve eksenel çubuğun şekildeğiştirme sınırı deneysel gözlemlere ve verilere göre belirlenmiştir. Ayrıca eşdeğer çekme çubuğunun genişliği (w_f) “DBYBHY” (2007)’deki öneriden farklı olarak, duvar üzerindeki CFRP şeritlerin gerçek genişliğine eşit alınmıştır, Çizelge 6.4.

Güçlendirilmiş dolgu duvarlı numunelerde dolgu duvar üzerine uygulanan CFRP şeritler ileri yatay yerdeğiştirme adımlarında koparak göçmüştür. Numune N2’de CFRP şerit kopması %1 görelî kat ötelemesi oranında, numune N3’te ise %0.75 görelî kat ötelemesi oranında olmuştur, Çizelge 4.3. CFRP şeritlerin dolgu duvar üzerine yapıştırılmadan uygulandığı numune N4’te %0.75 görelî kat ötelemesi oranından itibaren epoksi yedirilmemiş CFRP liflerinde kopmalar görülmüştür. Bu gözlemlere göre modelde eşdeğer çekme çubuğunun sınır değeri için %0.75 görelî kat ötelemesi oranına karşı gelen eksenel şekildeğiştirme 0.004 seçilmiştir. Deneysel verilere göre seçilen bu değerin yukarıda anlatıldığı gibi Altın ve diğ. (2008)’de verilen değerlere yaklaştığı görülmektedir. CFRP şeritlerin koparak göçmesi, eşdeğer çekme çubuğu için kabul edilen doğrusal elastik davranış ile de uyumludur.

İki farklı şekilde yapılan CFRP ve çerçeve bağlantısının deney sonuna kadar etkin çalıştığı görülmüştür, (Bknz. Bölüm 4.3.6.). Ayrıca duvar içi CFRP ankraj elemanlar da dolgu duvarın her iki yüzündeki CFRP şeritleri birbirine bağlayarak duvar üzerinden tamamen kalkmasını engellemişlerdir. Dolayısıyla, eşdeğer çekme çubuğunun şekildeğiştirme sınırları belirlenirken CFRP bağlantı elemanları ve ankrajları ile ilgili herhangi bir etki dikkate alınmamıştır.

6.2.2 Analitik sonuçların değerlendirilmesi

Tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarlı numuneler için ayrıntıları yukarıda açıklandığı gibi hazırlanan yapısal modellerin artımsal itme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri analitik sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı Parametre		Numune N1	Numune N2	Numune N3	Numune N4
P_{hk}	P_{hk}^b (kN)	304.62	307.87	412.77	320.48
	P_{hk}^{id} (kN)	-	318.02	-	330.09
$P_{dç}$	$P_{dç}^b$ (kN)	226.79	263.95	267.31	274.03
	$P_{dç}^{id}$ (kN)	-	271.08	274.41	274.69
K_{int}^{hk} (kN/mm)		83.80	83.41	82.11	86.05
$K_{int}^{dç}$ (kN/mm)		87.14	86.79	82.91	89.49
P_{hk}^b / P_{G1}^+		2.33	0.93	1.72	1.42
P_{hk}^b / P_{G1}		1.33	0.99	1.48	1.48
P_{hk}^{id} / P_{G1}^+		-	0.96	-	1.47
P_{hk}^{id} / P_{G1}		-	1.02	-	1.52
$P_{dç}^b / P_{G1}^+$		1.73	0.79	1.11	1.22
$P_{dç}^b / P_{G1}$		0.99	0.85	0.96	1.26
$P_{dç}^{id} / P_{G1}^+$		-	0.82	1.14	1.22
$P_{dç}^{id} / P_{G1}$		-	0.87	0.99	1.26
K_{int}^{hk} / K_{int}^+		0.96	0.37	0.45	0.56
K_{int}^{hk} / K_{int}		0.99	0.37	0.39	0.70
$K_{int}^{dç} / K_{int}^+$		0.99	0.38	0.46	0.58
$K_{int}^{dç} / K_{int}$		1.04	0.38	0.40	0.73
P_{hk}^{id}, P_{hk}^b: Eksenel yük kapasitesi “bir harç tabakası boyunca kayma göçmesi”ne göre hesaplanmış eşdeğer basınç çubuğu yük-yerdeğiştirme eğrisi, sırasıyla, iki doğrulu ve basitleştirilmiş olan modellerin en büyük yatay yük değerleri, $P_{dç}^b, P_{dç}^{id}$: Eksenel yük kapasitesi “diyagonal çatlama göçmesi”ne göre hesaplanmış eşdeğer basınç çubuğu yük-yerdeğiştirme eğrisi, sırasıyla, iki doğrulu ve basitleştirilmiş olan modellerin en büyük yatay yük değerleri, P_{G1}^+, P_{G1}: Numunelerin, sırasıyla, itme ve çekme için deneysel en büyük yatay yük değerleri, $K_{int}^{hk}, K_{int}^{dç}$: Sırasıyla, “harç boyunca göçme” ve “diyagonal çatlama göçme” şekillerine göre model başlangıç rijitlikleri, K_{int}^+, K_{int}: Numunelerin, sırasıyla, itme ve çekme adımları için deneysel başlangıç rijitlikleri.					

Güçlendirilmiş numunelerin yapısal modelinde dolgu duvarı temsil eden eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi seçimine göre iki farklı çözüm yapılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğu yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç bölgesi iki doğrulu olan modelin analitik eğrisindeki en büyük yatay yük değerine P^{id}

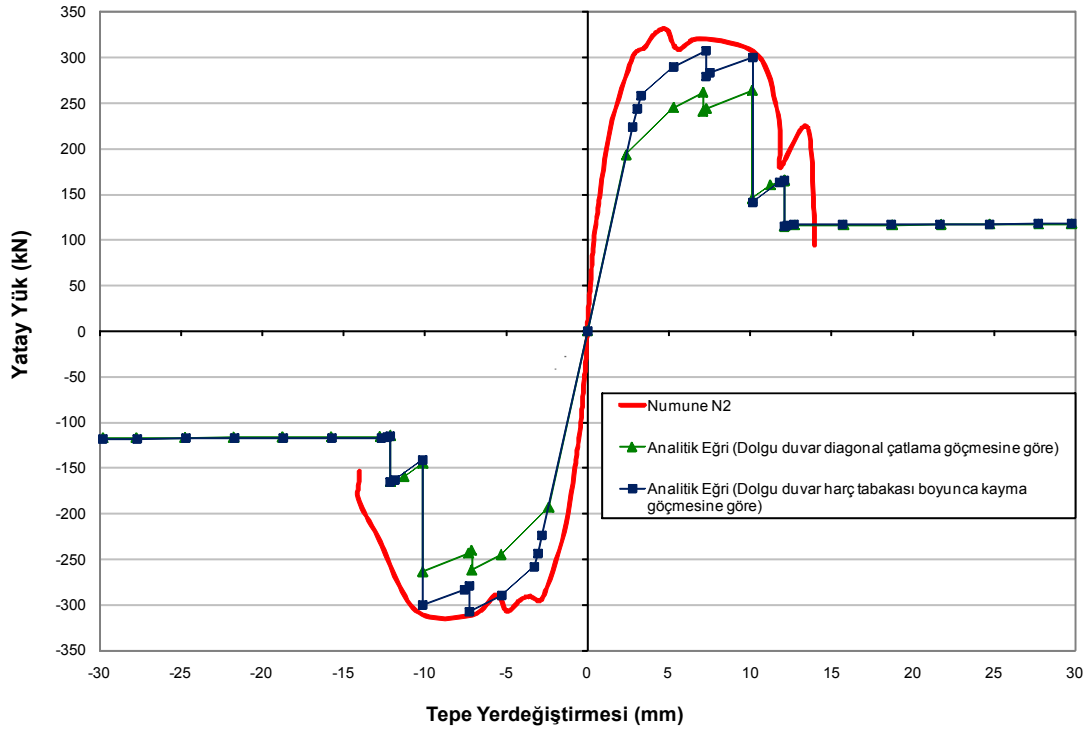
denilmiştir, (Şekil 6.17’de “ABCDE”). Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin basitleştirilmiş halinin kullanıldığı yapısal modelin analitik eğrisindeki en büyük yatay yük değerine ise P^b denilmiştir, (Şekil 6.17’de “AB’DEF”). Çizelge 6.5’te görüldüğü gibi numunelerin P^{id} ve P^b değerleri çok yakın olmaktadır. Ayrıca iki yapısal model için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri de oldukça yakındır. Kullanılan bilgisayar programında eşdeğer çubuğa atanan P mafsalları tanımlamak için verilebilen koordinat sayısı kısıtlıdır. Bundan dolayı, numunelerin analitik eğrileri deney sonuçları ile bir diyagramda gösterilirken, eşdeğer basınç çubuğunda basitleştirilmiş yük-yerdeğiştirme eğrisi olan model sonuçları kullanılmıştır, (Şekil 6.19-21).

Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük kapasitesi, *bir harç tabakası boyunca kayma ve diyagonal çatlama* göçme durumlarına göre ayrı ayrı hesaplanmış ve bunlara karşı gelen en büyük yatay yüklere, sırasıyla, P_{hk} ve $P_{dç}$ denilmiştir, Çizelge 6.5. Yapısal model analiz sonuçlarına göre bütün numunelerde yatay yük kapasitesini belirleyen dolgu duvar göçme şekli *diyagonal çatlama* olduğu görülmektedir. Bu durum deney sonuçları ile de uyumludur.

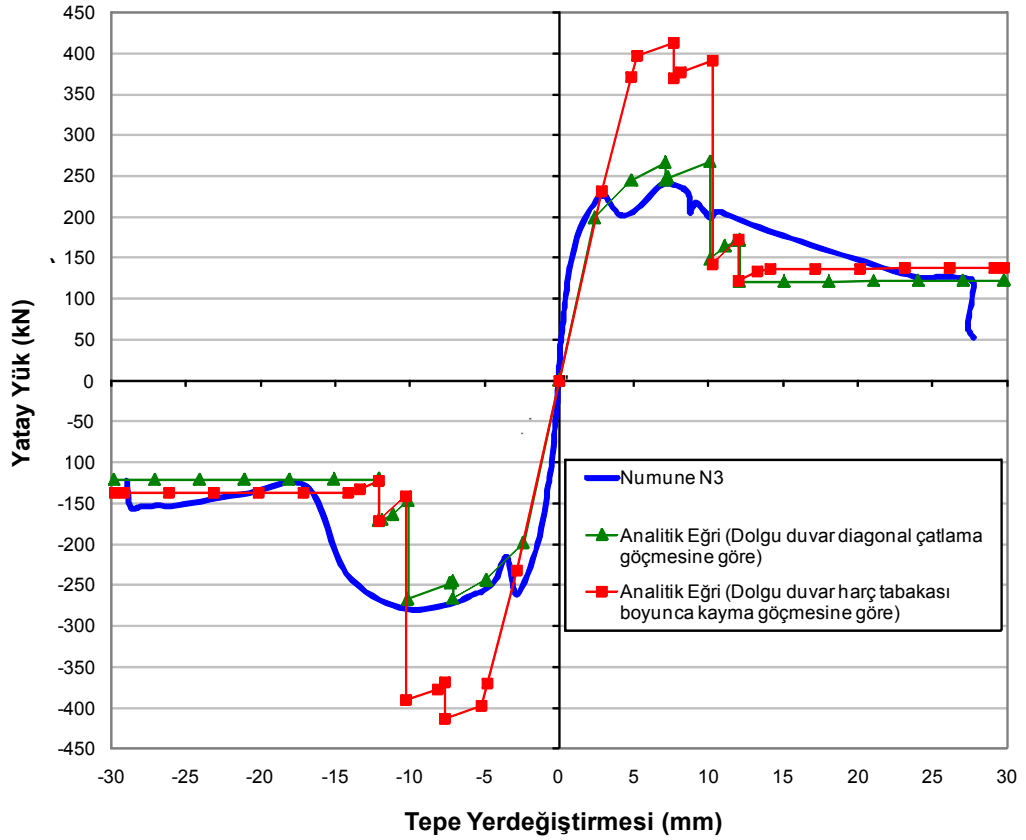
Çizelge 6.5’teki değerler incelendiğinde yapısal modelin en büyük yatay yük değeri açısından deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Analitik en büyük yatay yük değerinin, deneysel en büyük yatay yük değerine oranı güçlendirilmiş numuneler N2 ve N3’te, sırasıyla, 0.85 ve 1.0 civarında değerler almaktadır. “DBYBHY” (2007)’te verilen esaslara göre hazırlanan yapısal modelde ise bu değerler, sırasıyla, 0.50 ve 0.70 olmaktadır, Çizelge 6.1. Numune N4’te kullanılan yapısal model en büyük yatay yük değerini yaklaşık olarak %20 fazla tahmin etmektedir.

Kullanılan yapısal model güçlendirilmiş numunelerin başlangıç rijitliklerini de deneysel verilere, “DBYBHY” (2007)’teki esaslara göre hazırlanan modele kıyasla daha yakın olarak vermektedir.

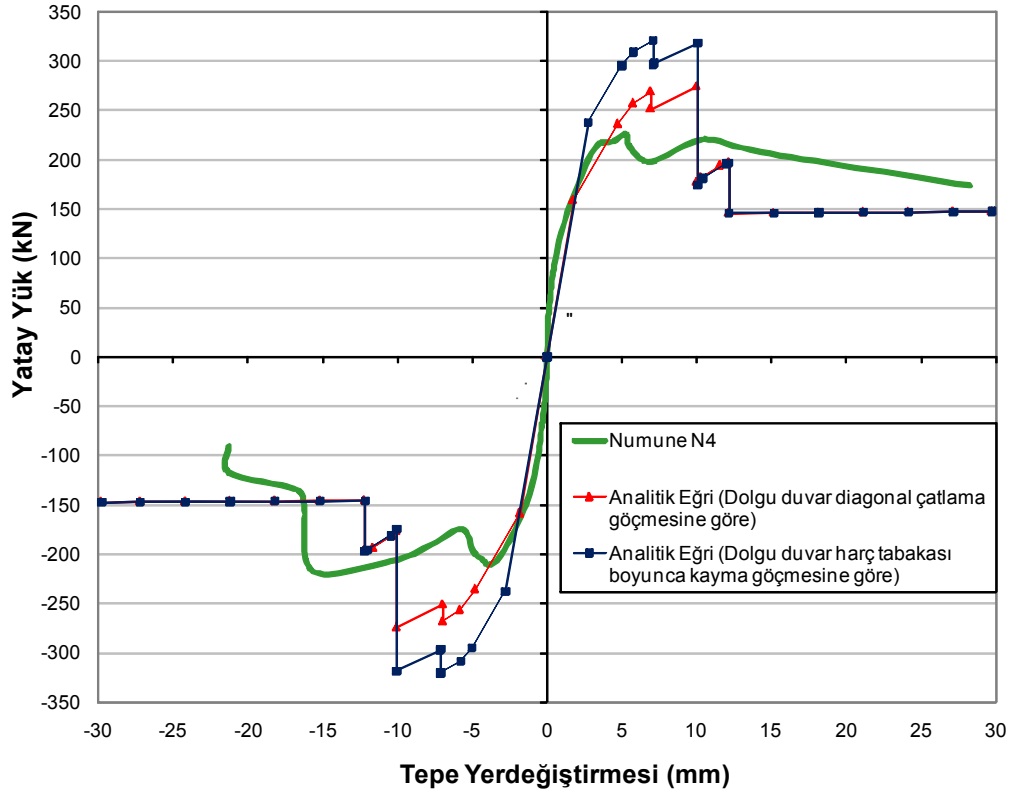
Malzeme karakteristikleri ve yapısal özellikleri birbirinden farklı elemanların oluşturduğu CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitelerinin saptanması doğal olarak farklı göçme biçimlerini bulundurmaktadır. Bu göçme biçimleri kestirilerek taşıma kapasiteleri için olası bazı alt ve üst sınırlar tarif etmek mühendislik açısından önemlidir. Nitekim yapılan



Şekil 6.19 : Numune N2'nin artımsal itme analizi sonuçları.



Şekil 6.20 : Numune N3'ün artımsal itme analizi sonuçları.



Şekil 6.21 : Numune N4'ün artımsal itme analizi sonuçları.

deneylerde de bu durumlarla karşılaşılmıştır. Örneğin eğilme elemanlarından oluşan dolgu duvarsız çerçeve, dolgu duvarı ile bütünleştirilebilirse bileşik sistem başka bir davranış sergilemektedir, bütünleştirilemezse başka bir davranış sergilemektedir. Çerçeve ve dolgu duvarın bütünleştiği, başka bir deyişle aradaki kaymanın alındığı ve iki yönlü yükler etkisinde kaybolmadığı sürece, birleşik sistemin bir toptan eğilme elemanı gibi çalıştığı gözlenmektedir. Dolgu duvarların CFRP ile güçlendirilmesi söz konusu olduğunda, CFRP'nin dolgu duvarla bağlantısı ile mevcut betonarme elemanlarla bütünleştirilme detaylarına bağlı olarak önemli kazanımlar sağlanabilmektedir. Fakat karbon liflerin epoksi uygulanması ile gevrekleşmesi ve gevrekleşen CFRP tabakalarının basınç altında kırılması ve betonarme elemanlara ankrajının iyi yapılmaması durumlarında, bu etkin malzemenin sonuçlar üzerinde sınırlı etkisi bulunduğunu kabul etmek daha doğrudur.

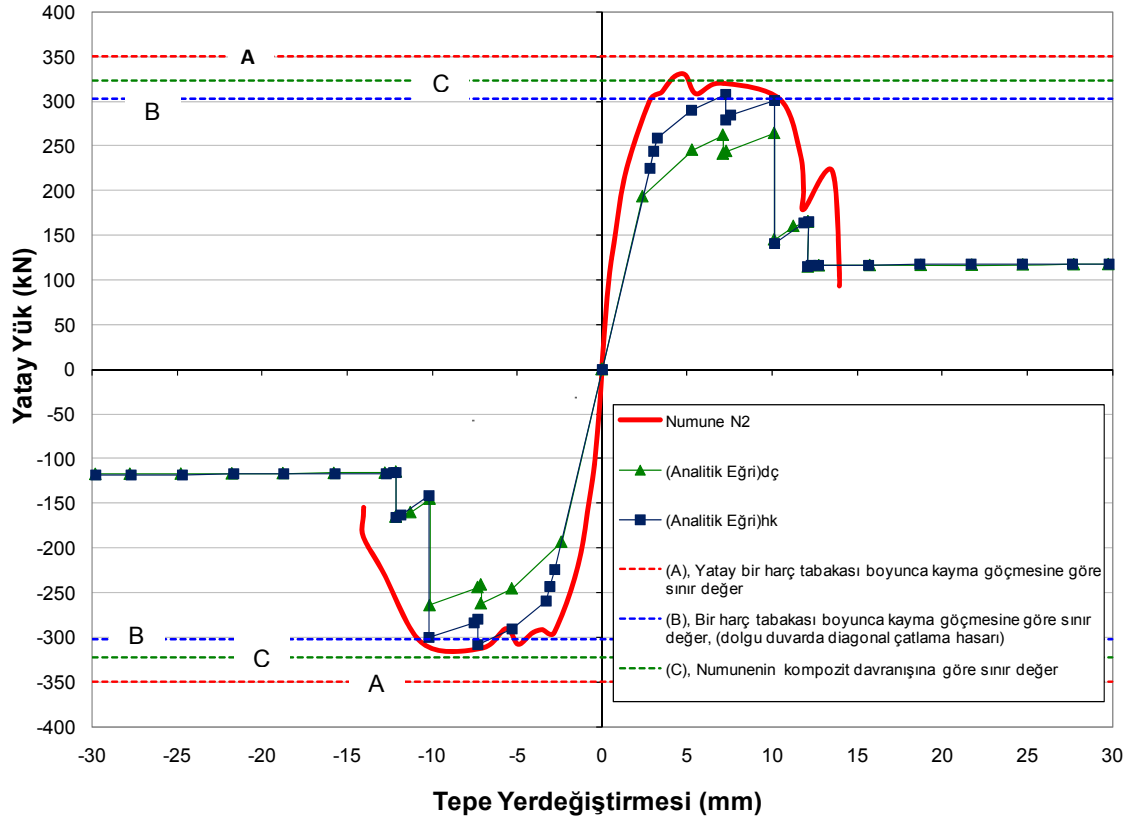
Olası göçme şekillerine bağlı olarak yapılabilecek yatay yük taşıma kapasitesi alt ve üst sınırları için öngörülen varsayımların da kendi içerisinde tutarlı olması zorunludur. Örneğin dolgu duvarının çapraz doğrultusundaki basınç gerilmeleri nedeni ile eşdeğer bir basınç çubuğu gibi davranması halinde, çatladığı varsayılan duvar kesitlerinde bu bölgenin dışında da artık kayma dayanımı bulunmaması

gerekeceđi dűşűnűlebilir. Bu varsayımlara dayalı olarak ulaşılan yatay yűk taşıma kapasitesi sınır deđerleri deneysel yűk-yerdeđiştirme bađıntıları űzerinde yatay dođrular ile ifade edilmiştir, Şekil 6.22-24. Farklı gűçme şekillerine göre yatay yűk taşıma kapasitesi sınır deđerleri aşıđıda açıklandığı gibi belirlenmiştir. İlgili hesap detayları Ek C’de verilmiştir.

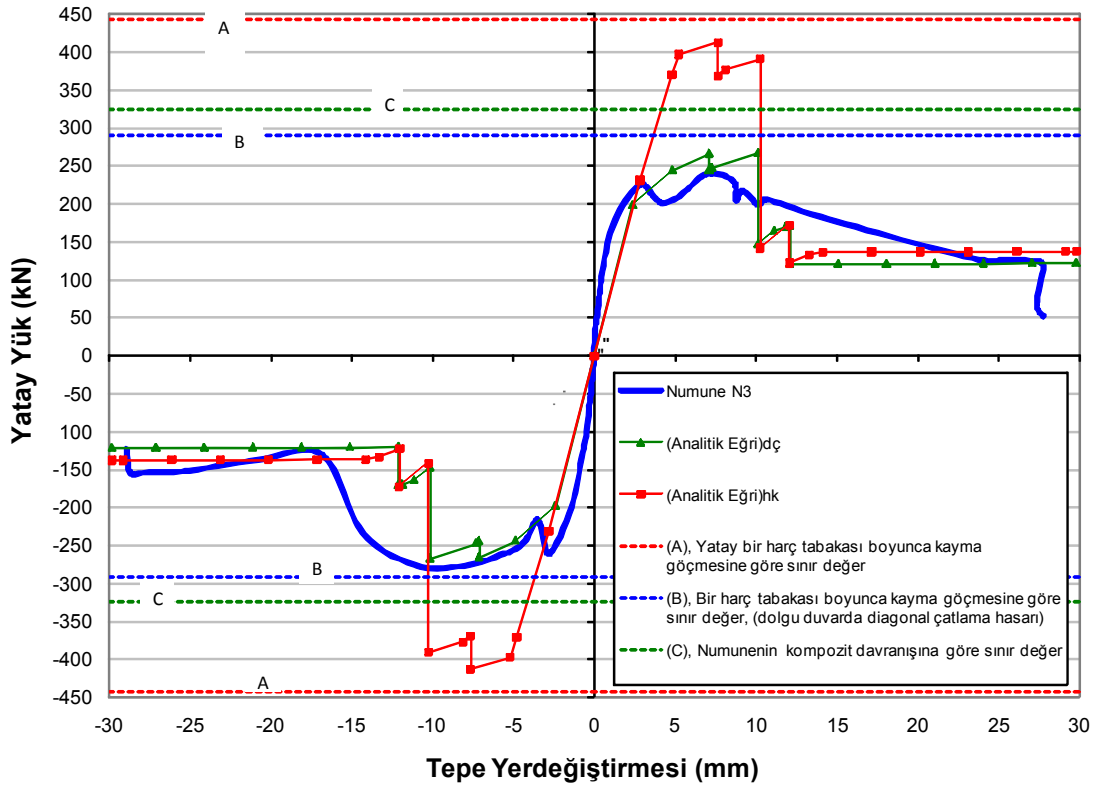
İlk olarak numunenin yatay bir harç tabakası boyunca kayarak gűçebileceđi kabul edilmiştir, (Bknz. Şekil 6.22-24, (A)). Bu durumda numunenin yatay yűk kapasitesine katılan bűyűklűkler; iki kolon kesitinin kayma yűkű kapasitesi, dolgu duvarın tűm genişıliđi boyunca harç tabakasından kayma yatay yűk kapasitesi ve diyagonal çekme etkisindeki CFRP řeritin çekme kuvveti kapasitesinin yatay bileşenidir.

İkinci yatay yűk taşıma kapasitesi sınır durumunda, yine bir harç tabakası boyunca kayma gűçme şekli varsayımı ile hesap yapılmıř, fakat dolgu duvar yatay yűk kapasitesi farklı hesaplanmıřtır. Buna göre dolgu duvarın eřdeđer basınç diyagonalı ile taşıdığı aksenal yűkűn yatay bileşeni, duvar yatay yűk kapasitesi olarak sečilmiştir, (Bknz. Şekil 6.22-24, (B)).

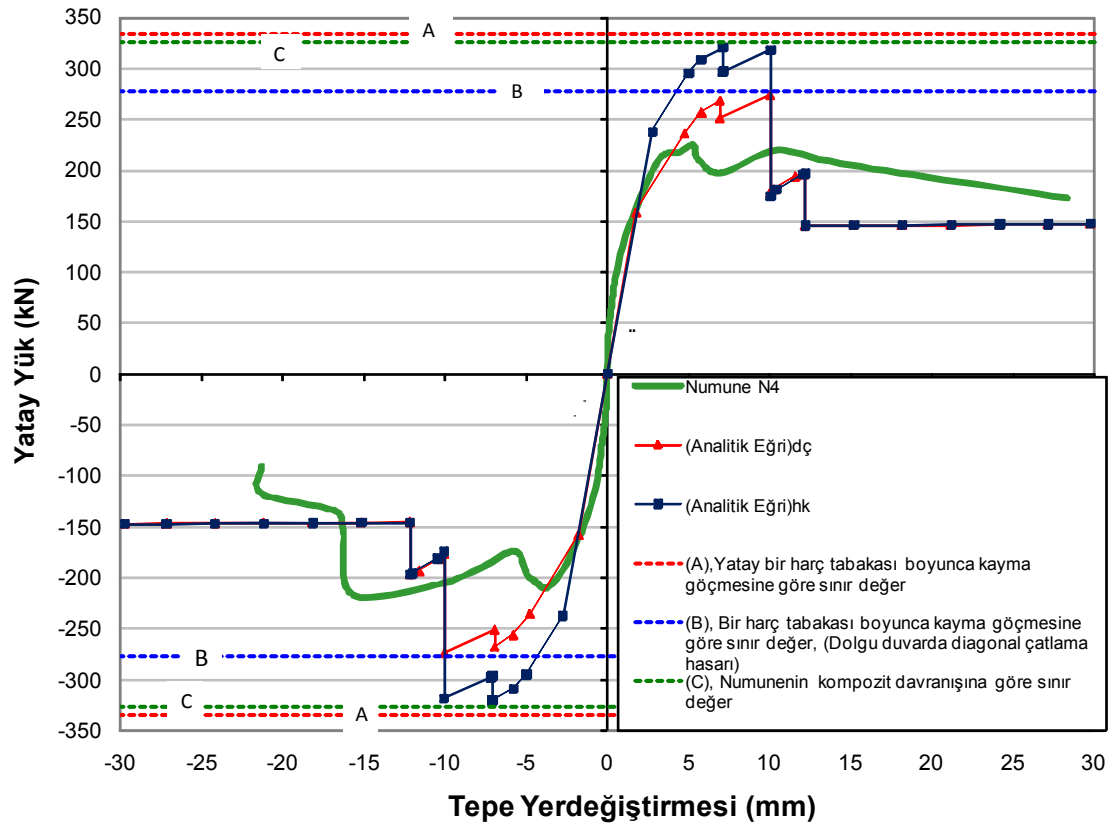
űçűncű olarak gűzűnűne alınan gűçme şekli, numunede dolgu duvarlar ve çerçevenin tam bűtűnleşik olması durumdaki bűtűnleşik davranıřtır, (Bknz. Şekil 6.22-24, (C)).



Şekil 6.22 : Numune N2'nin yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.



Şekil 6.23 : Numune N3'ün yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.



Şekil 6.24 : Numune N4'ün yapısal model sonuçlarının değerlendirilmesi.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizde yaygın olarak kullanılan gevrek ve taşıyıcı olmayan dolgu duvarların yüzeylerine karbon lifli polimer kompozit (CFRP) yapıştırılarak yatay yük taşıyıcı hale getirilmesi ve bu yolla sistemin depreme karşı güçlendirilmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, CFRP şeritlerin farklı uygulama şekilleri ve bağlantı detayları deneysel çalışmalarla basitten karmaşığa doğru bir yol izlenerek araştırılmıştır.

7.1 Deneysel Çalışmanın Özeti ve Sonuçları

Deneysel ağırlıklı olan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, 31 adet dolgu duvar numunesinin basit kayma deneyleri yapılmıştır. Küçük ölçekli bu deneylerin amacı, CFRP'nin sıvalı veya sıvasız dolgu duvar üzerine uygulanmasının etkisini gözlemlemek, CFRP ile güçlendirmenin dolgu duvarın kayma dayanımına ve rijitliğine katkısını anlamak, farklı CFRP güçlendirme şekillerinin etkinliğini karşılaştırmaktır. Bu çalışmalar Bölüm 3.2'de ayrıntıları ile yer almaktadır ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Sıvalı dolgu duvar numunelerinin başlangıç rijitlikleri, sıvasız numunelerin başlangıç rijitliklerinden yüksektir. Sıvalı numunelerin düşey yük taşıma kapasiteleri, sıvasız numunelerin düşey yük taşıma kapasitelerinin 2.5 katına kadar çıkmaktadır. CFRP'nin sıvalı yüzeye uygulandığı numunelerde, büyük düşey yük değerlerine kadar sıva ve CFRP'nin ayrılmadan birlikte çalıştığı gözlenmiştir. CFRP'nin sıvalı duvar üzerine uygulanması bu açıdan hem kolaylık hem de etkinlik sağlamaktadır.
- CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin yük taşıma kapasitelerini etkileyen en önemli faktörün CFRP genişliği olduğu, ancak CFRP ankraj biçiminin sonuçlar üzerinde etkisi olmadığı gözlenmiştir. CFRP, genel olarak göçme şekli üzerinde etkilidir. Dolgu duvar numunelerinin göçme şekilleri incelenmiş ve detaylı olarak sunulmuştur, Bölüm 3.2.4.

- Sürekli harç tabakalarına CFRP yerleştirilerek yapılan güçlendirmenin, başlangıç rijitliği ve yük taşıma kapasitesine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu tip güçlendirmede göçme bir harç tabakası boyunca duvarın kaymasıyla olarak duvarın parçalanmasını önlemiştir. Ancak bu deneylerin daha büyük numuneler üzerinde tekrarlanmasında yarar olduğu düşünülmektedir.
- Epoksi tipinin düşey yük taşıma kapasitesine ve başlangıç rijitliğine önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.
- Deney verilerinden, düşey yük-düşey yerdeğiştirme ($P-\Delta$) ve kayma gerilmesi-kayma şekildeğiştirmesi ($\tau-\gamma$) diyagramları elde edilmiştir. Numunelerin kayma modülü (G) ve en büyük gerilme değerine karşı gelen şekildeğiştirme (ε_{max}) değerleri hesaplanarak verilmiştir. Dağılım gösteren bu değerler için Bölüm 3.2.3 ve 3.2.5'e bakınız.
- Deney verileri işlenerek, istatistiksel yöntemlerle yük-düşey yerdeğiştirme arasındaki bağlantılar iki doğru ile ifade edilmiştir, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Bu şekliyle yapısal modellerde daha rahat kullanılabileceği düşünülmektedir.
- Numunelerin eşdeğer elastisite modülü (E_e) değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Buna göre duvar üzerindeki sıvanın elastisite modülüne etkisinin dikkate alınmasının gerekli olduğu açıkça görülmüştür. Sıvalı güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerin eşdeğer elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yapılan değerlendirmelere göre eşdeğer elastisite modülü değerlerinin güçlendirilmemiş sıvasız numuneler için 2500 MPa, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş sıvalı numuneler için 6000 MPa değerlerine kadar numune kararlılıklarını koruyarak yükselebildiği görülmüştür. Genellikle iki eksenli gerilme durumuna maruz olan dolgu duvarlar için bu beklenen bir sonuçtur. Buna göre “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (2007)’de boşluklu fabrika tuğlası için elastisite modülü için önerilen 1000 MPa değeri biraz konservatif bulunmuştur.
- İki eksenli gerilme etkisindeki dolgu duvar numunelerinin eşdeğer basınç dayanımları (f_{me}) hesaplanmıştır, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Bu sonuçlara göre

sıvasız güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerin ortalama f_{me} değeri 2 MPa, sıvalı güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş numunelerin ortalama f_{me} değeri 5 MPa olarak alınabileceği görülmüştür. “DBYBHY” (2007)’de boşluklu fabrika tuğlası için önerilen basınç dayanımı 1.0 MPa’dır. Deneysel sonuçlar, basınç dayanımı için yapılan bu varsayımın da konservatif olduğunu düşündürmektedir.

- Numunelerin eşdeğer kayma dayanımları (τ_{me}) hesaplanarak sunulmuştur, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Eşdeğer kayma dayanımları, iki eksenli gerilme etkisindeki numunelerin kayma gerilmesi-basınç gerilmesi eğrisinde, basınç ve kayma gerilmelerinin eşit olduğu noktadaki değerleri temsil etmektedir. Güçlendirilmiş numunelerde azalan CFRP genişliği ile eşdeğer kayma dayanımlarının da azaldığı görülmüştür. Ama bunun genellenebilmesi için değerlendirilen numune sayısının daha fazla olması gerekmektedir. Ayrıca sıvasız numunelerin sürekli harç tabakasının içerisine CFRP yerleştirilerek güçlendirilmesi ile eşdeğer kayma dayanımlarının arttığı görülmüştür.

Deneysel çalışmanın ikinci aşaması, çevrimsel yatay yükler etkisinde denenen iki grup betonarme çerçeve deneyini kapsamaktadır. İlk kısımda altı adet ½ ölçekli tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyi yapılmıştır. İki adet dolgu duvarsız betonarme çerçeve ve bir adet sıvalı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri referans numuneleridir. Diğer üç sıvalı dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunesi CFRP ile güçlendirilmiştir. Herbir güçlendirilmiş numunede, dolgu duvar üzerine diyagonal olarak yapıştırılan CFRP’nin uygulama şekli ve betonarme çerçeveye bağlantısı farklıdır. Bu deneylerin ayrıntıları Bölüm 4’te yer almaktadır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ve yapılan gözlemler ile ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Dolgu duvarlı referans numunede, küçük yerdeğiştirme adımlarında dolgu duvar çerçevenin yük taşımasına katkıda bulunmasına rağmen, duvarın üst kısımlarında hasar meydana gelmesinden sonra çerçeve-duvar arasında yük aktarmada azalma olmuştur. Güçlendirilmiş numunelerin hepsinde dolgu duvar-çerçeve arasında yük aktarımının ileri yerdeğiştirme adımlarına kadar devam ettiği gözlenmiştir.

- Dolgu duvarın iki yüzüne yapıştırılan CFRP şeritler, CFRP ankraj elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Deneylerde bu CFRP ankraj elemanlarının çok iyi çalıştığı ve göçmeye kadar bu bağlantının sürdüğü görülmüştür. Ayrıca CFRP ankraj elemanları dolgu duvar üzerindeki, epoksi sürüldükten sonra bir ölçüde gevrekleşerek rijitleşen CFRP şeritlerin burkulma boyunu da kısaltmaktadır. Ancak buna rağmen duvar üzerindeki CFRP şeritlerin basınç etkisinde kolayca kırıldığı, hatta ağır hasar görerek koptuğu görülmüştür.
- Dolgu duvarın iki diyagonalı doğrultusunda yapıştırılan CFRP şeritler çerçeve elemanlarına iki farklı bağlantı detayı ile bağlanmışlardır ve yük aktarımı her iki bağlantı detayı ile de göçmeye kadar başarı ile sağlanmıştır. Bu konuda ayrıntılar Bölüm 4.3.6’da yer almaktadır.
- Dolgu duvar üzerindeki CFRP, duvarın taşımadığı çekme gerilmelerini almış, ayrıca çerçeve-dolgu duvar arasında göçmeye kadar yük aktararak sistemin bir bütün olarak çalışmasını sağlamıştır. Bunun yanısıra, duvara epoksi ile yapıştırılan CFRP’nin her ne kadar basınç gerilmeleri taşımadığı düşünülse de dolgu duvar elemanlarının bir arada tutulmasını ve basınç gerilmelerinin daha geniş bir alan üzerinde yayılmasını sağlayarak basınç gerilmelerinin taşınmasına da katkıda bulunmuştur.
- CFRP’nin epoksi ile duvar yapıştırılmadığı N4 numunesinde çekme gerilmeleri altında CFRP’nin yük taşıması çok net olarak gözlenebilmiştir. Bu durumda CFRP sadece çekme gerilmelerini almış ve dolgu duvarda daha az hasar gözlenmiştir, (Bknz. Bölüm 4.3.6).
- CFRP ile bu çalışmada yapıldığı gibi güçlendirmenin sisteminin taşıdığı en büyük yatay yük değerini arttırdığı gözlenmiştir. Bu artış oran olarak ifade edilirse, dolgu duvarlı numune N1 ve güçlendirilmiş numuneler N2, N3 ve N4’ün yatay yük taşıma kapasiteleri dolgu duvarsız numune 2’nin en büyük yatay yük değerinin yaklaşık olarak, sırasıyla, 1.4, 2.5, 2.0 ve 1.73 katıdır. Güçlendirilmiş N2, N3 ve N4 numunelerinin en büyük yatay yük değerleri, N1 numunesinin en büyük yatay yük değerinin yaklaşık olarak, sırasıyla, 1.79, 1.44 ve 1.23 katıdır. Bu karşılaştırmalar değerlendirilirken, numunelerin beton, harç ve sıva dayanımlarındaki farklılıklar gözönüne alınmalı ve verilen oranların kesin değerler değil, sadece fikir verme amaçlı olduğuna dikkat edilmelidir.

- Numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirme zarf eğrileri iki doğrulu olarak idealleştirilmiştir. İki doğrulu idealleştirmiş eğriyi tanımlayan noktalar, yük-yerdeğiştirme eğrilerinin özellikleri gözönüne alınarak belirlenmiştir, (Bknz. Bölüm 4.4.1 ve 4.4.3). Bu idealleştirme yapılırken belirlenen “Öngörülen göçme yükü” (P_{G2}) enerji eşitliğinin yaklaşık olarak sağlanmış olduğu, deneysel gözlemlere ile izlenmiş ve şekildeğiştirme ile yerdeğiştirmelerin sınırlı büyüklüklere ulaştığı özel bir yük değeridir. Bütün numunelerin en büyük yatay yük, önerilen göçme yükü, göçme yükü değerleri ve bunlara karşı gelen yerdeğiştirmeler ile görelı kat ötelemesi oranları sunulmuştur, (Çizelge 4.2).
- Güçlendirilmiş numunelerin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinde kritik noktaların karşılığı olan görelı kat ötelemesi oranları ile “DBYBHY” (2007)’de sayısal hesabı doğrusal elastik yöntemle yapılan kolon ve perdeler için verilen hasar sınırı görelı kat ötelemesi oranları ile karşılaştırılmıştır, (Bknz. Bölüm 4.4.1). Buna göre önerilen göçme yükü düzeyine daha erken görelı kat ötelemesi oranı değerlerinde ulaşıldığı görölmektedir. Dolayısıyla eksenel kuvvetin ikinci merteye etkileri açısından daha kararlı bir durum ortaya çıkmaktadır. Buna ilave olarak önerilen göçme yükünün en büyük yatay yükün %85’inden daha aşağıya düşmemiş olması da yönetmelikte eleman bazında yapılan güçlendirilmiş dolgu duvar hasar sınırı görelı kat ötelemesi oranı değerlerinin biraz daha büyütebileceğini işaret etmektedir. Bu durum FEMA’nın çalışmalarında yığma duvarlar için öngörülen sınırlarla da uyum iğerisindedir.
- Deneysel veriler ile numunelerin başlangıç rijitliği, tepe noktaları rijitliği, etkin rijitlikleri, eşdeğer süneklik değerleri, kuvvet azaltma çarpanları, enerji yutma kapasiteleri ve çevrimsel sönüm değerleri hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir, (Bknz. Bölüm 4.4). Ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.
 - Beklenildiği gibi dolgu duvarların CFRP ile bu çalışmada yapıldığı gibi güçlendirilmesi halinde başlangıç rijitliğinin arttığı görölmektedir. Bu rijitlik artışına karşı sistem davranışı ve alınacak mühendislik önlemleri Bölüm 4.4.2’de tartışılmıştır.

- Tepe noktalarına karşı gelen rijitlikler incelendiğinde sistem, yapılan güçlendirme tipinden bağımsız olarak kararlı görünmekte ve ani düşüşler sergilememektedir. Bu yeniden boyutlandırma açısından önemlidir.
- Numunelerde, sistemde yatay yükün en büyük yükün %85'ine kadar düştüğü, başka bir deyişle kararlı kaldığı yerdeğiştirme değerine karşı gelen etkin rijitlikleri (K_{etk}) hesaplanmıştır. Bütün numunelerde etkin rijitliklerin başlangıç rijitliklerinin yaklaşık olarak %10'u mertebesinde olduğu görülmektedir.
- İki doğrulu olarak idealleştirilmiş yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak numunelerin eşdeğer süneklik değerleri hesaplanmıştır, (Bknz. Bölüm 4.4.3). Dolgu duvarsız numune, dolgu duvarlı numune ve güçlendirilmiş numune N2'de eşdeğer süneklik değerleri yaklaşık olarak 8 mertebesinde. Güçlendirilmiş numuneler N3 ve N4'te ise süneklik değeri yaklaşık olarak 12'dir. Farklı kaynaklardaki süneklik tanımları değişiklikler göstermekte ve deneysel çalışmalarda bu tanımları yapmakta güçlükler bulunmaktadır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından literatürde süneklik için kullanılan farklı tanımlara göre de süneklik değerleri hesaplanmıştır, (Çizelge 4.2).
- Deneyler çerçeve ile bütünleşmiş olan dolgu duvarlarından oluşan sistemin, daha çok donatılmış duvar davranışına yakın bir davranış sergilendiğini göstermektedir. Böyle bir durumda enerji eşitliğine dayalı olarak çalışmak, yerdeğiştirme eşitliğine dayalı olarak çalışmaktan daha gerçekçi görünmektedir. Çünkü esnek olamayan yapı sistemine doğru rijitlikler artmakta, periyotlar kısalmakta ve büyük olasılıkla yerdeğiştirme eşitliğinden enerji eşitliği bölgesine girilmektedir. Başka çalışmalarda ele alınan ve dolgu duvarlı çerçevelerden daha esnek olan tekil prefabrik kolonlarda dahi yerdeğiştirme eşitliğinin olmadığı durumlar gözlenirken, (Yüce, 2009), burada enerji eşitliğine doğru gitmek daha doğru bir yaklaşımdır.
- İdelleştirilmiş yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrilerinde enerji eşitliği prensibine dayanarak kuvvet azaltma çarpanları (R) değerleri hesaplanmıştır. R değerlerinin dolgu duvarsız numune 2 ve dolgu duvarlı

numune N1 referans numunelerinde 4 mertebesinde, güçlendirilmiş numunelerde ise 4-5 arasında değişmektedir, ayrıntılar için Bölüm 4.4.4'e bakınız. Bu değerler, yönetmeliklerce öngörülen değerlerin üzerindedir.

- Dolgu duvarsız numunelerin enerji yutma değerleri dolgu duvarlı numunelere göre oldukça düşüktür. Güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma değerleri ile dolgu duvarlı referans numunenin enerji yutma değerleri arasında çok önemli bir fark görülmemiştir, (Bknz. Bölüm 4.4.5).
- Dolgu duvarsız numunelerin çevrimsel sönüm (ξ_{hyst}) değerleri %5 düzeylerinde olup, deney boyunca büyük değişim göstermemişlerdir. Dolgu duvarlı numunelerde ise ξ_{hyst} değeri ortalama olarak %10 düzeylerindedir. Ayrıntılar için Bölüm 4.4.6'ya bakınız.
- Dolgu duvarların CFRP ile bu çalışmada yapıldığı şekilde güçlendirilmesi durumunda numunelerin davranışları ve hasar durumları güçlendirilmemiş numunelerden oldukça farklı olmaktadır. Bu konudaki detaylar Bölüm 4.4.7'de anlatılmaktadır. Dolgu duvarın CFRP ile güçlendirilmesi ve CFRP şeritlerin çerçeve elemanlara ile bağlanması, sistemin kompozit bir kesit gibi davranmasına sebep olmuştur. CFRP elemanlar ile kolonlara yük aktarılması sebebi ile kalıcı şekildeğiştirmeler önemli oranda kolonlara aktarılmıştır.
- Deneyler çerçeve elemanları ve güçlendirilmiş dolgu duvarın birlikte davranışının sağlanabileceğini göstermektedir. Bu birlikte davranışın en önemli özelliği dolgu duvardan önce tekil çubuklar olan kolon ve kirişin artık serbestçe şekil değiştiremeyeceğidir. Böyle bir durumda yapısal modelde yeralacak elemanların birbirinden ayrık elemanlar olması gözlenilen davranışla uyum içinde olamaz. Başka bir deyişle, dolgu duvarsız çerçeve davranışında alınan deformasyon sınırlarını güçlendirilmiş dolgu duvarlı durumda geçerli saymak mümkün değildir.
- Güçlendirilmiş numunelerin hepsinin hasar adımları bir çizelgede toplanarak bir hasar durum çizelgesi hazırlanmıştır. Hasar durum çizelgesinde sistem elemanları ayrı ayrı ele alınmış ve her bir görelî kat ötelemesi oranı adımıyla gözlenen hasarlar kayıt edilmiştir. “DBYBHY” (2007)'de güçlendirilmiş dolgu duvarlar ve doğrusal elastik yöntemle yapılan hesap için kolon ve

perdeler için hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları ve FEMA 306 (1998)'da dolgu duvarlar için verilen davranış sınırları da hasar durum çizelgesinde yer almaktadır. Verilen bu sınırlara göre bir değerlendirme yapılmıştır, (Bknz. Bölüm 4.4.8).

İkinci kısımda sekiz adet ½ ölçekli iki katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numune çevrimsel yatay yükler etkisinde denenmiştir. İki katlı-tek açıklıklı numunelerin deneyleri, NATO Sfp-977231 projesi kapsamında yapılmıştır. Bu numunelerin bir grubunda kolon düşey donatıları sürekli, diğer grupta ise kat seviyelerinde bindirmeli eklidir. Sıvalı dolgu duvarlı numunelerde iki farklı CFRP güçlendirme şekli uygulanmıştır. Deneysel çalışmanın ayrıntıları Bölüm 5'te yer almaktadır. Deneysel sonuçlar tek katlı-tek açıklıklı deneylerden elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde. Özetle söylemek gerekirse;

- Dolgu duvarsız numunelerde hasar kolon-kiriş düğüm noktalarında ve birinci kat kolonlarının alt uçlarında yoğunlaşmıştır. Dolgu duvarlı numunelerde ise birinci kat kolonlarındaki eğilme çatlakları kolon boyunca yayılı durumdadır. Bu hasar şekilleri, dolgu duvarsız numunelerde çerçeve tipi davranış olduğu, numunelere dolgu duvar eklenmesi ile sistemin daha çok bir perde davranışına yaklaşmasına neden olduğunu ve bütünleşik bir kesit gibi çalıştığını göstermektedir.
- Deneysel gözlemler dolgu duvarın tek yüzüne CFRP uygulamasında, duvarın üzerindeki diyagonal CFRP'nin, CFRP ankrajlar ile diğer yüzdeki sıvanın üzerine bağlanmasının önemini göstermiştir.
- Çerçeve elemanlarında ve temelde yeterli derinlikte ve özenli üretilmiş CFRP ankraj elemanları göçmeye kadar beklenen davranış yerine getirmişlerdir. Temele yapılan CFRP ankraj derinliklerinin yetersiz olduğu numunenin deneysel sonuçları, CFRP uygulamasının, özellikle ankrajların, özenli yapılmamasının sistem davranışını ve göçme şeklini değiştirebildiğini göstermiştir.
- CFRP güçlendirmesinin dolgu duvarın tek yüzüne iki kat olarak yapıldığı numunelerde, tek yüze uygulamanın oldukça etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirmenin dolgu duvarların iki yüzüne birer kat (C1) ve tek yüzüne iki

kat (C2) uygulandığı numuneler karşılaştırıldığında yatay rijitlik ve taşınan en büyük yatay yük değeri açısından önemli bir fark gözlenmemiştir.

7.2 Teorik Çalışmanın Özeti ve Sonuçları

Sınırlı sayıdaki deneysel çalışma sonuçlarını genelledebilmek amacıyla, deneylerle ulaşılan sonuçlara teorik yoldan da yaklaşmak önemlidir. Bu amaçla çalışmanın son bölümünde, güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerinin yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi bağıntılarına teorik yoldan da ulaşmak üzere aşağıda özetlenen çalışmalar yapılmıştır.

İlk olarak “DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara bağı kalınarak tek katlı-tek açıklıklı dolgu duvarsız betonarme çerçeve numunesinin yapısal modeli hazırlanmıştır, (Bknz. Bölüm 6.1). Malzeme özellikleri, çatlamış kesit eğilme rijitliği gibi parametreler deneysel sonuçlarına göre değerlendirilerek modelde kullanılacak yaklaşımlar seçilmiştir. Yapısal modelde, malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı gözönüne alan plastik mafsalsal hipotezi kullanılmış ve artımsal itme analizi yapılmıştır.

Dolgu duvarsız betonarme çerçeve modelinin etkinliği deneysel veriler ile yeterli düzeye getirildikten sonra, güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş dolgu duvarlar da yapısal modele eklenmiştir. Güçlendirilmiş dolgu duvarlar birer adet diyagonal eşdeğer basınç ve çekme çubukları ile modellenmiş ve model gerekli büyüklükleri “DBYBHY” (2007)’de önerilen esaslara göre hesaplanmıştır, (Bknz. Bölüm 6.1.2 ve 6.1.3). Yapısal model analitik sonuçları, numunelerin deneysel yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri ile karşılaştırılarak aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- “DBYBHY” (2007)’ye göre eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin tanımlanmasında gerekli olan en büyük yerdeğiştirme sınırını belirlemekte bazı zorluklar olduğu görülmüştür. Buna göre “DBYBHY” (2007)’de ve FEMA 356 (2000)’da verilmiş olan performans ve yerdeğiştirme sınırları ile birer eksenel en büyük yerdeğiştirme sınırı belirlenmiştir. Ayrıca tek katlı-tek açıklıklı çerçeve numunelerin deney verilerinin değerlendirilmesi ile bir yerdeğiştirme sınırı daha seçilmiştir. Belirlenen bütün yerdeğiştirme değerleri kullanılarak analitik çözümleri ayrı ayrı yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır, (Bknz.

Bölüm 6.1.2.2). Buna göre deneysel sonuçların değerlendirilmesinden elde edilen yerdeğiştirmelerin kullanılmasının uygun olabileceğine karar verilmiştir.

- “DBYBHY” (2007)’de eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük ve yerdeğiştirme değerlerinin hesaplanması için kullanılan yaklaşımlar ile dolgu duvar üzerinde uygulanan CFRP şeritlerin etkisi, sonuçları etkiliyor olmakla birlikte, dikkate alınamamaktadır. CFRP şeritlerinin çerçeve elemanlarına bağlantı farklılıkları da öngörölen ifadelerde yer almamaktadır.
- “DBYBHY” (2007)’de önerilen dolgu duvar malzeme değerleri, güçlendirilmiş dolgu duvarları oluşturan sıva, tuğla ve CFRP unsurlarından sadece tuğla elemanların ilgili malzeme özelliklerini dikkate almaktadır. Bölüm 3 ve 4’te sunulmuş olan deney sonuçları, dolgu duvar üzerindeki sıvanın ve CFRP şeritlerin duvarların basınç dayanımına olumlu katkısı olduğunu göstermiştir. Modelde eşdeğer basınç çubuğuna bu katkıların yansıtılmasının yerinde olacağı öngörülmektedir.
- Güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin yapısal modeli “DBYBHY” (2007)’deki esaslara göre hazırlandığında hesaplanan başlangıç rijitliği ve en büyük yatay yük değerlerinin, deneysel sonuçlara yeteri kadar yakın olmadığı görölmektedir, (Bknz. Bölüm 6.1.3 ve 6.1.4).
- Güçlendirilmiş dolgu duvarlı numuneler için yaklaşık bir hesap yapılarak, dolgu duvarlara CFRP uygulanmasının yatay yüke katkısı incelenmiştir, (Bknz. Bölüm 6.1.4). Sonuçların değerlendirilmesiyle, numunelerde uygulanan CFRP şeritlerin çekme kapasitelerinin etkin biçimde kullanılmadığı görölmüştür. Ayrıca taşıma kapasitesine kadar zorlanmadığı açık olan CFRP şeritlerinin deneyin ileri adımlarında kopmakta oluşuna dikkat çekilmiştir. Çekme kapasitesine ulaşmadan ortaya çıkan kopma, CFRP şeritlerin epoksi uygulanması ile gevrekleşiyor olması ve çevrimsel yatay yükleme altında basınç etkisinde kaldığı zaman burkulmadan da zarar görebileceği anlamına gelmektedir.

Teorik çalışmanın bir sonraki aşamasında güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin yapısal modeli kurulmuştur, (Bknz. Bölüm 6.2). Kullanılan yapısal model, “DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara göre hazırlanan model temel alınarak ve

deneysel sonuçların değerlendirilmesiyle hazırlanmıştır. Yapısal model hazırlanırken önceki çalışmalarda önerilen modeller ve deneysel veriler de dikkate alınmıştır. Kullanılan yapısal modelde, betonarme çerçeve elemanları için “DBYBHY” (2007)’de verilen esaslara uyulmuş ve deneysel gözlemlere bağlı olarak bazı değişiklikler yapılmıştır.

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvar diyagonal bir eşdeğer basınç ve bir eşdeğer çekme çubuğu ile modellenmiştir. Eşdeğer basınç ve çekme çubuklarının tanımlanması için gerekli parametreler açıklanmış ve önceki çalışmaların sonuçları da bu doğrultuda incelenmiştir, (Bknz. Bölüm 6.2.1) . Bu parametreler için seçilmiş olan büyüklükler detaylı olarak anlatılmış ve tartışılmıştır. Buna göre;

- Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde dolgu duvarın göçme şekli etkili olmaktadır. Buna göre güçlendirilmiş tek katlı-tek açıklıklı numunelerin göçme şekilleri kısaca özetlenerek, önceki deneysel çalışmalarda elde edilen göçme şekilleri ile beraber verilmiştir, (Bknz. Bölüm 6.2.1.1).
- Eşdeğer basınç çubuğu için seçilen eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi ve sınır değerlerinin belirlenmesi Bölüm 6.2.1.2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç bölgesi iki doğrulu olarak seçilmiştir. Bu yaklaşıma, dolgu duvarların basit kayma deneyleri verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlara göre karar verilmiştir, (Bknz. Bölüm 3.2.5). Buna göre dolgu duvarın güçlendirilmiş olup olmamasına bağlı olarak, eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi başlangıç doğruları ve kritik yerdeğiştirme sınırları farklı değerler almaktadır.
- Kullanılan bilgisayar programındaki kısıtlamalar gözönüne alınarak eksenel yük-yerdeğiştirme için basitleştirilmiş bir eğri daha önerilmiş ve iki durumun analitik sonuçları karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçlar, en büyük yatay yük ve başlangıç rijitliklerinin yakın değerler olmasından dolayı, öngörülen her iki eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin de kullanılabileceğini göstermiştir.
- Eşdeğer basınç çubuğu eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin en büyük ve sonuç yerdeğiştirme değerleri için tek katlı-tek açıklıklı deney sonuçlarının değerlendirmelerine göre belirlenen büyüklükler verilmiştir. Ayrıca eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin düşüş kolu için de tek katlı-tek açıklıklı deney

sonuç değerlendirmelerinden yararlanarak bir yaklaşım yapılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğunda eksenel yük kapasitesi, iki farklı göçme şekline göre hesaplanmakta ve bunlardan küçük olanı eksenel yük kapasitesi olarak seçilmektedir. Hesaplamaların detayları Bölüm 6.2.1.2’de verilmiştir.

- Eşdeğer basınç çubuğu için hesaplamalarda, basit kayma deneylerinden belirlenen güçlendirilmiş dolgu duvar malzeme özellikleri kullanılmıştır, (Bknz. Bölüm 3.2.5).
- Eşdeğer çekme çubuğunun eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi, FRP malzeme özellikleri gözönüne alınarak doğrusal elastik seçilmiştir. Bu durum tek katlı-tek açıklıklı numune deneylerinde gözlenen göçme şekline de uygundur. Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisi yerdeğiştirme sınır değeri de yine deneysel sonuçlara göre belirlenmiştir, (Bknz. Bölüm 6.2.1.3).

CFRP ile güçlendirilmiş numuneler için hazırlanan yapısal modelin analitik sonuçları deneysel eğriler ile karşılaştırılmış ve aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır, (Bknz. Bölüm 6.2.2).

- Yapısal modelin taşınan en büyük yatay yük değeri açısından deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Analitik yoldan hesaplanan en büyük yatay yük değerinin, deneysel en büyük yatay yük değerine oranları güçlendirilmiş numuneler N2 ve N3’te, sırasıyla, 0.85 ve 1.0 mertebesinde değerler almaktadır. “DBYBHY” (2007)’te verilen esaslara göre kurulan yapısal modelde ise bu değerler, sırasıyla, 0.50 ve 0.70 olmaktadır. Dolgu duvara uygulanan CFRP’nin duvar üzerine yapıştırılmadığı numune N4’te ise yapısal model en büyük yatay yük değerini yaklaşık olarak %20 fazla tahmin edilmektedir.
- Kullanılan yapısal model, güçlendirilmiş numunelerin başlangıç rijitliklerini deneysel verilere, “DBYBHY” (2007)’teki esaslara göre yapılan modele oranla, daha yakın olarak hesaplayabilmektedir.
- Malzeme karakteristikleri ve yapısal özellikleri birbirinden farklı elemanların oluşturduğu CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeveleri yatay yük taşıma kapasitelerinin saptanması doğal olarak farklı göçme biçimlerinin gözönünde bulundurmasını gerektirmektedir. Bu göçme biçimleri kestirilerek taşıma kapasiteleri için olası bazı alt ve üst sınırlar tarif

etmek mühendislik açısından önemlidir. Yapılan bazı varsayımlara dayalı olarak ulaşılan yatay yük taşıma kapasitesi sınır değerleri, deneysel yük-yerdeğiştirme bağıntıları üzerinde yatay doğrular ile beraber sunulmuştur.

7.3 Genel Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu çalışmada, deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar yukarıda özetlenmiştir. CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yükler etkisindeki davranışlarının, dolgu duvarların *genişlik/en oranı*, *çerçeve elemanları ve dolgu duvar yatay yük kapasitelerinin oranları*, *dolgu duvar elemanlarının malzeme dayanımlarının oranları*, *güçlendirme uygulama şekilleri* gibi bir çok parametreye bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışmadaki deneysel ve teorik çalışmaların, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin belirli bir tipi için değerlendirmeler vermekte olduğuna dikkat edilmesi çok önemlidir.

CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışlarının teorik olarak genellenebilmesi için farklı parametrelere sahip deneysel çalışmaların birlikte incelenmesi gerekmektedir. Bu konuda mevcut sınırlı sayıdaki deneysel ve teorik çalışmanın sonuçlarının, deneysel farklılıklar ve parametreler ortaya konularak biraraya getirilmesi ve bir veritabanı oluşturulmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Böylece genel bir teorik değerlendirme için eksik olan numune tipleri de belirlenip, deneyleri yapılabilecektir. Bu veritabanı kullanılarak, CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve teorik sonuçları genellenebilecek ve dolgu duvarlı çerçevelerde olduğu gibi farklı parametrelere sahip sistemler için daha güvenilir hesaplamalar yapılabilecektir.

Burada verilen deneysel çalışmada, dolgu duvarların CFRP ile çalışmada belirtilen şekillerde güçlendirilmesi durumunda, betonarme çerçeve kolonlarında ciddi kayma hasarları olduğu gözlenmiştir. Bu gevrek kırılma şekli çok dikkatli değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Bu nedenle çalışmada belirtilen şekilde güçlendirilmiş betonarme çerçevelerde, kolonların kesme kuvveti etkisindeki davranışlarının iyi gözlenmesi ve gerekli kontrollerin mutlaka yapılması gerektiği konusuna bir kez daha dikkat çekilmek istenmiştir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 440**, 2001. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Revised 26 October 2001, USA.
- Akgüzel, U.**, 2003. Seismic Retrofit of Brick Infilled R/C Frames with Lap Splice Problem in Columns, *MSc. Thesis*, Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- Al-Chaar, G.K. and Lamb, G.E.**, 2002. Design of Fiber-Reinforced Polymer Materials for Seismic Rehabilitation of Infilled Concrete Structures, *US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Report, ERDC/CERL TR-02-33*, p. 83.
- Almusallam, T.H. and Al-Salloum, Y.A.**, 2007. Behavior of FRP Strengthened Infill Walls Under In-Plane Seismic Loading, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.11, No 3, pp. 308-318.
- Altın, S., Anıl, Ö., Kara, M.E., Kaya, M.**, 2008. An Experimental Study on Strengthening of Masonry Infilled RC Frames Using Diagonal CFRP Strips, *Composites Part B : Engineering*, Vol.39, 4, pp. 680-693.
- ASTM C 1391-81**, 1981. (Reapproved 1993). *American Society for Testing and Materials*, USA.
- Benjamin, J.R. and Williams, H.A.**, 1958. The Behavior of One-Story Shear Walls, *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.84. No.ST4, paper 1723: 30.
- Binici, B. And Özcebe, G.**, 2006. Analysis of Infilled Reinforced Concrete Frames Strengthened with FRPS, in : *Advances in EQ Engineering for Urban Risk Reduction*, editors, Wasti S.T., Ozcebe G., NATO Science Series, Earth and Environmental Sciences, vol.66, pp. 455-471, Springer, The Netherlands.
- Binici, B., Özcebe, G., Özcelik, R.**, 2007. Analysis and Design of FRP Composites for Seismic Retrofit of Infill Walls in Reinforced Concrete Frames, *Composites : Part B Engineering*, 38(2007), pp. 575-583.
- Celep, Z.**, 2007. *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Deprem Yönetmeliği (2007) Kavramları*, Beta Dağıtım, p.144, İstanbul, Türkiye.
- Chaker, A.A. and Cherifati, A.**, 1999. Influence of Masonry Infill Panels on The Vibration and Stiffness Characteristics of RC Frame Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, pp. 1061-1065.
- Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A.**, 2002. Strengthening Techniques Tested on Masonry Structures Struck by The Umbria-Marche EQ Of 1997-1998, *Construction and Building Materials*, 16, pp. 229-239.

- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik**, 2007. *T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, Türkiye.
- El-Dakhakhni, W.W.**, 2002. Experimental and Analytical Seismic Evaluation of Concrete Masonry-Infilled Steel Frames Retrofitted Using GFRP Laminates, *PhD. Thesis*, Drexel University, Philadelphia, USA.
- El-Dakhakhni, W.W., Elgaaly, M., Hamid, A.A.**, 2003. Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames, *Journal of Structural Engineering*, Vol.129, No.2, pp. 177-185.
- El-Dakhakhni, W.W., Hamid, A.A., Elgaay, M.**, 2004. Seismic Retrofit of Concrete-Masonry-Infilled Steel Frames with Glass Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 130, No 9, pp. 1343-1352.
- El-Dakhakhni, W.W., Hamid, A.A., Hakam, Z.H.R., Elgaay, M.**, 2006. Hazard Mitigation and Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using Composites, *Composite Structures*, 73(4), pp. 458-477.
- ElGawady, M.A., Lestuzzi, P., Badoux, M.**, 2002. Dynamic In-Plane Behavior of URM Wall Upgraded Composites, *3rd ICCI*, San Francisco, California, USA, June 10-12.
- Erdem, I., Akyuz, U., Ersoy, U., Ozcebe, G.**, 2006. An Experimental Study on Two Different Strengthening Techniques for RC Frames, *Engineering Structures*, 28 (2006), pp. 1843-1851.
- Erol, G.**, 2001. Yüksek Mukavemetli Özel Tuğlalardan Yapılmış Duvarlarda Kayma Dayanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Erol, G., Demir, C., İlki, A., Yüksel, E., Karadoğan, H.F.**, 2006. Effective Strengthening of RC Frames with and without Lap Splice Problems, *8th National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, April 19-21.
- Erol, G., Taşkın, K., Yüksel, Karadoğan, H.F.**, 2005. Strengthening of Infilled RC Frames by CFRP, *Fifth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, Skiathos, Greece, 30 May - 1 June.
- Erol, G., Yüksel, E., Saruhan, H., Sağbaş G., Teymür Tuğa P., Karadoğan, F.**, 2004. A Complementary Experimental Work on Brittle Partitioning Walls and Strengthening by Carbon Fibers, *13th World Conference On Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.
- Ersin, U.D., Yüksel, E., Kocak, A., Hayashi, M., Karadoğan, F.**, 1998. System Identification by Means of Micro Tremor Measurements, *Repair and Strengthening of Existing Buildings, Second Japan-Turkey Workshop on EQ Engineering*, February, Volume I, pp. 633-648, Istanbul.
- Ersoy, U., Ozcebe, G., Tankut, T., Akyuz, U., Erduran, E., Erdem, I.**, 2003. Strengthening of Infilled Walls with CFRP Sheets, Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, *NATO Sfp 977231, International Advanced Research Workshop*, Izmir, Turkey, May 13-14.

- FEMA 306**, 1998. Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, *Applied Technology Council (ATC-43 Project)*, USA.
- FEMA 356**, 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, November, USA.
- FIB BULLETIN 14**, 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report, July, Switzerland.
- Flanagan, R.D., Bennett, R.M., Barclay, G.A.**, 1999. In-plane Behavior of Structural Clay Tile Infilled Frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **125(6)**, pp. 590-599.
- Gabor, A., Bennani, A., Jacquelin, E., Lebon, F.**, 2006. Modelling Approaches of The In-Plane Shear Behavior of Unreinforced and FRP Strengthened Masonry Panels, *Composite Structures*, **74(3)**, pp. 277-288.
- Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E., Hamelin, P.**, 2006. Analysis and Modeling of The In-Plane Shear Behavior of Hollow Brick Masonry Panels, *Construction and Building Materials*, **20(5)**, pp. 308-321.
- Hakam, Z.H.**, 2000. Retrofit of Hollow Concrete Masonry Infilled Steel Frames Using Glass Fiber Reinforced Plastic Laminates, *PhD. Thesis*, Drexel University, Philadelphia, USA.
- Hamid, A.A., El-Dakhakhni, W.W., Hakam, Z.H.R., Elgaay, M.**, 2005. Behavior of Composite Unreinforced Masonry-Fiber -Reinforced Polymer Wall Assemblages Under Inplane Loading, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. **9** , No **1**, pp. 73-83.
- Hanoğlu, K.B.**, 2002. Fiber Reinforced Plastic Overlay Retrofit of Hollow Clay Tile Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames, *PhD. Thesis*, Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- Haroun, M. A., and Ghoneam, E. H.**, 1997. Seismic Performance Testing Of Masonry-Infilled Frames Retrofitted By Fiber Composite, *Proc., Int. Modal Analysis Conf.—IMAC*, The International Society of Optical Engineering, Orlando, Fla., **2**, pp. 1650–1656.
- Hendry, A.**, 1981. *Structural Brickwork*, Macmillan, London, GB.
- Holmes, M.**, 1961. Steel Frames with Brick Work and Concrete Infilling, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol.**19**, pp. 473-478.
- Jai, J., Springer, G.S., Kollar, L.P., Krawinkler, H.**, 2000a. Reinforcing Masonry Walls with Composite Materials-Test Results, *Journal of Composite Materials*, Vol. **34**, No. **16**, pp. 1369-1381.
- Jai, J., Springer, G.S., Kollar, L.P., Krawinkler, H.**, 2000b. Reinforcing Masonry Walls With Composite Materials-Model, *Journal of Composite Materials*, Vol. **34**, No. **18**, pp. 1548-1581.
- Karadoğan, H.F. ve Yüksel, E.**, 2001. Bölme Duvarlı Betonarme Çerçeveler Üzerinde Gerçekleştirilen Bazı Deneysel Çalışmalar, *Mevcut Yapıların Deprem Yüklerine Karşı Güçlendirilmesi ve Çıkmalı Binalardaki Sorunlar Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 5 Temmuz, pp. 104 -124.

- Karadoğan, H.F., Yuksel, E., Erol, G., Saruhan, H.,** 2005. Low Strength Brick Infill Walls Strengthened by CFRP Fabric, *Interim Report-II*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Li, T., Silva, P.F., Belarbi, A., Nanni, A., Myers, J.J.,** 2001. Retrofit of Unreinforced Infill Masonry Walls with FRP, *Proc., CCC 2001 , Composites in Construction*, Porto, Portugal, October 10-12, pp. 559-563.
- Lin, M.W., Berman, J.B., Khoshbakht, M., Feickert, C.A., Abatan, A.O.,** 2006. Modeling of Moisture Migration in an FRP Reinforced Masonry Structure, *Building and Environment*, **41**, pp. 646-656.
- Madan, A., Reinhorn, A. M., Mander, J.B., Valles, R.E.,** 1997. Modelling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. **123**, No.10, pp. 1295-1302.
- Maheri, M.R. and Akbari, R.,** 2003. Seismic Behavior Factor, R , for Steel X-braced and Knee-braced RC Buildings, *Engineering Structures*, **25**, pp. 1503-1513.
- Mainstone, R.J.,** 1971. On the Stiffness and Strengths of Infilled Frames, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, supplement (iv), paper 7360 S.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, P.,** 1988. Therotical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Division*, ASCE, **114(8)**, pp. 1804-1826.
- Marfia, S. and Sacco, E.,** 2001. Modelling of Reinforced Masonry Elements, *International Journal of Solids and Structures*, **38 (2001)**, pp. 4177-4198.
- Özcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Erduran, E., Keskin, R.S., Mertol, H.C.,** 2003. Strengthening of Brick Infilled RC Frames with CFRP, *TUBITAK Structural Engineering Research Unit Report*, **2003-01**, Ankara, Turkey.
- Paulay, T. and Priestley, M.J.N.,** 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Wiley Engineering Publications, p.768, USA.
- Polyakov, S.V.,** 1956. On the Interactions Between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall. (English translation by G.L. Cairns, 1963), *Translations in Earthquake Engineering Research Institute*, Moscow, Russia.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J.,** 2007. *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, p.721, Pavia, Italy.
- Priestley, M.J.N and Seible, F.,** 1995. Design of Seismic Retrofit Measures for Concrete and Masonry Structures, *Construction and Building Materials*, Vol.9, No.6, pp. 365-377.
- Reinhorn, A. M. and Madan, A.,** 1995. Evaluation of Tyfotm W Fiber Wrap System for In Plane Strengthening of Masonry Walls, Test Report, Report No. **AMR 95-0002**, State University of New York at Buffalo, USA, August.

- Saadatmanesh, H.**, 1997. Extending Service Life of Concrete and Masonry Structures with Fiber Composites, *Construction and Building Materials*, Vol.11, No.s 5-6, pp. 327-335.
- Saneinejad, A. and Hobbs, B.**, 1995. Inelastic Design of Infilled Frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pp. 634-650.
- SAP2000 Version 10.0.7**, Release Date: 2006-06-02. Integrated Software for Structural Analysis & Design Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Schwegler, G.**, 1995. Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones, *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, August 28-September 2.
- Stafford-Smith, B.**, 1962. Lateral Stiffness of Infilled Frames, *Journal of Structural Division*, ASCE, 88, ST6, pp. 183-199.
- Stafford-Smith, B.**, 1966. Behavior of Square Infilled Frames, *Journal of Structural Division*, ASCE, 91, ST1, pp. 381-403.
- Stafford-Smith, B.S. and Carter, C.**, 1969. A Method of Analysis for Infilled Frames, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol.44, paper 7218.
- Taghdi, M., Bruneau, M., Saatçioğlu, M.**, 2000. Seismic Retrofitting of Low-Rise Masonry and Concrete Walls Using Steel Strips, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No.9, pp. 1017-1025.
- Triantafillou, T.C.**, 1998. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates, *Journal of Composites for Construction*, Vol.2, No.2, pp. 96-104.
- Triantafillou, T.C.**, 2001. Strengthening of Historic Structures with Composites, *FRP Composites in Civil Engineering*, Vol. II, pp. 959-965.
- TS 500**, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Standartı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 771-1**, 2005. Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tumialan, G., Huang, P., Nanni, A., Silva, P.**, 2001. Strengthening of Masonry Walls by FRP Structural Repointing, *Non-Metalic Reinforcement for Concrete Structures*, FRPRCS-5, Cambridge, July 16-18.
- Valuzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C.**, 2002. Shear Behavior of Masonry Panels Strengthened by FRP Laminates, *Construction and Building Materials*, 16, pp. 409-416.
- Yüce, S.Z.**, 2009. Basitleştirilebilen Betonarme Sistemlerin Deprem Hesabı İçin Yerdeğiştirmeleri Esas Alan Bir Yöntem, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Yüksel, E.**, 1998. Bazı düzensizlikler içeren üç boyutlu büyük yapı sistemlerinin doğrusal olmayan çözümlemesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Yüksel, E., İlki, A., Erol, G., Demir, C., Karadoğan, H.F., 2005. Seismic Retrofit of Infilled Reinforced Concrete Frames with CFRP Composites, *NATO Workshop Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, Istanbul, Turkey, 30 May-1 June.

EKLER

Ek A : Basit Kayma Deneyi Numunelerinin ve Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numunelerinin Hasar ve Göçme Şekilleri

Ek B : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Deneyleri Hasar Durumu Çizelgesi

Ek C : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numunelerinin Göçme Şekline Göre Yatay Yük Taşıma Kapasitesi Sınır Değerleri

**Ek A : Basit Kayma Deneyi Numunelerinin ve Tek Katlı-Tek Açıklıklı
Betonarme Çerçeve Numunelerinin Hasar ve Göçme Şekilleri**

A.1 Basit kayma deneyi numunelerinin göçme şekilleri



(a)

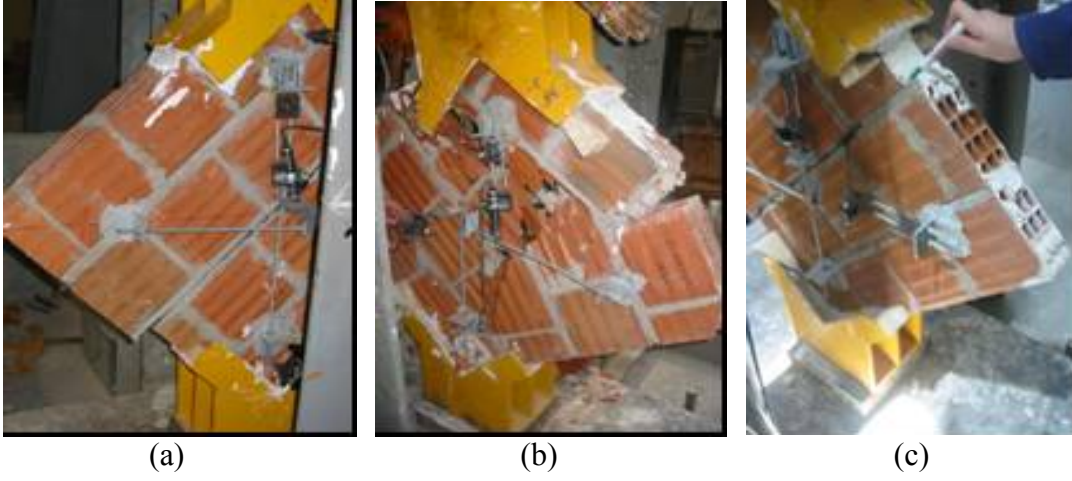


(b)

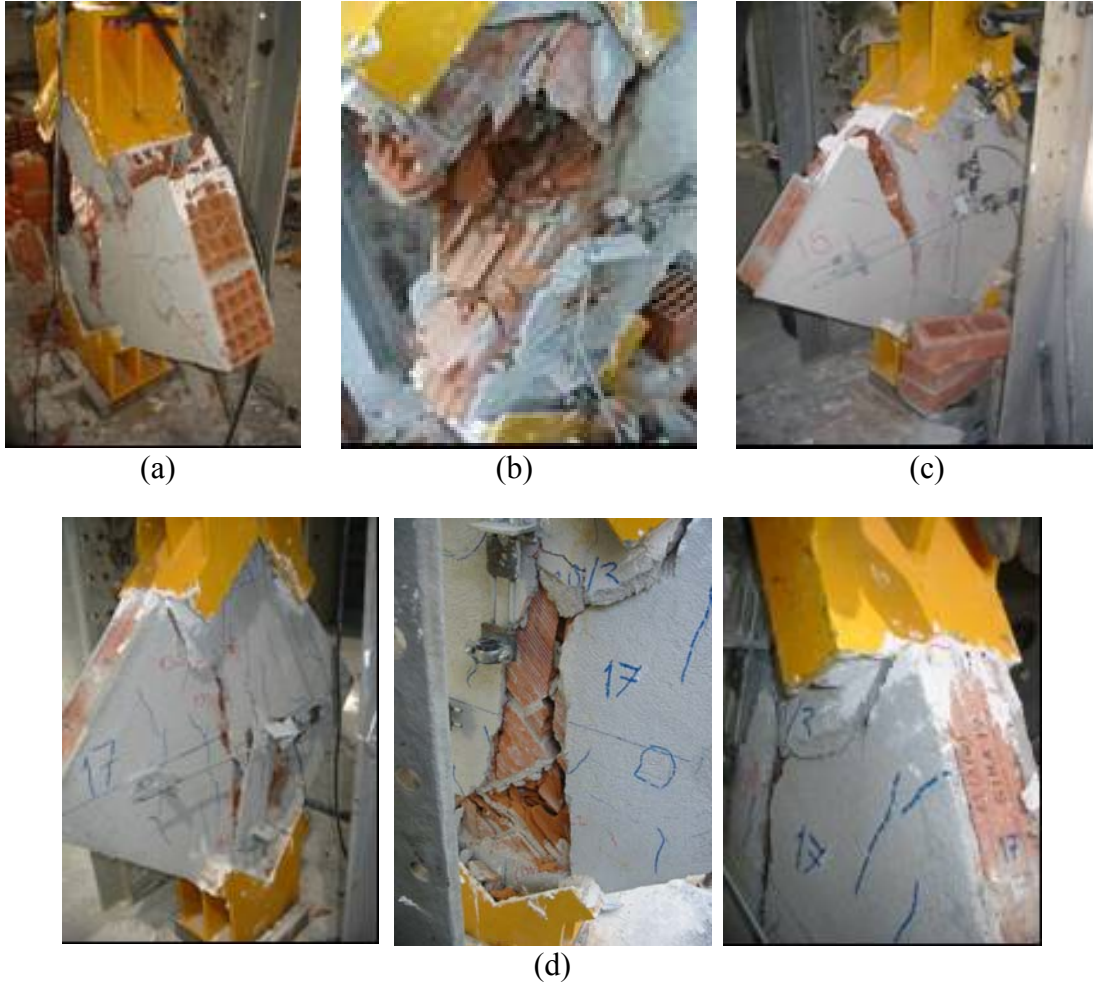


(c)

Şekil A.1 : Güçlendirilmemiş sıvasız numuneler S25 (a), S16 (b) ve S18'in (c) göçme şekilleri.



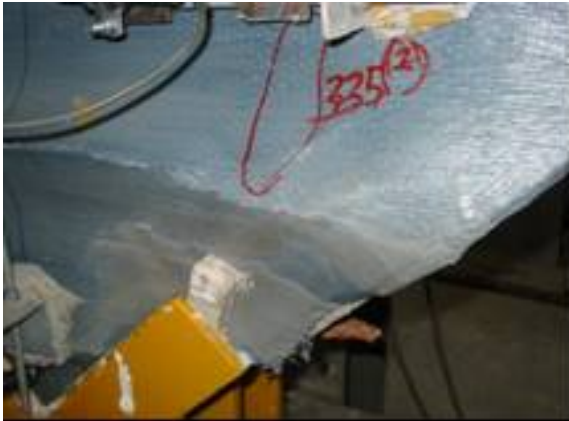
Şekil A.2 : Harç tabakalarına CFRP yerleştirilmiş numuneler S12 (a), S13 (b) ve S14'ün (c) göçme şekilleri.



Şekil A.3 : 135 mm kalınlığındaki sıvalı numuneler S6 (a), S8 (b) ve 85 mm kalınlığındaki sıvalı numuneler S15 (c), S17'nin (d) göçme şekilleri.



Şekil A.4 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvasız numune S7'nin göçme şekli.



Şekil A.5 : Tüm yüzü CFRP kaplı sıvalı numune S19'un göçme şekli.



(a)



(b)

Şekil A.6 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı birinci grup numuneleri S1 (a) ve S5'in (b) göçme şekilleri.



Şekil A.7 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı üçüncü grup numunesi S29'un göçme şekli.



(a)



(b)

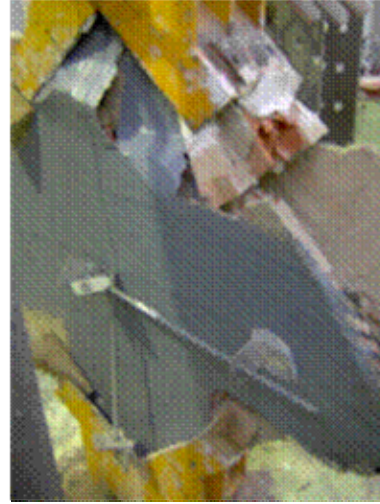
Şekil A.8 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı ikinci grup numunesi S21 (a) ve S21r'nin (b) göçme şekilleri.



Şekil A.9 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı ikinci grup numunesi S10'un göçme şekli.



(a)



(b)

Şekil A.10 : 300 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı üçüncü grup numuneleri S33 (a) ve S34'ün (b) göçme şekilleri.



Şekil A.11 : 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S28'in göçme şekli.



Şekil A.12 : 150 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numune S24r'nin göçme şekli.



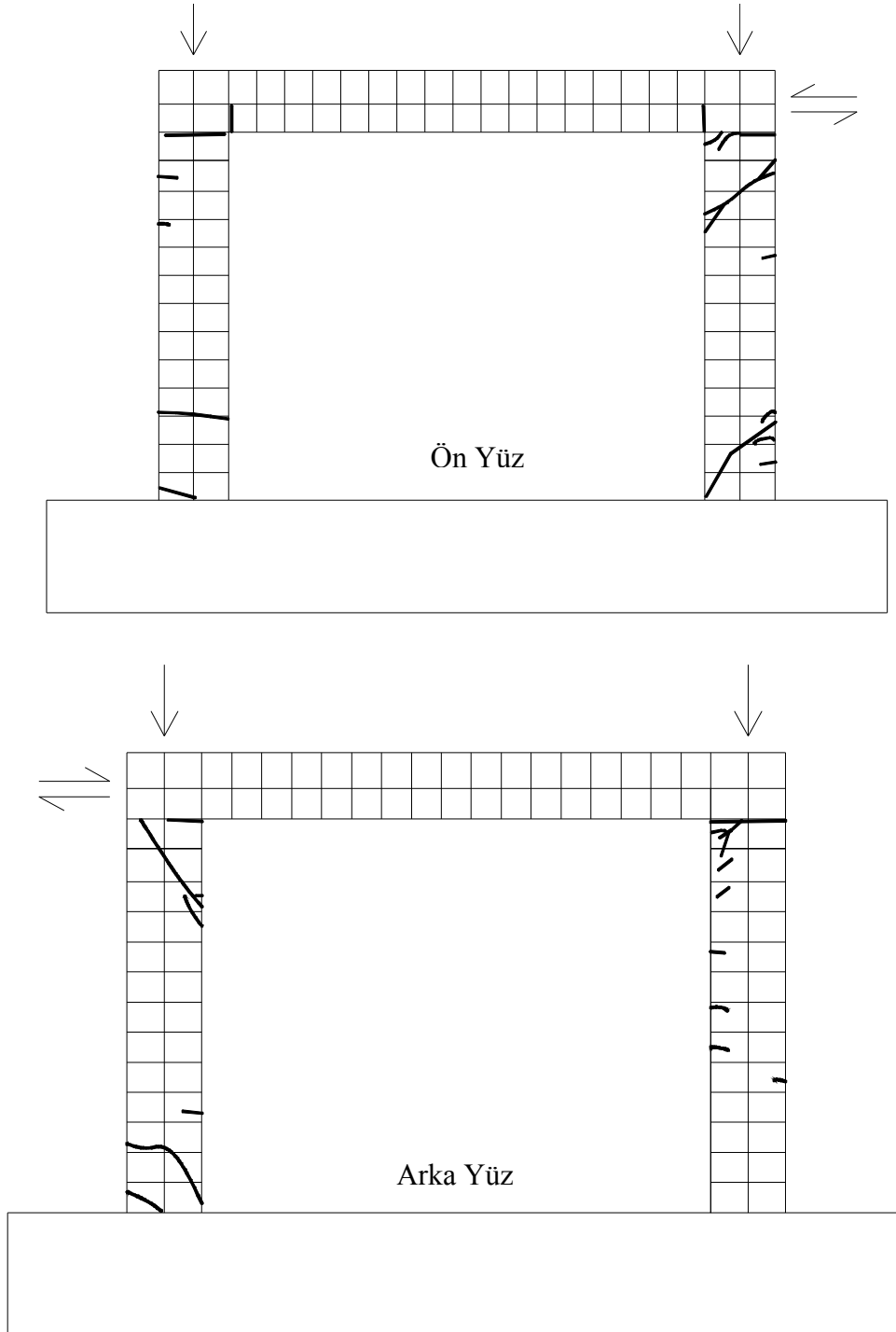
(a)



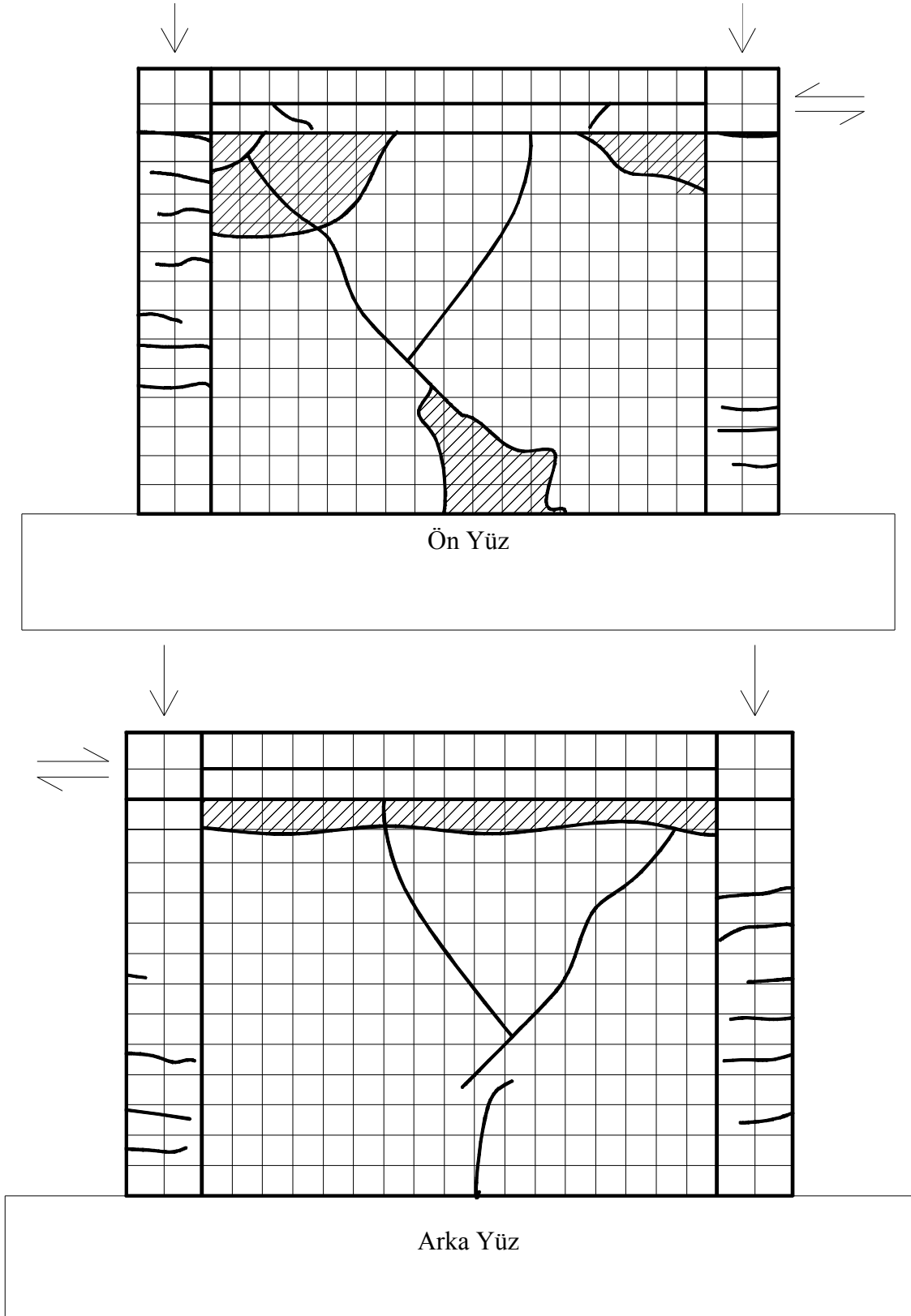
(b)

Şekil A.13 : 100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş sıvalı numuneler S27 (a) ve S26'nın (b) göçme şekilleri.

A.2 Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin çatlak rölöveleri



Şekil A.14 : Dolgu duvarsız numune 1'in çatlak rölövesi.



Şekil A.15 : Numune N1'in çatlak rölövesi.

A.3 Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve numunelerinin hasar ve göçme şekilleri

A.3.1 Dolgu duvarsız numune 1



Şekil A.16 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 1’in $\pm 3.5 \text{ mm}$ yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.17 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 1’in $\pm 4.2 \text{ mm}$ ve $\pm 4.9 \text{ mm}$ yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.



Şekil A.18 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 1’in $\pm 10.5 \text{ mm}$ yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

A.3.2 Dolgu duvarsız numune 2



Şekil A.19 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 3.5 mm ve ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımlarındaki hasar durumu.



Şekil A.20 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.21 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 14 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.22 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 28 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.23 : ‘Dolgu Duvarsız Numune 2’nin ± 42 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

A.3.3 Numune N1



(a)



(b)

Şekil A.24 : Numune N1'in ± 5.6 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.



(a)



(b)

Şekil A.25 : Numune N1'in ± 10.5 mm yerdeğiştirme adımının ilk (a) ve sonraki çevrimlerindeki (b) hasar durumu.



Şekil A.26 : Numune N1'in ± 11 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

A.3.4 Numune N2



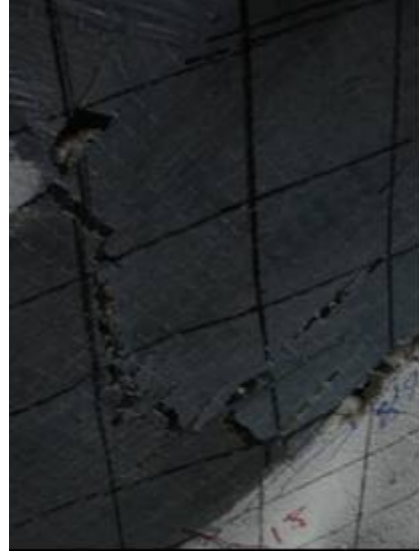
Şekil A.27 : Numune N2'nin ± 3.5 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.28 : Numune N2'nin +4.2 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

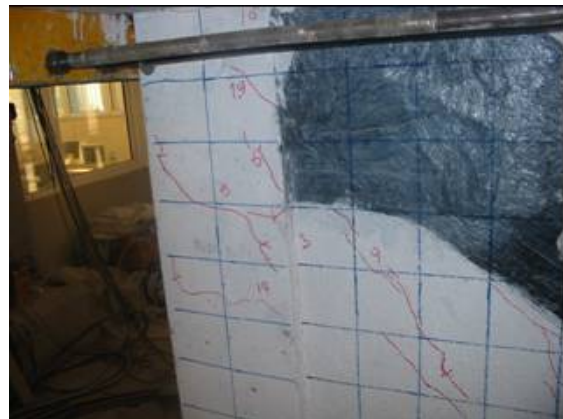


Şekil A.29 : Numune N2'nin ± 7 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.

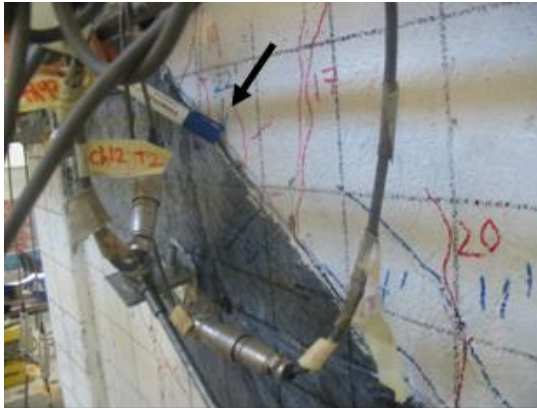
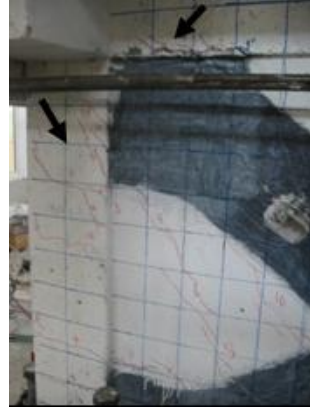


Şekil A.30 : Numune N2’de +11.64 mm yerdeğiştirme değerinde dolgu duvar üzerindeki CFRP’nin kopması.

A.3.5 Numune N3



Şekil A.31 : Numune N3’ün ± 2.8 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.32 : Numune N3'ün ± 4.9 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.33 : Numune N3'ün - 10.5 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü çekme çevriminde hasar durumu.



Şekil A.34 : Numune N3'ün 14 mm yerdeğiştirme adımının üçüncü itme çevrimindeki hasar durumu.



Şekil A.35 : Numune N3'te +28 mm yerdeğiştirme adımının ilk itme çevrimindeki hasar durumu.



Şekil A.36 : Numune N3'te -28 mm yerdeğiştirme adımının ilk çekme çevriminde hasar durumu.

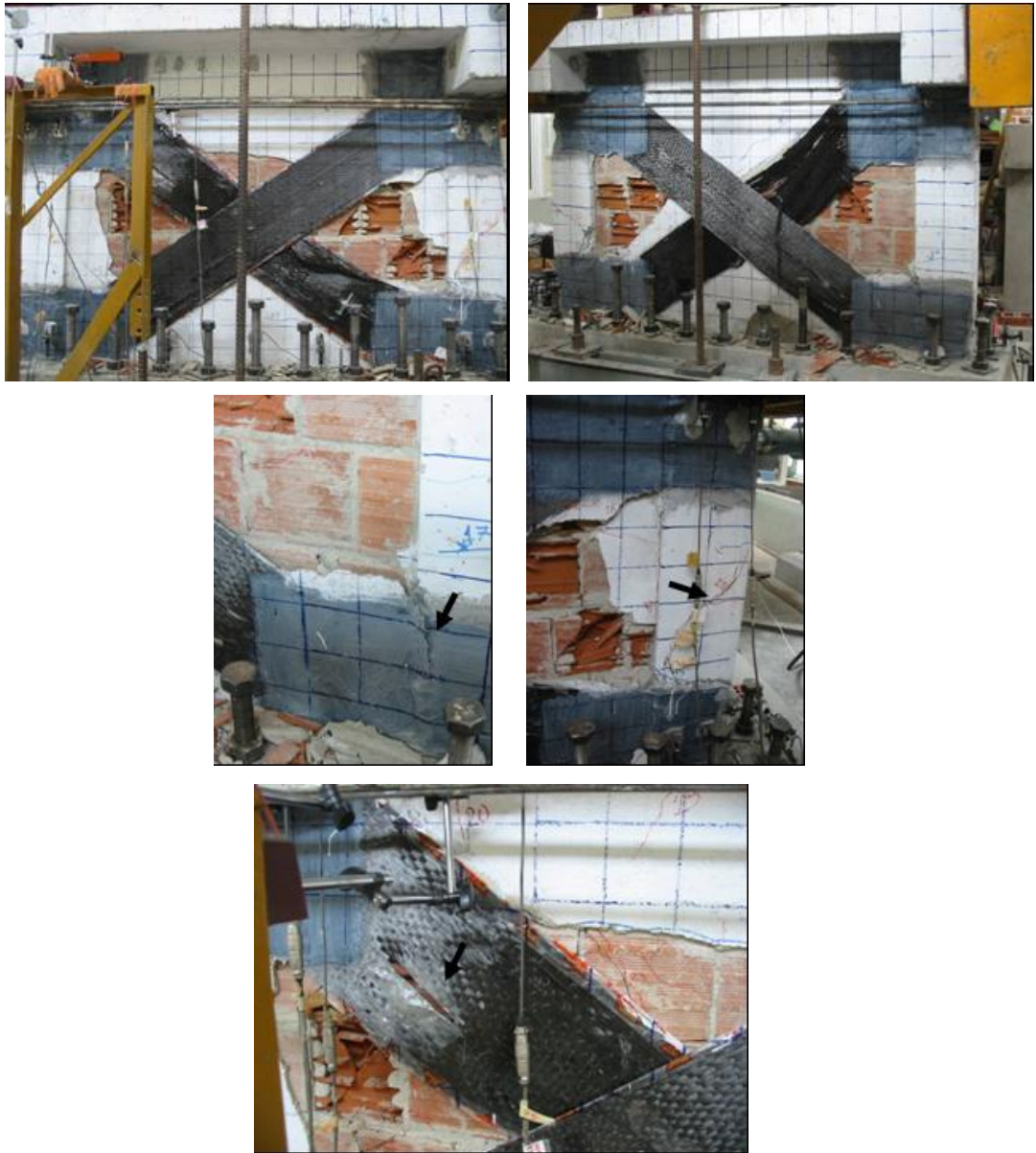
A.3.6 Numune N4



Şekil A.37 : Numune N4'ün ± 4.2 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.38 : Numune N3'ün -5.6 mm yerdeğiştirme adımındaki hasar durumu.



Şekil A.39 : Numune N4'ün deney bitirildikten sonraki hasar durumu.

Ek B : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Deneyleri Hasar Durumu Çizelgesi

Çizelge B.1 : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
							Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda	
Minimum hasar bölgesi	Minimum hasar bölgesi		0.05	İlk eğilme çatlakları (d* $\leq$ 1 mm)		Diyagonal okumaların doğrusal bölgeden çıktığı değer.		N3 : Kirişte CFRP ankraj elemanları civarında bir çatlak	
			0.1			– Önceki adımlarda oluşan eğik çatlakların genişliği (d*~ 0.1 mm) ve boyu artmış. – Diyagonal CFRP şeritler çevresinde yeni eğik çatlaklar (d*~0.1 mm) – Duvar-kiriş arayüzünde ayrılma, (d*~0.1mm). – N3 : Kolonlardan başlayıp, duvar üzerinde devam eden eğik çatlaklar.		Mesnet yerlerinde çatlaklar. N3 : Kiriş ankraj civarlarında çatlaklar.	– Bütün güçlendirilmiş numunelerde önemli hasar adımları. Özellikle basınç diyagonali ve çerçevedeki çatlaklar için. – N4 numunesi diğerlerine göre daha az çatlamış. Güçlendirilmiş dolgu duvar için seçilmiş olan sınır oldukça uygun.

Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
							Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda	
MN % 0.15	Belirgin hasar bölgesi	Minimum hasar bölgesi							
			0.2		N4 : Kirişte kayma çatlağı ve kiriş-kolon birleşim yerinde kiriş içine giden çatlak.	Yeni diyagonal çatlaklar.	Basınç etkisindeki CFRP diyagonal üst köşelerde duvardan hafifçe ayrılmış.		
			0.25	– Kayma çatlakları d*~0.1 mm – Dolgu duvardaki çatlaklar ile kolondaki çatlaklar birleşmiş. – Kolon çatlakları d*~0.1mm	– Kayma çatlakları d*~0.1mm – Kiriş-kolon birleşim bölgesi civarında çatlak – N3 : Bu çatlakların genişliğinde önemli artış olmuş ve bunlar kolonlar üzerinde kayma çatlakları olarak devam ediyor.	– Duvar çatlakları d*~0.5 mm – N4 : Sıvada kabarma.	– Basınç diyagonal duvardan belirgin biçimde ayrılmış – N4 : CFRP'nin gergin/gevşek olması gözleniyor.	N4 : Basınç çubuğunun mesneti kalkmış.	– Basınç diyagonalinde bir köşeden diğer köşeye çatlakların ilerlemesi ve birleşmesi başlamış. – Sistem hala bütün çalışıyor.
			0.3					Kabarmalar artmış.	

Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
							Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda	
GV %0.35	İleri hasar	Minimum hasar bölgesi	0.35		N3 : Kiriş-kolon birleşim bölgesi civarındaki çatlaklar d*~ 8 mm Kirişte kayma çatlakları.	N4 : Sıvada bölgesel kalkma ve dökülme, yeni eğik çatlaklar.	Tüm diyagonaller ayrılmış.		Bundan sonra ileri hasar.
			0.4			Sıvalar parçalanmış ve dökülmeye başlamış.		N3 : CFRP kabarması artmış. N4 : Köşelere bağlı CFRP duvardan ayrılmış.	– N2 : Birlikte çalışan sıva, dolgu duvar ve CFRP'nin ayrılma sınırı. – Yük düşmesi yeri. Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için sınır buraya çekilebilir.
			Güçlendirilmemiş dolgu duvarda diyagonal çatlamanın sonu	0.5	N3 : Kiriş-kolon birleşim bölgesi civarında beton ezilmesi başlamış.		Sıvalar kalkmış.	FRP kabarması çok ama numune harap degil. N4 : CFRP lifler incelmış	

Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
						Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda		
İleri hasar	Minimum hasar bölgesi		0.75	– Yeni kayma çatlakları – N3 : CFRP kopmasından sonra kolonda eğik çatlak ve bu bölgede 5 mmlik hareket. 3. çekmede kiriş-kolon daha da ayrılmış 20 mm ötelenme (lokal etki) Kiriş-kolon birleşim bölgesi civarındaki çatlak kolonda kesme olarak ilerlemiş.		Tuğlaların parçalanması. N3 : CFRP kopmasından sonra dolgu duvarda ağır hasar meydana gelmiş.	CFRP ayrılması büyük değerler alıyor. N3 : CFRP kopması N4 : CFRP liflerinde kopma		N2 ve N3 için önerilen göçme yerdeğiştirmesi (Δ _{G2})
	MN % 0.1		1	N3 : Kolondaki önceki eğik çatlakların değeri çok artmış. Kolon orta bölgede beton ezilmesi var, paspayları atmış, donatı çıkmış.		N3 : Kiriş-duvar arası bölgede sıvada parçalanmış. Sıva-tuğla parçalanmış ve duvarın düzlemdışı hareketi var.	N2 : CFRP kopması		N2 : CFRP koptuktan sonra numune yük-yerdeğiştirme eğrisi yatmış ve hasar artmış. Numunenin stabilitesi bozulduğundan deney durduruldu. N4 için önerilen göçme yerdeğiştirmesi (Δ_{G2})

Çizelge B.1 (devam) : Tek katlı-tek açıklıklı betonarme çerçeve deneyleri hasar durumu çizelgesi.

Görelî Kat Ötelemesi Oranı Hasar Sınırları			Görelî Kat Ötelemesi Oranı (%)	Güçlendirilmiş Numunelerin Hasar Durumu					Notlar
DBYBHY ¹		FEMA 306 ⁴		Çerçeve Elemanlarında		Güçlendirilmiş Dolgu Duvarda			
GDD ²	KP ³			Kolon	Kiriş	Dolgu duvarda	CFRP		
						Dolgu duvar üzerinde	Çerçeveye bağlantıda		
İleri hasar	Belirgin hasar bölgesi	%1.5 : Güçlendirilmemiş tuğla dolgu duvar için sınır değeri	2	– Yeni kayma çatlakları – N4 : Kaymadan göçmüş. – N3 :Kiriş-kolon birleşim bölgesi arası betonda ezilme, Düşey donatıda plastik şekildeğiştirme, Kayma çatlaklarından kolon ikiye ayrılmış, Kolon düzlemdışı ötelenmiş.	Yeni kayma çatlakları	– Tuğla parçalanması. – Duvar çerçeveden ayrılmış.		N3 : Ankrajlar yük aktarmaya devam ediyor	N3 ve N4 numunelerinde göçme.
Kısaltmalar : ¹ Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007), ² Güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları, (Çizelge 7.5, DBYBHY, 2007), ³ Doğrusal elastik yöntemlerle yapılan hesapta kolon ve perdeler için görelî kat ötelemesi hasar sınırları, (Çizelge 7.6, DBYBHY, 2007), ⁴ Güçlendirilmemiş tuğla dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları, (FEMA 306, 1998) , d* : çatlak genişliği.									

Ek C : Tek Katlı-Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve Numunelerinin Göçme

Şekline Göre Yatay Yük Taşıma Kapasitesi Sınır Değerleri

C.1 Yatay bir harç tabakası boyunca kayarak göçme durumu

Bu göçme şekline göre numunenin yatay yük taşıma kapasitesine katılan büyüklükler; iki kolon kesitinin kayma kuvveti kapasiteleri, dolgu duvarın yatay yük taşıma kapasitesi ve diyagonal çekme etkisindeki CFRP şeritin çekme kuvveti kapasitesinin yatay bileşenidir.

Kolon kesitlerinin kayma kuvveti kapasiteleri;

$$V_r = V_c + V_w \quad (C.1)$$

$$V_c = 0.8V_{cr} \quad (C.2)$$

$$V_{cr} = 0.65 f_{ctk} b d_f \quad (C.3)$$

$$V_w = (A_{sw} / s) f_{yw} d_f \quad (C.4)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır, (TS 500, 2000). Burada V_r kayma dayanımını, V_c betonun kayma dayanımına katkısını, V_w kayma donatısının kayma dayanımına katkısını, V_{cr} kesitin kaymada çatlama dayanımını, f_{ctk} betonunun eksenel çekme dayanımını, b kesit genişliğini, d_f kesit faydalı yüksekliğini, A_{sw} kayma donatısı toplam kesit alanını, s etriye aralığını ve f_{yw} enine donatı akma dayanımını göstermektedir.

Kolon kesiti kayma kuvvetinde bir sınır durum olarak (V_c');

$$V_c' = f_{ctk} h d \quad (C.5)$$

değeri de incelenmiştir. Burada h kesit yüksekliğidir. Diyagonal CFRP çekme kuvveti kapasitesinin yatay bileşeni (V_{FRP});

$$V_{FRP} = w_f t_f E_f \varepsilon_f \cos \theta \quad (C.6)$$

ile hesaplanmıştır. Burada w_f ve t_f CFRP şeritin, sırasıyla, genişliği ve kalınlığı, E_f CFRP'nin elastisite modülü, θ ise CFRP şeritin yatayla yaptığı açıdır. ε_f değeri her numunede CFRP şeritlerin koptuğu değer bulunarak hesaplanmıştır.

Dolgu duvarın bir yatay harç tabakasından tüm duvar genişliği boyunca yatay kayma kuvveti kapasitesi (V_{duvar});

$$V_{duvar} = \tau_{duvar} l_{duvar} t_{duvar} \quad (C.7)$$

ile hesaplanmıştır. Burada l_{duvar} ve t_{duvar} , sırasıyla, dolgu duvarın uzunluğu ve kalınlığıdır. τ_{duvar} olarak her numunenin malzeme deneylerinden belirlenen harç çekme dayanımı alınmıştır. Buna göre,

$$V_T = 2V_r + V_{duvar} + V_{FRP} \quad (C.8)$$

ile ilk sınır durum için yatay yük taşıma kapasitesi (V_T) hesaplanmaktadır.

C.2 Dolgu duvarın eşdeğer basınç diyagonali olarak çalıştığı göçme durumu

İkinci yatay yük taşıma kapasitesi sınır durumunda, yine bir harç tabakası boyunca kayma göçme şekli varsayımı ile hesap yapılmıştır. Bu göçme durumunda dolgu duvar yatay yük kapasitesi (V_{duvar}) olarak duvarın eşdeğer basınç diyagonali ile taşıdığı eksenel yükün yatay bileşeni kullanılmıştır.

$$V_{duvar} = f_{me} a_{duvar} t_{duvar} \cos \theta \quad (C.9)$$

Burada f_{me} dolgu duvarın eşdeğer basınç dayanımını, a_{duvar} eşdeğer basınç diyagonali genişliğini, t_{duvar} dolgu duvar kalınlığını ve θ eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açığı göstermektedir.

C.3 Dolgu duvar ve çerçevenin tam bütünleşik olarak çalıştığı göçme durumu

Üçüncü sınır durumda yatay yük taşıma kapasitesi (V_T) ;

$$V_T = M_u / h_k \quad (C.10)$$

$$M_u = F_c L_u \quad (C.11)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada M_u , dolgu duvar ve çerçeve elemanlarının bütünleşik çalıştığı kabul edilen sistemin taşıdığı moment değeri, h_k kolon yüksekliği, F_c bütünleşik kesitte çekme etkisindeki kolonun çekme dayanımı ve L_u bütünleşik kesitteki çekme ve basınç kuvvetleri arasındaki kuvvet koludur. F_c değerinde, betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilmiş ve sadece kolon düşey donatılarının katkısı hesaba katılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Gülseren EROL

Doğum Yeri ve Tarihi : Kemah, 1978

Adres : Ahmet Adnan Saygun Cad., Kelaynak Sk., 18/15, Ulus, İstanbul, Türkiye.

Lisans Üniversitesi :

1994-1998 İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Yayın Listesi:

Kitap İçinde Bölüm :

Karadoğan, H.F., Pala, S., İlki, A., Yüksel, E., Mowrtage, W., Teymür, P., **Erol, G.**, Taşkın, K., Çömlek, R., 2008. Improved Infill Walls and Rehabilitation of Existing Low Rise Buildings, in *Seismic Risk Assessment and Retrofitting, with Special Emphasis on Existing Low Rise Structure*, Vol. 10, ISBN: 978-90-481-2680-4, Netherlands: Springer.

Yüksel, E., İlki, A., **Erol, G.**, Demir, C., Karadoğan, H.F., 2005. Seismic Retrofit of Infilled Reinforced Concrete Frames with CFRP Composites, in *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences*, 12/2005, Vol. 66, ISBN: 978-1-4020-4569-1, Netherlands: Springer.

Uluslararası Bildiriler :

Karadoğan, H.F., Pala S., Yüksel, E., **Erol, G.**, Taşkın, K., Teymür, P., Yüce, S.Z., Mowrtage, W., 2010. Make the People a Part of the Solution and Prevent Total Collapse, in *Make the People a Part of the Solution, UNESCO-IPRED-ITU Workshop*, SC/BES/DR/2010/3, Paris, France, 6-7 July 2009.

Erol, G., Karadoğan, H.F., Çılı, F., 2008. Seismic Strengthening of Infilled RC Frames by CFRP, *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17.

Erol, G., Demir, C., İlki, A., Yüksel, E., Karadoğan, H.F., 2006. Effective Strengthening of RC Frames With and Without Lap Splice Problems, *8th National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 19-21 April.

Erol, G., Taşkın, K., Yüksel, E., Karadoğan, H.F., 2005. Strengthening of Infilled RC Frames by CFRP, *5th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, Skiathos, Greece, 30 May-1 June.

Erol, G., Yüksel, E., Saruhan, H., Sağbaş, G., Teymür Tuğa, P., Karadoğan, F., 2004. A Complementary Experimental Work on Brittle Partitioning Walls and Strengthening by Carbon Fibers, *13th World Conference On Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.

Ulusal Bildiriler :

Erol, G., Yüksel, E., Saruhan, H., Sağbaş, G., Karadoğan, H.F., 2003. Sıvalı ve Sıvasız Gevrek Tuğla Duvarların Davranışı ve Karbon Lifleriyle Güçlendirme, *II. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı*, Konya, Türkiye, 19 – 20 Haziran.

Yüksel, E., **Erol, G.,** Sağbaş, G., Teymür, P., Saruhan, H., Karadoğan, F., 2003. Yüksek Dayanımlı Bölme Duvarların Yapısal Özelliklerini Belirlemeye Yönelik Bir DeneySEL Çalışma, *II. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı*, Konya, Türkiye, 19 – 20 Haziran.

İlki, A., Yüksel, E., Demir, C., **Erol, G.,** Yılmaz, E., Tezcan, A., Saruhan, H., Karadoğan, F., 2003. Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Bindirme Boyu Problemi ve DeneySEL Bir İnceleme, *II. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı*, Konya, Türkiye, 19 – 20 Haziran.

Erol, G., Sağbaş, G., Saruhan, H., Yüksel, E., 2001. Tuğla Duvarlarda Kayma Dayanımı, *I. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı*, Ankara, Türkiye, 5-6 Kasım.

Teknik Rapor :

Karadoğan, F., Yüksel, E., **Erol, G.,** Saruhan, H., 2005. Low Strength Brick Infill Walls Strengthened by CFRP Stripes, (Interim Report-II), *Istanbul Technical University*, May, 104 pages, İstanbul, Turkey.

Karadoğan, F., Yüksel, E., **Erol, G.,** Sağbaş, G., Saruhan, H., 2004. Low Strength Brick Infill Walls Strengthened by CFRP Stripes, (Interim Report-I), *Istanbul Technical University*, May, 54 pages, İstanbul, Turkey.

Yüksek Lisans Tezi:

Erol, G., 2001. Yüksek Mukavemetli Özel Tuğlalardan Yapılmış Duvarlarda Kayma Dayanımı, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Türkiye.

Aldığı Burslar :

TÜBİTAK, R-2214 Yurtdışı Araştırma Bursu, 9 ay. University of California, Irvine, USA’de doktora tez konusunda araştırma yapmak amaçlı kullanılmıştır.

Bilimsel Araştırma Projesi :

TUBİTAK Projesi 104M562, “Karbon Lifler ile Güçlendirilmiş Bölme Duvarlı Betonarme Çerçeveler”, 2006. Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Feridun Çılı, Yardımcı Araştırmacılar : Prof.Dr.Faruk Karadoğan, Araş.Gör. **Gülseren Erol.**

Bilimsel Toplantı Organizasyon Komitesi :

“ENHR-2010, European Network for Housing Research, 22nd Conference: Housing Dynamics and: Urban Change”, 04-07 Temmuz 2010, İstanbul, Türkiye.

“ENHR-NHR 2010, European Network for Housing Research, New Housing Researchers”, 02-03 Temmuz 2010, İstanbul, Türkiye.

“International Platform for Reducing Earthquake Disasters, IPRED, Make the People a Part of the Solution”, 05-07 Temmuz 2009, UNESCO-IPRED-ITU Workshop, İstanbul, Türkiye.

“8th International Seminar on Structural Masonry”, 05-07 Kasım 2008, İstanbul, Türkiye.