

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMLARININ
LİFLİ POLİMERLERLE ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Yılmaz Zafer VULAŞ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Danışman : Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMLARININ
LİFLİ POLİMERLERLE ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Yılmaz Zafer VULAŞ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Danışman : Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMLARININ
LİFLİ POLİMERLERLE ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Müh. Yılmaz Zafer VULAŞ

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Şubat 2010**


**Tez Danışmanı
Doç. Dr.
Şevket ÖZDEN**


**Üye
Prof. Dr.
Sinan ALTIN**


**Üye
Doç. Dr.
Safa Bozkurt COŞKUN**

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tablalı kirişlerin iki farklı güçlendirme yöntemi ile farklı elastisite modüllerine sahip FRP şeritler kullanılarak kesmeye karşı nasıl güçlendiğini incelemek için yapılan bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Tüm öğrenim hayatım boyunca imkan ve desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme, ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bana desteğini esirgemeyen Polisan Holding İnşaat Departmanı Müdürü Sn. Cahit USLU' ya teşekkürlerimi sunarım.

Gerek lisans öğrenimimde, gerekse yüksek lisans öğrenimim boyunca bana desteğini esirgemeyen, uygun çalışma ortamını sağlayan ve her konuda bana yol gösteren tez danışmanım Doç.Dr. Şevket ÖZDEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numunelerinin üretilmesi ve deneylerin yürütülmesi sırasında yardımını esirgemeyen sevgili babama, her zaman desteklerini esirgemen Yapı Ana Bilim Dalı araştırma görevlilerine ve Yapı Laboratuvarı görevlilerine katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kesme Kuvvetlerinin Oluşum Mekanizması	5
2.2. Betonarme Elemanların Kesme Davranışları	7
2.3. Kesitlerin Kesme Dayanımı Hesabı	10
2.4. Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Araştırmalar	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	19
3.1. Malzemeler	19
3.1.1. Agregalar	19
3.1.2. Çimento	19
3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı	21
3.1.4. Donatı çeliği	22
3.1.5. FRP lifler	22
3.1.5.1. GFRP lifler	23
3.1.5.2. CFRP lifler	24
3.1.5.3. Hi-CFRP lifler	24
3.1.6. Epoksi	25
3.2. Deney Değişkenleri ve Numunelerin Adlandırılması	26
3.2.1. Deney değişkenleri	26
3.2.2. Numunelerin adlandırılması	27
3.3. Beton Karışımları	29
3.4. Deney Numunelerinin Üretilmesi	30
3.5. Güçlendirme İşleminin Yapılması	34
3.6. Deney Aşaması	40
3.6.1. Beton deneyleri	40
3.6.2. Donatı çeliği çekme deney	41
3.6.3. Kesme deneyleri	43
3.6.4. Yükleme ve deney düzeneği	43
3.6.5. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni	44
4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER	48
4.1. Numunelerin Göçme Davranışları	48
4.2. Deneylerden Elde Edilen Veriler	58
4.2.1. BV numunesi	59
4.2.2. BCU numunesi	60

4.2.3. BCA numunesi	66
4.2.4. BGU numunesi	71
4.2.5. BGA numunesi	77
4.2.6. BHU numunesi	82
4.2.7. BHA numunesi	88
5. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	94
5.1. Numunelerin Göçme Davranışlarının Değerlendirilmesi	94
5.2. Deneylerden Elde Edilen Grafiklerin Değerlendirilmesi	103
5.2.1. Numunelerin yük-birim deformasyon grafiklerinin incelenmesi	103
5.2.1.1. BCU numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	105
5.2.1.2. BCA numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	107
5.2.1.3. BGU numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	109
5.2.1.4. BGA numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	111
5.2.1.5. BHU numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	113
5.2.1.6. BHA numunesi kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi	115
5.2.2. Güçlendirilmiş numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması	117
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	124

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Basit kesme altında asal gerilmeler	5
Şekil 2.2: Asal gerilmelerin yönü	6
Şekil 2.3: Eğik çatlakların oluşumu	9
Şekil 3.1: Deney değişkenlerinin şematik olarak gösterimi	28
Şekil 3.2: Numune adlandırma örneği	29
Şekil 3.3: Deney numunesinin boyutları	31
Şekil 3.4: Kalıp kesiti	31
Şekil 3.5: Deney numunelerinin donatı planı	33
Şekil 3.6: Deney numunesine donatı yerleşimi	34
Şekil 3.7: Deney numunesi üzerine FRP şeritlerin yapıştırma planı	36
Şekil 3.8: Güçlendirmede kullanılan FRP liflerin kesit planı	37
Şekil 3.9: FRP ankraj çivilerinin kesit planı	39
Şekil 3.10: Ankraj çivilerinin hazırlanması	40
Şekil 3.11: Ankrajlı FRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapışmış hali	40
Şekil 3.12: Beton basınç dayanımı deneyi	41
Şekil 3.13: İnce nervürlü çelik çubuklar için çekme deneyi düzeneği	42
Şekil 3.14: İnce çelik çubuk çekme deneyi sonucu	42
Şekil 3.15: Çelik çekme deneyi ve aparatı	43
Şekil 3.16: Deney numunelerini yükleme sistemi	44
Şekil 3.17: Deney düzeneği	46
Şekil 3.18: Şekil değiştirme ölçerlerin (ŞDÖ) yerleşimi	47
Şekil 3.19: Birim deformasyon ölçerlerin (BDÖ) yerleşimi	47
Şekil 4.1: BV numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	51
Şekil 4.2: BV numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	52
Şekil 4.3: BCU numunesinde CFRP şeritlerin beton yüzeyden ayrılması	52
Şekil 4.4: BCU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	53
Şekil 4.5: BCA numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	53
Şekil 4.6: BCA numunesinde ankraj çivilerinin ve CFRP şeritlerin kopması	54
Şekil 4.7: BGU numunesinde GFRP şeritlerin beton yüzeyden ayrılması	54
Şekil 4.8: BGU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	55
Şekil 4.9: BGA numunesinde ankraj çivisi ve GFRP şeritlerin kopması	55
Şekil 4.10: BGA numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	56
Şekil 4.11: BHU numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması	56
Şekil 4.12: BHU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	57
Şekil 4.13: BHA numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması	57
Şekil 4.14: BHA numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi	58
Şekil 4.15: BV numunesi çatlak dağılımı	59
Şekil 4.16: BV numunesi kesme çatlağı genişliği – kesme kuvveti grafiği	59
Şekil 4.17: BV numunesi orta nokta sehimi – orta nokta yükü grafiği	60
Şekil 4.18: BCU numunesi çatlak dağılımı	60
Şekil 4.19: BCU numunesi kesme çatlağı açıklığı – yük grafiği	61
Şekil 4.20: BCU numunesi orta nokta sehimi – orta nokta yükü grafiği	61

Şekil 4.21: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	62
Şekil 4.22: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	62
Şekil 4.23: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	63
Şekil 4.24: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	63
Şekil 4.25: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	64
Şekil 4.26: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	64
Şekil 4.27: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	65
Şekil 4.28: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	65
Şekil 4.29: BCA numunesi çatlak dağılımı.....	66
Şekil 4.30: BCA numunesi kesme çatlak genişliği – kesme kuvveti grafiği.....	66
Şekil 4.31: BCA numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği.....	67
Şekil 4.32: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	67
Şekil 4.33: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	68
Şekil 4.34: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	68
Şekil 4.35: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	69
Şekil 4.36: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	69
Şekil 4.37: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	70
Şekil 4.38: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	70

Şekil 4.39: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	71
Şekil 4.40: BGU numunesi çatlak dağılımı.....	71
Şekil 4.41: BGU numunesi kesme çatlak genişliği – kesme kuvveti grafiği.....	72
Şekil 4.42: BGU numunesi orta nokta sehimi – orta nokta yükü grafiği.....	72
Şekil 4.43: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	73
Şekil 4.44: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	73
Şekil 4.45: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	74
Şekil 4.46: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	74
Şekil 4.47: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	75
Şekil 4.48: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	75
Şekil 4.49: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	76
Şekil 4.50: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	76
Şekil 4.51: BGA numunesi çatlak dağılımı.....	77
Şekil 4.52: BGA numunesi kesme çatlak açıklığı – yük grafiği.....	77
Şekil 4.53: BGA numunesi nokta sehimi – orta nokta yükü grafiği.....	78
Şekil 4.54: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	78
Şekil 4.55: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	79
Şekil 4.56: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	79
Şekil 4.57: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	80
Şekil 4.58: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	80

Şekil 4.59: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	81
Şekil 4.60: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	81
Şekil 4.61: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	82
Şekil 4.62: BHU numunesi çatlak dağılımı.....	82
Şekil 4.63: BHU numunesi kesme çatlağı açıklığı – yük grafiği.....	83
Şekil 4.64: BHU numunesi orta nokta sehimi – orta nokta grafiği.....	83
Şekil 4.65: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	84
Şekil 4.66: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	84
Şekil 4.67: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	85
Şekil 4.68: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	85
Şekil 4.69: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	86
Şekil 4.70: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	86
Şekil 4.71: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	87
Şekil 4.72: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	87
Şekil 4.73: BHA numunesi çatlak dağılımı.....	88
Şekil 4.74: BHA numunesi kesme çatlağı açıklığı – yük grafiği.....	88
Şekil 4.75: BHA numunesi orta nokta sehimi – orta nokta grafiği.....	89
Şekil 4.76: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	89
Şekil 4.77: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	90
Şekil 4.78: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	90

Şekil 4.79: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	91
Şekil 4.80: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	91
Şekil 4.81: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	92
Şekil 4.82: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	92
Şekil 4.83: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği.....	93
Şekil 5.1: BCU numunesinde oluşan ana kesme çatlağı ve kaldıraç etkisi.....	96
Şekil 5.2: BV numunesinde kaldıraç etkisinde oluşan çatlak.....	96
Şekil 5.3: Kaldıraç etkisinde çatlamış kesit ve bu kesitin serbest cisim diyagramı.....	97
Şekil 5.4: BCU numunesinde CFRP şeritlerin uçlarından beton yüzeyden ayrılması.....	98
Şekil 5.5: BGU numunesinde GFRP şeritlerin uçlarından beton yüzeyden ayrılması ve ana çatlak üzerindeki GFRP şeridin kopması.....	99
Şekil 5.6: BHU numunesinde Hi-CFRP şeridin beton yüzeyden ayrılması.....	99
Şekil 5.7: BHU numunesinde Hi-CFRP elyafın kopması.....	100
Şekil 5.8: BCA numunesinde CFRP şeritlerin kopması.....	101
Şekil 5.9: BGA numunesinde GFRP şeritlerin ve ankraj çivilerinin kopması.....	102
Şekil 5.10: BHA numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması.....	102
Şekil 5.11: BHA numunesinde ankraj çivilerinin kopması.....	103
Şekil 5.12: Temsili yük – birim deformasyon grafiği.....	104
Şekil 5.13: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	105
Şekil 5.14: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	105
Şekil 5.15: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	106
Şekil 5.16: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	106
Şekil 5.17: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	107
Şekil 5.18: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi.....	107

Şekil 5.19: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	108
Şekil 5.20:BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	108
Şekil 5.21: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	109
Şekil 5.22: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	109
Şekil 5.23: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	110
Şekil 5.24: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	110
Şekil 5.25: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	111
Şekil 5.26: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23'den okunan kesme kuvveti–birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	111
Şekil 5.27: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	112
Şekil 5.28: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	112
Şekil 5.29: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	113
Şekil 5.30: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	113
Şekil 5.31: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	114
Şekil 5.32: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	114
Şekil 5.33: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	115
Şekil 5.34: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19'dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	115

Şekil 5.35: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	116
Şekil 5.36: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17'den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi.....	116

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1: Kullanılan Agregaların Özellikleri	20
Tablo 3.2: Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özellikleri	20
Tablo 3.3: Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	21
Tablo 3.4: Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri	22
Tablo 3.5: GFRP Özellikleri	23
Tablo 3.6: CFRP Özellikleri	24
Tablo 3.7: Hi-CFRP Özellikleri	24
Tablo 3.8: Sikadur 330 Yapıştırıcısının Özellikleri	26
Tablo 3.9: Sikadur 300 Yapıştırıcısının Özellikleri	26
Tablo 3.10: Deney Numunelerinin Adlandırılması ve Özellikleri	28
Tablo 3.11: Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m ³ için)	29
Tablo 3.12: Kullanılan Donatı Çeliklerinin Çekme Deneyi Sonuçları	41
Tablo 4.1: Numunelerin İlk Çatlama ve Göçme Anında Taşıdıkları Kesme Kuvvetleri	49
Tablo 4.2: Numuneler Üzerindeki BDÖ' den Deney Boyunca Alınan Maksimum Okuma Değerleri	49
Tablo 5.1: Yük – Birim Deformasyon Grafiklerinde Adlandırılan Bölgeleri Açıklamaları	104
Tablo 5.2: Deney Sonuçları ile Yönetmeliklere Göre Yapılan Hesapları Karşılaştırılması	119

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

a	: Tekil yükün mesnete olan uzaklığı (mm)
A_c	: Beton kesitin alanı (mm ²)
A_{fv}	: Lifli polimerlerin şerit en kesit alanı (mm ²)
A_s	: Eğilme donatısı alanı (mm ²)
A_{sw}	: Kesme çatlağını kesen bir etriye sırasındaki toplam donatı kesit alanı (mm ²)
b_w	: Kiriş genişliği (mm)
d	: Kiriş faydalı derinliği (mm)
d_f	: Lifli polimer şerit yapıştırma boyu (mm)
E_f	: Lifli polimerin elastisite modülü (MPa)
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülü (MPa)
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı (MPa)
f_{cm}	: Betonun ortalama basınç dayanımı (MPa)
f_{ctk}	: Betonun karakteristik çekme dayanımı (MPa)
f_{fe}	: Lifli polimerlerin kopma dayanımı (MPa)
f_{yk}	: Boyuna donatının karakteristik akma dayanımı (MPa)
f_{ywk}	: Enine donatının karakteristik akma dayanımı (MPa)
k	: Birim deformasyon azaltma katsayısı
L	: Numune test bölgesi uzunluğu (mm)
Mr	: Kiriş kesiti moment kapasitesi (N.mm)
n_f	: Tek yüzdeki LP sargı tabaka sayısı
N_u	: Yapı elemanının üzerindeki eksenel kuvvet (N)
P_M	: Moment kapasitesinden hareketle hesaplanan kiriş orta nokta yükü (N)
P_V	: Kesme kapasitesinden hareketle hesaplanan kiriş orta nokta yükü (N)
s	: Etriyelerin eksenden eksene aralığı (mm)
s_f	: LP şeritlerin eksenden eksene aralığı (mm)
t_f	: Bir tabaka için LP kalınlığı (mm)
V_c	: Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı (N)
V_f	: Kesme kuvveti dayanımına lifli polimerlerin katkısı (N)
V_{max}	: Asal basınç gerilmelerini sınırlamak için tanımlanan kesme kuvveti (N)
V_r	: Kirişin kesme kapasitesi (N)
V_s	: Kesme kuvveti dayanımına etriyenin katkısı (N)
w_f	: LP şeridin genişliği (mm)
\emptyset	: Çatlak açısı (rad)
α	: Kiriş eksenini ile LP şerit eksenini arasındaki yapıştırılma açısı (rad)
AL	: Numune test bölgesi boy uzaması (mm)
ε_f	: LP birim uzama limiti
$\varepsilon_{f,e}$: LP birim uzama limiti
$\varepsilon_{fd,e}$: LP dizayn birim uzama limiti
ε_{fu}	: LP kopma birim uzama limiti
ρ_l	: Boyuna donatı oranı
ρ_f	: LP oranı
$BDÖ$: Birim Deformasyon Ölçer
$ŞDÖ$: Şekil Değiştirme Ölçer

BETONARME KİRİŞLERİN KESMEYE DAYANIMLARININ LİFLİ POLİMERLERLE ARTTIRILMASI

Yılmaz Zafer VULAŞ

Anahtar Kelimeler: Kesme, Betonarme, Kiriş, Lifli Polimer, Epoksi, Güçlendirme

ÖZET

Kesme dayanımı yetersiz olan betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için birçok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi ve belki en kolay ve hızlı uygulananı da lifli polimerlerin epoksi ile kiriş yüzeyine dışarıdan yapıştırılarak yapılan güçlendirme şeklidir. Burada verilen çalışmanın amacı, kesmeye karşı lifli polimerler ile güçlendirilen kirişlerin dayanım ve davranışlarının incelenmesi ve güçlendirme yönteminin etkinliği ile oluşan göçme mekanizmalarının araştırılmasıdır. Bu amaçla 7 adet T-kesitli kesme dayanımı yetersiz kiriş elemanı hazırlanmış ve laboratuvarında monotonik artan yük etkisinde test edilmiştir. Deneylerde betonarme kirişleri kesmeye karşı güçlendirmek için elastisite modülleri farklı üç tip lifli polimer malzeme kullanılmıştır. Bunlar CFRP, GFRP, Hi-CFRP'dir. Ayrıca lifli polimerlerin kiriş üzerinde yapılan ankraj şekli de diğer bir değişken olarak seçilmiştir. Her bir farklı elastisite modülüne sahip lifli polimer güçlendirme şeritleri, T kesitli kirişe tabla altından ankraj yapılarak ve yapılmayarak uygulanmıştır. Böylece kirişlerde kesme dayanımının artırılması amacıyla yapıştırılan lifli polimer şeritlerin ankrajlı ve ankrajsız etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Deney verilerinin değerlendirilmesinden, kirişlerde lifli polimer uygulaması ile kesme dayanımının arttırılabildiği, ancak bu artışın ve göçmedeki davranışın lifli polimerin elastisite modülü ve daha önemlisi ankraj şekli ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür.

SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING FRP STRIPS

Yılmaz Zafer VULAŞ

Keywords: Shear, Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Polymer, Epoxy, Strengthening

ABSTRACT

There are various shear strengthening techniques applicable to the shear deficient reinforced concrete beams. Among these, the use of externally bonded Fiber Reinforced Polymer (FRP) strips may be considered as a relatively novel, easy and fast technique for shear strengthening. The purpose of this study is to investigate the level of shear strengthening attained through FRP strips. Besides, shear behavior, and failure mechanisms are also evaluated. Seven reinforced concrete shear-deficient T-beams, were cast and tested under monotonically increasing gravity loads. Three FRP materials with different Modulus of Elasticity were used for strengthening of the beams. These materials were Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) and High Modulus of Elasticity Carbon Fiber Reinforced Polymer (Hi-CFRP) strips. The anchorage of the FRP materials on the reinforced concrete beams was another variable for the experimental investigation. The FRP strips with different elastic modules were applied either by anchoring the strips to the slab of the T-beam or by bonding only to the beam side faces. The experiments yield that, shear deficient beams may well be strengthened by the externally applied FRP strips but, the level of strength enhancement and the failure pattern is closely influenced by the elastic modulus and the anchorage type of the FRP strips.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Açıklamalar

Betonarme yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanlar genelde eğilme, kesme ve eksenel basınç veya eksenel çekme kuvvetlerinin etkisi altında bulunurlar. Kesme ve eksenel kuvvetlerden dolayı oluşan asal çekme gerilmeleri, betonun düşük çekme dayanımı olması nedeniyle önemli sorunlar doğurmaktadır. Betonun kesme ve basınç dayanımı, çekme dayanımından yüksektir. Bu nedenle basit kesme durumunda bile kırılma şekli, asal çekme gerilmelerine dik yönde gelişen eğik çatlaklar boyunca oluşan gevrek kırılma düzlemleri ile olacaktır. Asal çekme gerilmeleri betonarme yapı elemanında göçmeye götürecek büyük boyutlarda eğik kesme çatlaklarına sebep olabilir. Betonarme elemandaki eğik çekme kırılması ani ve gevrek gelişir. Kesme göçmesi şeklinde nitelendirilen bu kırılma şekli betonarme yapı elemanları için istenmeyen bir göçme durumudur. Betonarme elemanlarda oluşan asal çekme gerilmelerini karşılamak için uygun beton sınıfı ve kesme donatıları kullanılmaktadır. Oluşan asal çekme gerilmeler için betonarme elemanlarda etriye, pilye, çiroz ve hasır donatısı türünde kesme donatıları kullanılmaktadır.

Bugün kullandığımız tüm yönetmeliklerde, kesme gerilmelerinin küçüklükleri ne olursa olsun belli konstrüktif kriterlerde kesme donatısı kullanma zorunluluğu bulunmaktadır. Kesme donatısının kullanılmasındaki amaç eğik çekme göçmesini engellemek, betonarme elemanın eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Yetersiz kesme donatılı betonarme kirişlerde eleman eğilme kapasitesine ulaşmadan gelişen kesme çatlaklarının hızla büyümesi ile gevrek ve ani bir şekilde göçecektir. Etriye donatıları, kullanım durumlarına göre çeşitli şekillerde bükülerek boyuna donatılara dik olarak yerleştirilirler. Bu donatıların temel fonksiyonları, kesme kuvvetlerini karşılamak, kesme kuvvetlerinden dolayı eğik çatlakların açılmasına mani olmak ve betonarme elemanın kesme göçmesine uğramadan eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Yeterli etriyesi bulunan elemanda eğilme davranışı baskın

olacak ve eğik çatlakları tutarak göçme, eğilme donatısının önce eğilme kapasitesine ulaşarak akmasıyla oluşacaktır.

Kesme donatılı betonarme kirişlerde, asal çekme gerilmelerinin betonun eğik çekme dayanımından küçük olduğu düzlemlerde, etriyeler herhangi bir gerilme taşımazlar. Ancak asal çekme gerilmeleri betonun eğik çekme dayanımını aşmasıyla büyüyen eğik çatlaklar etriyelerde ani ve büyük gerilme oluşumuna sebep olacaktır. Etriyelerin etkisi bu eğik çatlakların oluşumundan sonra görülecektir. Etriyelerin seyrek konduğu durumlarda oluşan eğik çatlak yeterli sayıda etriye ile karşılanamayacağından kiriş kesmeye karşı yeterli dayanımı gösteremeyecektir. Yeterli kesme dayanımı, sadece eğik çatlağın kesiştiği etriye sayısının artırılması ile değil kullanılan etriyenin mekanik özelliklerinin artması ile de sağlanabilir. Ancak artan etriye mekanik özellikleri neticesinde daha geniş aralıklar kullanılması da bu çatlakların eğimi dikkate alındığında uygun olmayacaktır.

Günümüzdeki mevcut yapı stoğu yeni yönetmeliklere göre depremin meydana getirdiği etkiler açısından analiz edildiğinde birçok elemanın güçlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Burada geçmişte kullanılan yapım yöntemlerinin yetersizliği, kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin yetersizliği, kullanılan yapı elemanlarının kesitlerindeki yetersizlikler, betonda zamana bağlı oluşan durabilite sorunu nedeniyle donatıda meydana gelen korozyon en önemli nedenler olarak gösterilebilir. Ayrıca yapıların kullanım amacının değişmesi neticesinde yapının daha büyük yüklerin etkisi altında kalması da güçlendirmenin gerekliliğini oluşturmaktadır.

Günümüzde onarım ve güçlendirme yapmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yöntem kirişlere dışarıdan yapıştırılan lifli polimer şeritlerdir. Güçlendirmede kullanılan lifli polimer şeritler epoksi gibi çok güçlü yapıştırıcılar vasıtasıyla kirişlere yapıştırılabilmektedir. Bu güçlendirme yöntemiyle kesme donatısı yetersiz olan kirişlerde kesme dayanımı önemli oranda artırılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu onarım ve güçlendirme yönteminde lifli polimer şeritleri, genellikle analiz veya yapılan araştırmalarda ortaya çıkan güvenilir

hesap yöntemlerine dayanarak belirlenen kıstaslarda kiriş gövdesine yapıştırılmaktadır. Hesap yapılan durumlarda şeritlerin tam anlamı ile etkili olacağı varsayılarak ilgili yönetmeliklerdeki kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi yöntemleri izlenecektir.

Ancak ilgili yönetmeliklerde, lifli polimer şeritlerin kullanım şekillerine göre ne düzeyde etkin oldukları, yapıştırma şekillerinin davranış ve dayanımı nasıl etkiledikleri belirtilmemektedir. Dolayısıyla bu yöntemin deneysel araştırmasının yapılması, dayanım ve davranışın açık bir biçimde irdelenmesi ve izlenecek hesap yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Kesme dayanımı yeterli olmayan betonarme kirişlerin kesme dayanımlarını arttırmaya yönelik yaygın olarak kullanılan güçlendirme yöntemi kirişlere dışarıdan epoksi ile lifli polimer şeritlerin yapıştırılması yöntemidir. Bu yöntemi uygularken döşemeye ankraj yapmanın ve farklı mekanik özelliklere sahip karbon lifli polimer şerit, cam lifli polimer şerit, yüksek elastisite modüllü liflere sahip lifli polimer şeritlerin dayanıma ve davranışa etkisinin irdelenmesi çalışmanın amacı olarak belirlenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda bir adet kontrol elemanı, güçlendirmede kullanılacak üç farklı malzemeyi döşemeye ankraj yaparak ve yapmayarak test etmek için altı adet eleman olmak üzere toplam yedi adet T kesitli basit mesnetli kesmeye karşı yetersiz deney elemanı modellenerek tasarlanmış ve imal edilmiştir. İmal edilen bütün kirişlerde geometri, boyuna donatı çapı ve adedi, etriye çapı ve aralıkları aynıdır. Ayrıca güçlendirmede kullanılan FRP şeritlerin tamamı aynı kalınlıkta ve eksenden eksene aynı aralıkta yapıştırılmıştır.

Deneysel programda göz önünde bulundurulacak parametre her bir FRP malzemesinin döşemeye ankrajlı ve ankrajsız olarak yapıştırılmasıdır. Aynı malzeme ile güçlendirilen deney elemanlarında döşemeye ankraj yapılan ve yapılmayan

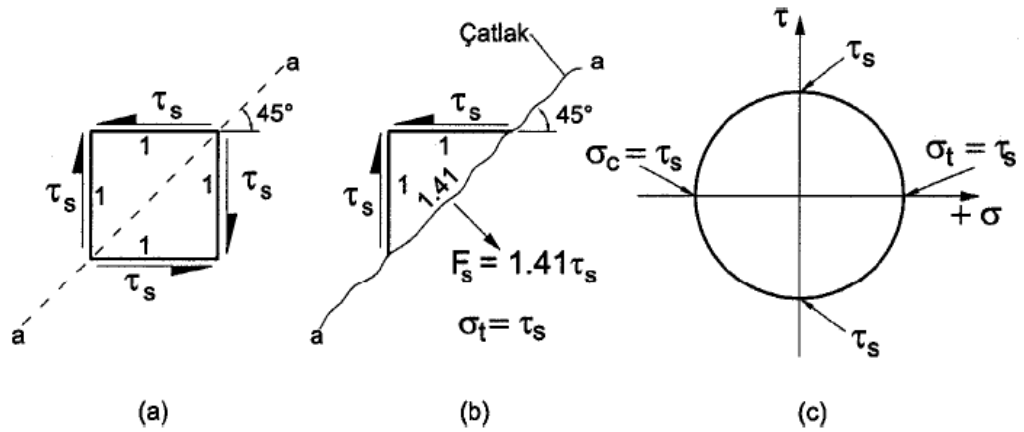
durumlarda ortaya çıkan sonuçların dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkisi irdelenecektir. Ayrıca üç farklı malzeme ile döşemeye ankraj yapılarak güçlendirilen kirişler kendi aralarında, ankraj yapılmayarak güçlendirme uygulanan kirişler kendi aralarında karşılaştırılarak kullanılan farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizması üzerindeki etkisi irdelenecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde öncelikle kirişlerde kesme kuvvetlerinin oluşum mekanizması anlatılmıştır. Daha sonra betonarme elemanların kesme davranışı, kesmeye karşı dayanım hesabı ve konuyla ilgili daha önce yapılmış araştırmalar incelenmiştir.

2.1 Kesme Kuvvetlerinin Oluşum Mekanizması

Betonun kesme ve basınç dayanımı, çekme dayanımından yüksek olduğundan basit kesme durumunda bile kırılma şekli, asal çekme gerilmelerine dik yönde gelişen eğik çatlaklar boyunca gelişen gevrek kırılma olacaktır. Bu durum Şekil 2.1 de gösterilmiştir.

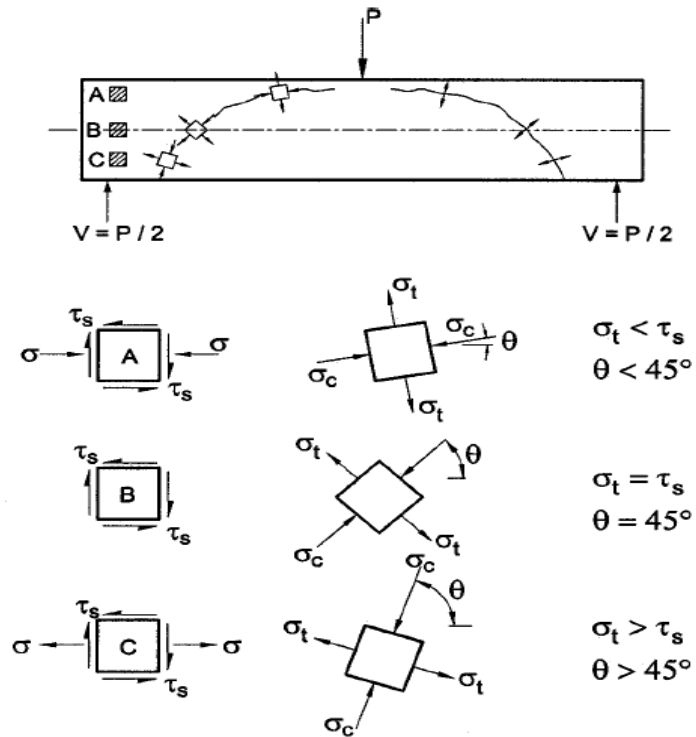


Şekil 2.1: Basit kesme altında asal gerilmeler [1]

Basit kesme durumunda, asal çekme ve asal basınç gerilmeleri kesme gerilmesine eşit olacağından kırılma, en düşük dayanım olan çekme nedeni ile oluşacaktır. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilmelerinin etkidiği yüzeye 45° lik açı yapan bir düzlem üzerinde etkiyeceğinden, kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla meydana gelecektir (Şekil 2.1 b). Asal çekme gerilmelerinden dolayı oluşan

bu tür çatlaklara “eğik çekme çatlakı”, buna neden olan asal gerilmelere de “eğik çekme gerilmesi” ismi verilmektedir.

Asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan bu eğik çatlaklar gevrek ve ani kırılmalara neden olduğu için son derece tehlikeli çatlaklardır. Kesme ile birlikte normal gerilmelerin etkidiği durumlarda eğik çatlakın eğimi, asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır. Şekil 2.2 de simetrik yüklenmiş bir betonarme kiriş gösterilmiştir. Tarafsız eksen, tarafsız eksenin üstü ve tarafsız eksenin altında kalan ve A, B, C olarak işaretlenen üç elemana etkiyen gerilmeler ile bu gerilmelerin oluşturduğu asal gerilmeler, şekilde ayrı ayrı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tarafsız eksen düzeyinde normal gerilmeler sıfır olduğundan, çatlama kiriş eksenine 45° lik bir açıda oluşmaktadır. Normal gerilmelerin varlığı, hem asal çekme gerilmelerinin büyüklüğünü hem de eğimini etkilemektedir. (Şekil 2.2) Çatlama asal çekme gerilmelerine dik yönde olduğundan Şekil 2.2 de gösterildiği gibi kirişin alt yüzünden üst yüzüne doğru uzayan eğik çatlakın eğimi azalmaktadır. Deneysel veriler, çatlak eğimi ile ilgili yapılan bu kuramsal irdelemeyi doğrulamaktadır. [1]



Şekil 2.2: Asal gerilmelerin yönü [1]

Yukarıda anlatılanlar ışığında betonarmede büyük sorunlara yol açan ve gevrek bir kırılmaya neden olan “eğik çatlakların” , kesme gerilmelerinden değil, asal çekme gerilmelerinden kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Bu neden literatürde “kesme sorunu” olarak geçen bu olay, aslında asal çekme sorunudur. Kesme, ancak asal çekme gerilmeleri için bir ölçü olarak kullanılabilir. Alınacak önlemler, kesme gerilmeleri için değil, asal çekme gerilmeleri için olmalıdır. [1]

2.2 Betonarme Elemanların Kesme Davranışları

Betonarme elemanların kesme davranışını belirleyen en önemli faktörlerden biri de kirişe gelen yükün mesnete olan uzaklığının (a), faydalı derinliğe (d) oranıdır. Bu oranın (a/d) aynı özellikli kirişlerde alacağı farklı değerler, bu kirişlerde farklı dayanımlara, çatlak oluşumuna ve göçme mekanizmasına neden olmaktadır.

a/d oranının çok büyük olduğu durumda ($a/d > 7$) kiriş taşıma gücüne çekme donatısının akması ile ulaşmaktadır. Bu şekilde yüklü bir kirişte, asal çekme gerilmelerinin düşük düzeyde kalışı nedeniyle kirişte eğik çatlaklar oluşmamakta ve dolayısıyla göçme üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmamaktadır.

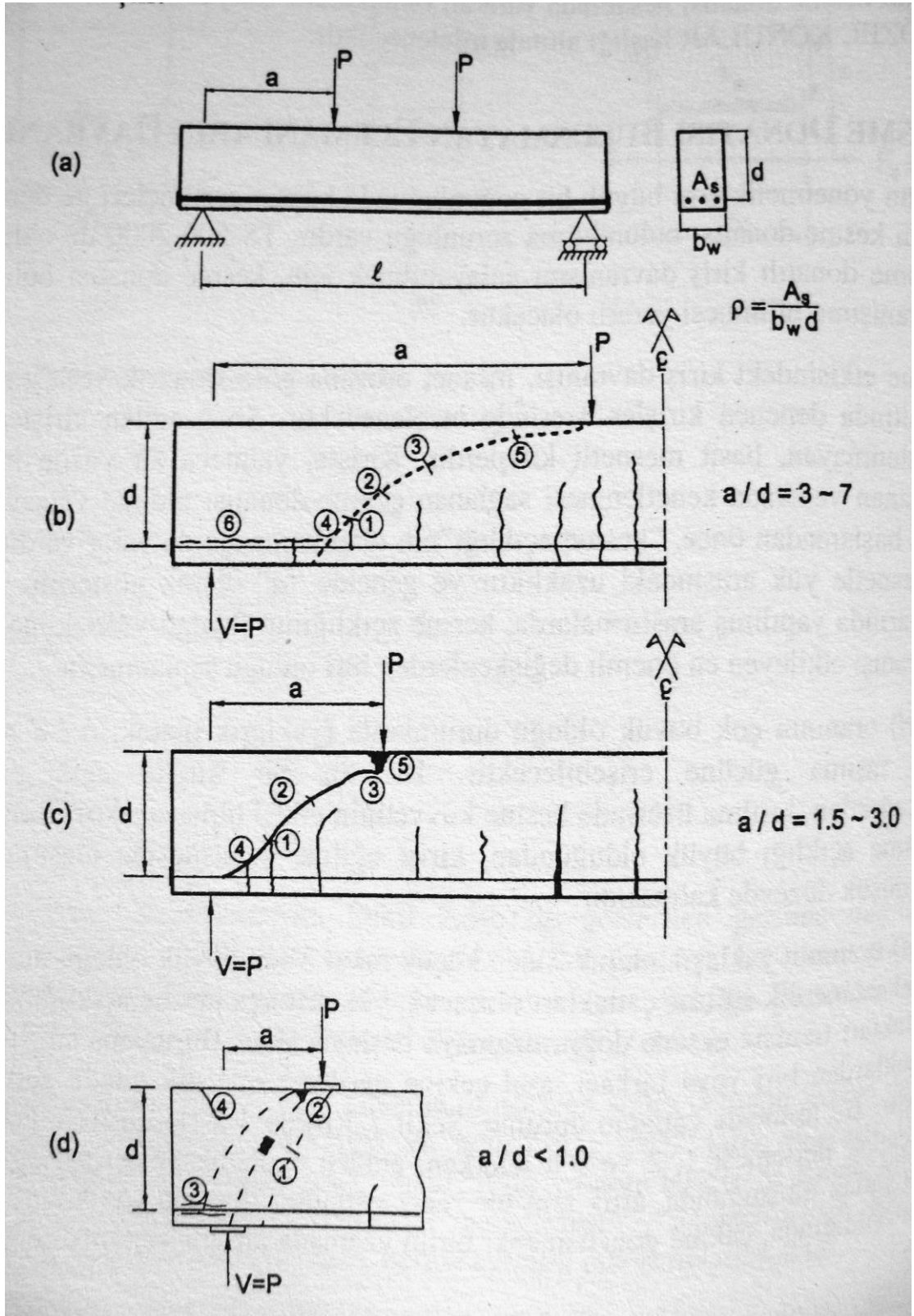
a/d oranının yaklaşık $3 < a/d < 7$ olduğu durumlarda önce kiriş eksenine dik eğilme çatlakları oluşacak, yük arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. Bu uzama sırasında sözü edilen çatlaklardan biri veya birkaçı, asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşmeye başlayacaktır. Bu aşamada çatlakın durumu, Şekil 2.3 (b) de 1 ve 2 ile gösterilmiştir. Şekil 2.3 (b) de çatlak ilerlemesi 1, 2 ve 3 ü izlerken, aniden 4 ile gösterilen eğik çatlak oluşur. Bu çatlak oluştuğunda, artık tam bir eğik çatlama durumu söz konusudur. Bu aşamaya ulaşıldığında, çekme donatısındaki birim uzamada ani bir sıçrama gözlenir. Bu sıçrama, eğik çatlamanın neden olduğu bir gerilme uyumunu gösterir. Eğik çatlama donatıda ani gerilme artışına neden olduğundan, donatıya paralel aderans çatlakları oluşmaya başlar. Yük biraz arttırıldığında, eğik çatlak Şekil 2.3 (b) de 5 ve 6 ile işaretlenen yönde hızla gelişir ve kiriş kırılır. Bu kırılma son derece ani ve gevrek bir kırılmadır. Şekil 2.3 (b) de donatıya paralel gelişen 6 numaralı çatlak aderans çatlağıdır ve o yörede kenetlenmenin ne kadar zayıf olduğunu göstermektedir. [1]

a/d oranının daha küçük olduğu durumlarda ($1.5 < a/d < 3$) kirişlerde eğik kesme çatlağı oluşmakta ancak bu çatlaklar noktasal yükün altındaki basınç gerilmeleri nedeni ile kiriş üst seviyesine kadar gelişmemekte ve Şekil 2.3 (c) de 2 ile 4 olarak işaretlenen eğik çatlak oluştuktan sonra da kiriş yük taşımaya devam etmektedir. Bu durumda çatlak üstündeki çatlama bölge yüksek basınç ve kayma gerilmelerine maruz kalmakta ve yükün daha büyük düzeylerinde bu bölgede beton basınç gerilmeleri aşarak Şekil 2.3 (c) de 5 olarak işaretlenen beton ezilmekte ve kiriş kırılmaktadır.

a/d oranının çok küçük olduğu durumlarda ise ($a/d \leq 1.0$) kiriş kırılma konumuna ulaşmadan donatı akar, yani kiriş eğilme kapasitesine ulaşır. Kırılma iki ayrı biçimde oluşabilir. Birincisi Şekil 2.3 (d) de 1 ve 2 ile işaretlenen gövdenin basınç gerilmeleri nedeni ile ezilmesidir. İkincisi de Şekil 2.3 (d) de 3 olarak işaretlenen basıncın aktarılması sırasında donatıda oluşan yüksek gerilmeler nedeni ile mesnet ötesinde kenetlenmenin yok olmasıdır. Bilinen eğilme davranışından çok değişik olarak mesnet bölgesinde donatıdaki gerilmeler çok yüksek olduğundan, bu tür kirişlerde kenetlenme büyük sorun yaratır. Gergili kemer davranışının doğal sonucu olarak, Şekil 2.3 (d) de 4 olarak işaretlenmiş kiriş üst yüzünde çekme çatlakları da oluşabilir.

[1]

Yukarıda anlatılanların ışığında, (a/d) oranının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. (a/d) oranı sadece noktasal yüklü kirişler için geçerli olduğundan bu değişkeni yayılı yük durumunu kapsayacak bir biçimde, $M/(V.d)$ oranına göre değiştirmek daha uygun olacaktır.



Şekil 2.3: Eğik çatlakların oluşumu [1]

2.3 Kesitlerin Kesme Dayanımı Hesabı

Yetersiz kesme donatısına sahip betonarme yapı elemanlarının lifli polimerlerle kesme dayanımlarının arttırılmasına yönelik hesap yöntemleri [2], [3], [4], [5], [6] ve [7] şartnamelerinde bulunmaktadır. [2] 'nin Bölüm 7E 'sinde lifli polimerlerle sargılanmış kirişlerin kesme dayanımı aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$V_r = V_c + V_s + V_f \leq V_{max} \quad (2.1)$$

Kesme kuvvetine betonun katkısı V_c tanımlandığı yönetmeliklerdeki eşitlikleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$V_c = 0,8 V_{cr} \left[1 + \gamma \cdot \frac{N_d}{A_c} \right] \quad (2.2)$$

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctk} b_w d$$

$$f_{ctk} = 0,35 \sqrt{f_{ck}}$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f_{ck}} b_w d}{6} \quad (2.3)$$

$$V_c = [0,12 k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + (0,15 N_u/A_c)] \cdot b_w d \quad (2.4)$$

$$k = 1,6 - d^{(1)}$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b_w d}$$

(1) Önceki formüllerde mm cinsinden olan kiriş faydalı derinliği “d” sadece bu formülde metre cinsindedir.

Kesme kuvvetine kesme donatısının, yani etriyenin katkısı olan V_s yönetmeliklerde aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$V_s = A_{sw} f_{yw} \frac{d}{s} \quad (2.5)$$

Kesme kuvvetine lifli polimerlerin katkısı V_f sargılamanın şeritler halinde olması durumunda [2], [5], [7] de aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$V_f = \frac{2.n_f.t_f.w_f.E_f.\varepsilon_f.d}{s_f} \quad (2.6)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (2.7)$$

$$A_{fv} = 2.n.t_f.w_f \quad (2.8)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (2.9)$$

$$V_f = 0,9.\varepsilon_{fd,e}.E_{fu}.\rho_f.b_w.d.(\cot \phi + \cot \alpha).\sin \alpha \quad (2.10)$$

$$\rho_f = \frac{2.t_f.b_f}{b_w.s_f}$$

- FRP ile sargılamanın çepeçevre tam olarak yapıldığı veya ankraj ile yapıldığı durumda;

$$\varepsilon_{fe} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}.\rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (2.11)$$

- FRP ile sargılamanın yüzeye veya U şeklinde olduğu durumda;

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[\underbrace{0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}}_{\text{beton yüzeyden ayrılma}}, \underbrace{0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu}}_{\text{kopma}} \right] \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = k \cdot \varepsilon_{fu} \quad , \quad k = 0.8 \quad (2.13)$$

Ülkemizdeki konuyla ilgili güncel yönetmelik olan [2]' e göre kirişlerin kesme dayanımlarının artırılması için kullanılan lifli polimerlerin şeritler halinde kullanılması durumunda şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f), lifli polimer şerit genişliği (w_f) ile kiriş faydalı derinliğinin (d) dörtte birinin toplamını ($w_f + d/4$) geçmemesi koşulu bulunmaktadır.

$$s_f \leq w_f + \frac{d}{4} \quad (2.14)$$

Ayrıca aynı yönetmelikte lifli polimerlerin etkin birim uzama sınırının (ε_f) 0,004 ten ve kopma birim uzamasının (ε_{fu}) yarısından küçük olma koşulu vardır.

$$\varepsilon_f \leq 0,004$$

$$\varepsilon_f \leq 0,50 \varepsilon_{fu} \quad (2.15)$$

2.4 Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Araştırmalar

Uygulamaya yönelik kirişlerin güçlendirilmesi ile ilgili birçok araştırmalar yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmalarda tek tip malzemenin dışarıdan kirişlere yapıştırılarak uygulanan güçlendirmenin etkinliği araştırılmıştır. Oysa farklı malzemelerin farklı mekaniksel özellikleri karşılaştırılarak etkinliklerinin araştırılması konusunda çalışmanın çok az olması göze çarpmaktadır. Konuyla ilgili literatürde bulunan çalışmalarda genelde karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) ve çelik levhalar kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Taljsten ve Elfgen 2000 [8], yaptıkları deneysel çalışmada CFRP örgü ve şeritlerin farklı yöntemlerle betonarme kirişlerin yüzeylerine epoksi ile yapıştırarak uygulanmasını test etmişlerdir. Bu çalışmada güçlendirilen kirişlerin kapasite artışları ve kullanılan 3 farklı güçlendirme tekniğinin etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda 8 adet deney numunesi 4 noktadan eğilme yöntemine maruz bırakılarak test edilmiştir. Deney numunelerinin orta nokta ve mesnet deplasman ölçüleri alınmıştır. Güçlendirilmiş kirişler, çelik liflerdeki çekmeden dolayı bu liflerin kopması, eğilme etkisinde beton basınç bloğunun ezilmesi ve CFRP lifleri betona yapıştıran epoksinin sıyrılması şeklinde olmak üzere 3 farklı şekilde kırılmıştır. Deney sonuçlarına göre betonarme kirişlere yapıştırılan örgülerle çok iyi bir kesme güçlendirmesi sağlanmıştır. Kesme dayanımlarında maksimum %300 lük bir artış olmuş ve kırılma anında gevrek davranışa sebep olan çok fazla enerji boşalımı meydana gelmiştir.

Al-Amery ve Al-Mahaidi [9], çalışmalarında betonarme kirişlerin CFRP şeritlerle kesmeye ve eğilmeye karşı güçlendirilmesini amaçlamışlardır. Bir referans elemanı ve 6 adet güçlendirilmiş kiriş olmak üzere toplam 7 adet kiriş test edilmiştir. Güçlendirilen kirişlerde CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmalarını engellemek için CFRP bantlar kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde farklı CFRP şeritlerdeki şekil değiştirme ve deformasyon değerleri aynı oranda değişmiştir. Ayrıca bazı CFRP şeritleri beton yüzeyine yapıştıran epoksinin kopması neticesinde yüzeyden soyulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda kullanılan CFRP bantların ve şeritlerin birlikte çalışması sayesinde kirişlerin kesme dayanımlarında önemli bir oranda artış sağlanmıştır. Kullanılan CFRP lerin kiriş yüzeyinden soyulması engellenmiş ve kirişler sünek bir davranış sergilemişlerdir. Kullanılan CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasını engellemek için geliştirilen bir ankraj yöntemi uygulanmıştır. CFRP şeritler, CFRP bantlarla betona ankre edildiği numunelerde dayanımdaki artış %95 civarlarında gerçekleşmiştir. Ancak CFRP bantların kullanılmadığı ve CFRP şeritlerin tek başına kullanıldığı numunelerde bu dayanım artışı sadece %15 civarlarında kalmıştır.

Jayaprakash at all. 2007 [10], yaptığı çalışmasında betonarme kirişleri çift doğrultulu CFRP ile güçlendirilerek kirişlerin kesme dayanımlarının arttırılmasını hedeflemişlerdir. Bu çalışmada 16 adet kiriş test edilmiştir. Bu kirişlerin 4 tanesi referans elemanıdır. 6 kirişe hasar verilip CFRP ile onarılmıştır. 6 kiriş ise üretildikten sonra herhangi bir hasar verilmeden CFRP ile güçlendirilmiştir. Deneyleerde 4 farklı deney değişkeni dikkate alınmıştır. Bu nedenle 4 adet referans elemanı kullanılmıştır. Deneyleerde dikkate alınan deney değişkenleri; boyuna çekme donatısı oranı, kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı (a/d), CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe, CFRP şeritlerin sayısı ve yerleşimidir. Yapılan deneyleer neticesinde CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımları referans numunelerine göre %11 ile %139 arasında artış göstermiştir. CFRP yapıştırılan kirişlerin kesme dayanımları, boyuna donatı oranının %56 arttırılması neticesinde %76 artış göstermişlerdir. 45° açıyla CFRP şeritlerin yapıştırıldığı kirişlerde oluşan çatlak dağılımı 90° açı ile yapıştırılan CFRP şeritli kirişlerden daha az olmuştur. 45° açıyla CFRP yapıştırılan kirişlerde, 90° açıyla CFRP yapıştırılan kirişlere göre %42 daha fazla kesme dayanımı artışı sağlanmıştır. Yapıştırılan CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin rijitlikleri doğrudan etkilediği anlaşılmıştır. Uygulanan CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe azaldıkça kirişlerin rijitlikleri artmıştır. Uygulamanın yapılması esnasında işçiliğin önemine ve uygulama zorluğuna dikkat çekilmiştir. Uygulama için işçiliği kolaylaştırmak için şeritlerin kiriş yüzeylerine yapıştırılırken, şeritlerin ekseninin kiriş eksenine ile yaptığı açıya göre yapıştırma modelleri önerilmiştir.

Francesca Ceroni at all. 2007 [11], yaptıkları çalışmalarda CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için hazırlanmış farklı ankraj çözümlerinin etkisinin belirlenmesi için 14 adet T kesitli deney elemanı çalışması tasarlanmıştır. Her eleman 300 mm aralıklı iki beton blok olarak yapılmıştır. Deney elemanlarının karşılıklı iki kenarı üzerine 100 mm genişliğe sahip CFRP şeritler yapıştırılmıştır. CFRP şeritler 6 elemanda tüm yüzey boyunca yapıştırılırken, diğer 8 elemanda CFRP şeritler beton bloğun 90° lik köşeleri epoksi ile doldurulup 25 mm çaplı dairesel form verilerek T kesitin alt kenarlarına kadar uzatılmıştır. CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için geliştirilen ankrajlar dört farklı şekilde uygulanmıştır. Birinci tipte fan ankrajlar tablanın üst kısmına geçmiş ve tüm ankrajlar birbirine CFRP kumaşla bağlantısı sağlanmıştır.

İkinci tipte ankrajlar tablanın üstüne geçmiş ve uçları fan şeklinde açılmıştır. Üçüncü tipte ankrajlar tablanın üstüne geçmiş ve karşılıklı ankrajlar tek parça halinde birleştirilmiştir. Dördüncü tipte fan ankrajlar tablanın üstüne geçmemiş karşılıklı ankrajların birbiriyle bağlantısı yapılmamış ve tabla altına fan şeklinde yapıştırılmıştır. Uygulanan fan ankrajların derinliği 75 mm, ankraj çapı 7 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda değişik şekilde ankrajlarla CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilen kirişlerin davranış, dayanım artışı ve göçme tipi ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Deney elemanlarında, ampirik formüllerle hesaplanan dayanıma erişmeden CFRP şeritlerde soyulma olmuştur. Deneyleerde en iyi sonuçlar kirişler çekme göçmesine ulaştığında elde edilmiştir. Ayrıca en kötü sonuç ta CFRP şeritlerin L şeklinde ankrajsız ve ankrajlı olduğu durumlarda elde edilmiştir.

Chajes at all. 1995 [12], GFRP, grafit ve aramid lifleri kullanarak betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmışlardır. Güçlendirmede bu malzemeleri tercih etmelerinde en büyük sebepler liflerin kimyasal etkilere dayanıklı, yalıtkan, paslanmaz olmaları ve manyetik olmamalarıdır. Deney çalışmalar için 12 adet T kesitli betonarme kiriş serisi hazırlamışlardır. Bu lifleri epoksi yapıştırıcı ile dışarıdan kirişlere uygulama yapmışlardır. Deney numunelerinin üretimi esnasında, numuneler ACI yapı şartnamesine göre tasarlanmıştır. Numunelerde deneyin amacına yönelik istenilen gevrek kırılmayı sağlamak için kesme donatısı kullanılmamış olup, eğilme donatısı olarak bir adet no 5 grade 60 donatı çeliği kullanmışlardır. Polimer lifler betonarme kirişe yapıştırılmadan önce kiriş yüzeyi pürüzlendirilmiştir. İki bileşenli epoksi, polimer liflere 1.5 mm kalınlığında sürülmüş, kiriş yüzeyine yapıştırılarak vakum uygulanmıştır. Üretilen 12 adet deney numunesinin 4 tanesi güçlendirilmeyerek eğilme testine tabi tutulmuştur. Diğer 8 numune güçlendirme yapılarak eğilme testine tabi tutulmuştur. Yapılan testler neticesinde güçlendirilen numunelerin göçme yüklerinde %60 ile %150 oranı arasında artış sağlanmıştır.

Sinan Altın, Tuğrul Tankut, Özgür Anıl ve Yusuf Demirel 2005 [13], T kesitli kirişlerin kelepçeleme metodu kullanarak kesme dayanımının arttırılmasına yönelik çalışma yapmışlardır. Çalışmada kirişlerin, kelepçelerle etriye gibi dışarıdan

sargılanarak kesme dayanımını arttırılması ve eğilme etkisi altında davranışlarının incelenmesi yapılmıştır. Deneylede 13 adet T kesitli kiriş kullanılmış olup, iki farklı grupta test edilmiştir. Birinci gruptaki kirişlerin testlerinde a/d oranı 4.5, ikinci grupta ise 3.3 olarak seçilmiştir. Bu nedenle deneylede kiriş açıklıkları mesnetten mesnete 3900 ve 3000 mm olarak iki ayrı grupta test yapılmıştır. Deneylede bir diğer değişken olarak ta farklı kelepçe aralıkları seçilmiştir. Deneylede kullanılan kelepçelerin çubuklarının çapı 10 mm, yüksekliği 500 mm' dir. Her iki çubuğun alttan ve üstten 75 mm' lik kısımlarına 7.9 mm çapında cıvata dişi açılmıştır. Kelepçeler kiriş döşemesine delikler açıldıktan sonra kiriş üst yüzeyinde sabitlenmeden önce yükleme çerçevesi ile ardgerme uygulanmış ve kirişe sabitlenmiştir. Ayrıca kelepçeler kiriş altından ebatları 40x40 mm, kalınlığı 4 mm olan kutu profil yardımıyla kirişe sabitlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde a/d oranının 4.5 olduğu numunelerde ilk eğilme çatlağı yük seviyesi, a/d oranının 3.3 olduğu numunelerinkinden daha düşüktür. Kesme çatlaklarının oluştuğu yük, a/d oranının 4.5 olduğu numunelerde akma dayanımının %18' i, a/d oranının 3.3 olduğu numunelerde ise %26' sı seviyelerinde oluşmuştur. Yapılan deneyler neticesinde a/d oranının 4.5 olduğu numunelerin göçme yükleri, a/d oranının 3.3 olduğu numunelerinkinden daha düşük seviyelerde kalmıştır. Deneylede bir numune hariç tüm kirişler eğilme göçmesine uğramıştır.

Sinan Altın, Özgür Anıl ve Yeliz Gökten 2004 [14], yapmış oldukları deneysel çalışmada kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin, kesme gereksinimlerini karşılayabilen, sahada üretilebilen ve uygulaması kolay olan bir kelepçe türünün geliştirilmesini amaçlamışlardır. Bu çalışmada geliştirilen kelepçeleme sistemi, normal bir donatının U biçiminde bükülüp açık olan uçlarından çelik bir lama ile kirişe sabitlenmesiyle oluşturulmuştur. Düzenlenen deneysel çalışmada farklı düzeylerde yetersiz etriyeli dikdörtgen kesitli kirişler bu tür kelepçeler kullanılarak güçlendirilmiştir. Deneylede kullanılan kelepçelerin çapı 10 mm, açılan dişerin çapı da 7.9 mm olup tüm kelepçeler düz donatıdan imal edilmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı $a/d = 4$ olarak seçilmiştir. Deney programında kesme dayanımları birbirinden farklı beş adet deney elemanı üretilerek test edilmiştir. Deney elemanlarında etriye oranı (ρ_s) ile kelepçe oranının (ρ_{cl}) toplamı 0.0062 olacak şekilde deney elemanlarında farklı

etriye ve kelepçe oranları denenmiştir. Deney elemanlarından şahit numune dışarıdan güçlendirme yapılmaksızın kesme dayanımı yeterli olacak şekilde kesme donatısı konmuştur. Diğer dört eleman da kesme güçlendirmesi için kesme dayanımı yetersiz elemanlardır. Bu dört elemandan birinde ise hiçbir kesme donatısı bulunmayıp sadece dışarıdan kelepçe ile güçlendirilmiştir. Yapılan deneylerde kirişlerin eğilme göçmesine uğraması hedeflenmiş olup, elemanların gözlenen davranışları ve testlerden elde edilen veriler ışığında dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları irdelenmiştir. Güçlendirilen deney elemanlarında dıştan yerleştirilen kelepçeler kesme çatlaklarını başarılı bir biçimde kontrol etmiş, çatlakların kılcal düzeyde kalmasını ve davranışa sünek eğiliminin hakim olmasını sağlamışlardır. Yapılan deneylerde güçlendirilen bütün kirişler akma yük düzeyine kadar referans elemanına çok yakın bir davranış sergileyerek göçmeye yaklaşık aynı yük ve deplasman düzeylerinde ulaşmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde, kesme dayanımı yetersiz kirişler için kelepçelerle kesme dayanımının artırılması yönteminin başarılı bir teknik olduğu, bu güçlendirme yönteminin kirişlerin sünekliklerine olumlu yönde katkıda buldukları, kelepçelerin kesme çatlaklarını başarılı bir şekilde kontrol ederek çatlağın genişlemesine engel olduğu sonucuna varılmıştır.

Sinan Altın, Özgür Anıl, M. Emin Kara 2005 [15], yapmış oldukları deneysel çalışmada kesme dayanımı yetersiz T kesitli kirişlerin kesme kapasitelerinin dışarıdan yapıştırılan çelik plakalarla güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışma için biri referans elemanı olmak üzere toplam 11 adet kesme dayanımı yetersiz deney elemanı üretilmiştir. Deneylerde amaç, yapılan güçlendirmeler neticesinde kirişlerin sünek davranış göstererek eğilme göçmesine uğramalarını sağlamaktır. Yapılan deneylerde güçlendirilen kirişlerde dışarıdan yapıştırılan çelik plakaların testlerden elde edilen veriler ışığında dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Yapılan deneylerde kese açıklığının faydalı derinliğe oranı $a/d = 4.3$ olarak tercih edilmiştir. Ayrıca deneylerde geometrik özellikleri ve donatılandırılmaları aynı olan elemanlar kullanılmıştır. Deneylerde güçlendirme için kalınlıkları aynı, şekil ve ölçüleri farklı çelik plakalar kullanılmıştır. Ayrıca güçlendirmede kullanılan çelik plakalar farklı aralıklarla kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Yapılan deneylerde bütün elemanlarda ilk eğilme çatlağı moment

kapasitesinin %17' si seviyelerinde oluşmaya başlamıştır. Ayrıca kesme çatlakları da göçme yükünün %40 ile %50'si seviyelerinde gelişmeye başlamıştır. Deneylerde elemanlar benzer deplasman yapmış olup, akma rijitlikleri de birbirine çok yakın çıkmıştır. Testlerde güçlendirilen dokuz elemanın üçü eğilme göçmesine, geri kalanları ise kesme göçmesine uğramışlardır. Yapılan deneyler neticesinde güçlendirmede kullanılan çelik plaka tiplerinin tamamının kirişlerin kesme dayanımlarını, rijitliğini ve duktilitesini arttırdığı, güçlendirilen elemanların benzer davranış gösterdiği, çelik plakaların yapıştırılma şeklinin duktilite davranışını ve göçme türünü etkileyen parametrelere direk etki ettiği, kesme çatlakların açılmasına ve genişlemesine olumlu yönde katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, deney değişkenlerinin adlandırılması, deney numunelerinin üretilmesi ve deney aşamaları anlatılarak okuyucunun yapılan çalışma hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olması hedeflenmiştir.

3.1. Malzemeler

Betonarme eleman üretilmesi için gerekli olan betonun mekanik özellikleri ve donatı çeliğinin özellikleri betonarme kesitin yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olan temel faktörlerdir. Dolayısıyla betonarme eleman üretiminde kullanılan malzemelerin niteliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Aşağıda bu deneysel çalışmada kullanılan malzemeler hakkında kısaca bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Agrega

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan beton karışımlarında kullanılan agregalar Agregasa Gebze Ocağından temin edilmiştir. Üretici firma tarafından elde edilmiş ve tarafımıza verilen agrega deney raporları Tablo 3.1’de verilmiştir.

3.1.2. Çimento

Bu çalışma için üretilen beton karışımlarında Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen PÇ 42,5 (CEM I 42,5 R) portland çimentosu kullanılmıştır. Üretici firma tarafından elde edilmiş ve tarafımıza verilen PÇ 42,5 portland çimentosuna ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan Agregaların Özellikleri (Malzeme tedarikçisi tarafından)

Elek Analizi Sonuçları				
Elek Boyutu (mm)	Elek Altına Geçen Malzeme (%)			
	Kırma Kum	Taştozu	1 No Mıçır	2 No Mıçır
31,5	100	100	100	100
16	100	100	100	63
8	100	100	32	0.1
4	100	98	6	0
2	70	55	0.1	0
1	39	30	0	0
0,5	26	21	0	0
0,25	16	13	0	0
İncelik Modülü				
Fiziksel Özellikler				
Su Emme Oranı (%)	1.0	0.7	0,6	0.6
Özgül Ağırlık (gr/cm³)	2.71	2.72	2.74	2.74

Tablo 3.2: Kullanılan Çimento'nun Kimyasal Özellikleri (Çimento üreticisi tarafından)

Kimyasal Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
SiO₂	19.10
Al₂O₃	4.73
Fe₂O₃	3.35
CaO	62.89
MgO	2.02
SO₃	2.66
Çözünmeyen Kalıntı	1.15
Kızdırma Kaybı	2.50
Serbest Kireç	1.04
Toplam Alkali (Na₂O+0.658 K₂O)	-
Klorür	0.00

Tablo 3.3: Kullanılan Çimento'nun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Çimento üreticisi)

Fiziksel Özellikler	
İncelenen Özellikler	Elde Edilen Değerler
Priz Başlangıcı (saat : dakika)	02:55
Priz Sonu (saat : dakika)	04:00
Hacim Sabitliği (mm)	1.5
Özgül Yüzey (cm ² / gr)	3476
Özgül Ağırlık (gr / cm ³)	3.09
Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımları (MPa)	(40x40x160mm küp numunelerde)
2 Günlük	29.6
28 Günlük	56.1

3.1.3. Süper Akışkanlaştırıcı

Bu çalışmadaki $f_{ck}=12$ MPa basınç dayanımına sahip beton numunelerinin hazırlanmasında Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den sağlanan Sikament NP süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı Sikament NP' ye ait özellikler Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4: Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri (Üretici firma tarafından)

Ticari İsmi	Sika-FFN
Tanım	Yüksek oranda su azaltıcı ve erken/nihai yüksek dayanımlar sağlayan, aynı miktarda su ile betona yüksek oranda akışkanlaştırıcılık sağlayan süper akışkanlaştırıcı beton katkısı
Tip	Vinilkopolimer esaslı polimer sıvı
Görünüş	Kahverengi homojen sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	1.14 ± 0.03 kg/lt
Klorür Miktarı	En fazla % 0.1, klorür içermez
Alkali Miktarı	En fazla % 4.0
Kullanım Oranı	Çimento ağırlığının % 0.6-1.5
Uygunluk	ASTM C 494-81 Tip F ve TS EN 934-2 Standartlarına uygundur

3.1.4. Donatı çeliği

Deney elemanlarının oluşturulmasında, enine donatı olarak $d_b=6$ mm çapında tavlı tel, boyuna donatı olarak ise $d_b=8$ mm ve $d_b=28$ mm çaplarında BÇ-IIIa kalitesinde nervürlü çelikler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan donatı çeliklerinden dörder adet numune alınıp çelik çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneylerden çıkan sonuçların ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanarak karakteristik akma dayanımları hesaplanmıştır. Yapılan çelik çekme deneyleri ve istatistiksel hesaplar neticesinde çekme donatısı olarak kullanılan $d_b = 28$ mm donatı için akma dayanımı $f_{yk} = 481,36$ MPa, basınç donatısı olarak kullanılan $d_b = 8$ mm donatı için akma dayanımı $f_{yk} = 472,84$ MPa, etriye olarak kullanılan $d_b = 6$ mm donatı için akma dayanımı $f_{yk} = 247.31$ MPa bulunmuştur.

3.1.5. FRP Lifler

Bu çalışmada üç farklı FRP (Fiber Reinforced Polimer) lif kullanılmıştır. Bunlar GFRP (Glass Fiber Reinforced Polimer – cam lifli polimer), CFRP (Carbon Fiber

Reinforced Polimer – karbon lifli polimer) ve Hi-CFRP (high modulus Carbon Fiber Reinforced Polimer – yüksek elastisite modüllü karbon lifli polimer) dir. Kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.1.5.1 GFRP Lifler

Deney numunelerinin güçlendirilmesi esnasında örgülü cam lifli elyaf olarak Şişe Cam firması tarafından üretilen liflerden Fibroteks Dokuması kullanılmıştır. Kullanılan GFRP liflerin malzeme özellikleri Tablo 3.5’ de verilmiştir.

Tablo 3.5: GFRP Özellikleri (Üretici firma tarafından)

GFRP Özellikler (Şişe Cam Fibroteks)	Değerler
Adlandırmada Kullanılan Teknik Bilgi (Liflerin ana doğrultusunda)	E-Glass
Elastisite Modülü (MPa)	73000
Çekme Mukavemeti (MPa)	3400
Statik Tasarım İçin Emdirilmiş Çekme Mukavemeti (MPa)	2400
Polimer Tabakadaki Cam Liflerin Ağırlığı (Ana doğrultuda - gr/m ²)	400
Polimer Tabakanın Toplam Ağırlığı	440
Yoğunluk (gr/m ³)	2.54
ϵ_u (%)	4.66
Statik Tasarım İçin Kalınlık (Ağırlık / Yoğunluk – mm)	0.157
Statik Tasarım İçin Teorik Kesit Alanı (1000 mm genişlik için – mm)	157
Statik Tasarım İçin Güvenlik Katsayısı (Elle uygulama için üretici firma S&P tarafından önerilen)	1.4
İzin Verilebilen En Büyük Çekme Kuvveti (F _{ult.}) (1000 mm genişlik için – kN)	$\frac{157 \times 2400}{1.4} = 269.14$
Liflerin esas doğrultusuna dik doğrultuda, ana doğrultuda bulunan lif miktarının %10’ u kullanılmıştır.	

3.1.5.2 CFRP Lifler

Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyaf olarak SikaWrap 230C kullanılmıştır. SikaWrap 230C kuru uygulama yöntemiyle uygulama için tek doğrultulu karbon lifli elyafıdır. Kullanım alanları çok geniş olup betonarme, tuğla ve ahşap yapı elemanlarının eğilmede ve kesmede yük taşıma kapasitelerini arttırmak için kullanılır. CFRP lifler dokumayı dengeli olarak bir arada tutabilmek amacıyla atkı lifleri ile üretilmiştir. (Isıl proses uygulanmıştır.) Kullanılan CFRP liflerin malzeme özellikleri Tablo 3.6' da verilmiştir.

Tablo 3.6: CFRP Özellikleri (Üretici firma tarafından)

CFRP Özellikler (SikaWrap 230C)	Değerler
Birim Ağırlık (gr/m ²)	230 ± 10
Dokuma Tasarım Kalınlığı (mm)	0.131
Lif Yoğunluğu (gr/cm ³)	1.76
Çekme Dayanımı (MPa)	4300
Elastisite Modülü (MPa)	238000
Kopma Uzaması - ϵ_u (%)	1.8

3.1.5.3 Hi-CFRP Lifler

Yapısal güçlendirme için Hi-CFRP olarak SikaWrap 300C HiMod NW kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan yüksek elastisite modüllü karbon lifli elyafın malzeme özellikleri Tablo 3.7' de verilmiştir.

Tablo 3.7: Hi-CFRP Özellikleri (Üretici firma tarafından)

Hi-CFRP Özellikler (SikaWrap 300C HiMod NW)	Değerler
Birim Ağırlık (gr/m ²)	300
Dokuma Tasarım Kalınlığı (mm)	0.140
Çekme Dayanımı (MPa)	2600
Elastisite Modülü (MPa)	640000

3.1.6. Epoksi

Yapısal güçlendirmeler esnasında, CFRP liflerin ve GFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması için kullanılan yapıştırıcı Sikadur 330 epoksi esaslı doyurma reçinesidir. Hi-CFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması için yapıştırıcı olarak Sikadur 300 epoksi esaslı doyurma reçinesi kullanılmıştır. Ayrıca tüm ankrajlı deney kirişlerinde, CFRP, GFRP ve Hi-CFRP ankraj çivilerinin, kiriş tabliye altının kiriş yan yüzeyleri ile birleştiği bölgelerde tabliye içine doğru 45° açı yapacak şekilde açılan ankraj deliklerine yerleştirilmesi esnasında da epoksi olarak Sikadur 330 kullanılmıştır.

Kullanılan Sikadur 330 epoksi malzemesi solventsiz, tiksotropik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcıdır. Bu yapıştırıcı iki bileşenden oluşmakta olup karışım oranları A:B = 4:1 dir. Sikadur 330 malzemesi bütün yüzeylere kolayca uygulanabilir olması, iyi aderans sağlaması, kimyasallardan etkilenmemesi ve ayrıca uzun süre özelliklerini koruyabilmesi açısından güçlendirme amaçlı kullanımlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Tablo 3.8' de Sikadur 330 yapıştırıcısının malzeme özellikler verilmektedir.

Kullanılan Sikadur 300 epoksi malzemesi solventsiz, düşük viskoz özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcıdır. Bu yapıştırıcı iki bileşenli olup karışım oranları A:B = 2,9:1 dir. Sikadur 300 malzemesi kuru ve ıslak uygulama metotlarında kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek elastisite modüllü karbon lifli elyafların yapıştırılmasında kullanılmaktadır. Tablo 3.9'da Sikadur 300 yapıştırıcısının malzeme özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.8: Sikadur 330 Yapıştırıcısının Özellikleri (*)

Sikadur 330 Malzeme Özellikleri	Değerler
Yoğunluk	1.31 kg/lt
Karışım Oranı (Ağırlıkça)	A:B = 4:1
Uygulama Sıcaklığı	maks. +35 °C, min. +10 °C
Çekme Dayanımı (+23 °C’de 23 günlük kürden sonra)	30 MPa
Eğilmede Elastisite Modülü (+23 °C’de 23 günlük kürden sonra)	3800 MPa

(*) Üretici firma tarafından verilen değerler

Tablo 3.9: Sikadur 300 Yapıştırıcısının Özellikleri (*)

Sikadur 300 Malzeme Özellikleri	Değerler
Karışım Oranı (Ağırlıkça)	A:B = 2.90:1
Uygulama Sıcaklığı	maks. +38 °C, min. +10 °C
Çekme Dayanımı (+23 °C’de 23 günlük kürden sonra)	72.4 MPa
Eğilmede Elastisite Modülü (+23 °C’de 23 günlük kürden sonra)	3010 MPa

(*) Üretici firma tarafından verilen değerler

3.2. Deney Değişkenleri ve Numunelerin Adlandırılması

Bu bölümde, öncelikle çalışma sırasında kullanılan deney değişkenleri anlatılmış daha sonra da numunelerin ne şekilde adlandırıldığı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. Deney değişkenleri

Deney değişkeni olarak kirişlerin kesme güçlendirmesi esnasında karbon lifli elyaf (CFRP), cam lifli elyaf (GFRP) ve yüksek elastisite modüllü karbon lifli elyaf (Hi-CFRP) olmak üzere üç farklı malzemenin kullanılması hedeflenmiştir. Bu üç farklı

malzemenin kullanılmasındaki amaç kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin kesme güçlendirmesi üzerindeki etkisinin gözlenmesidir. Diğer bir değişken olarak her bir elyafın deney kirişlerinin tabliyesine ankrajlı ve ankrajsız olarak yapıştırılmasıdır. Burada ise aynı elyafın kullanıldığı ikili kirişlerde, elyafın kiriş tabliyesi içerisine ankre edilmesiyle edilmemesi arasındaki durumların incelenerek birbiri içerisinde mukayese edilmesi hedeflenmiştir. Deney değişkenlerinin şematik olarak gösterimi ve numunelerin adlandırılması Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

DENEY NUMUNESİ (B)	CFRP (BC)	Ankrajsız (BCU)
		Ankrajlı (BCA)
	GFRP (BG)	Ankrajsız (BGU)
		Ankrajlı (BGA)
	Hi-CFRP (BH)	Ankrajsız (BHU)
		Ankrajlı (BHA)
	Şahit Numune (BV)	

Şekil 3.1: Deney değişkenlerinin şematik olarak gösterimi

Tüm deney elemanlarında, beton basınç dayanımı $f_{ck} = 12$ MPa, pas payı 20 mm, çekme donatı çapı $d = 28$ mm, basınç donatısı çapı $d = 8$ mm, enine donatı çapı $d_w = 6$ mm ve enine donatı aralığı merkezden merkeze 340 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır.

3.2.2. Numunelerin adlandırılması

Deney numunelerinin adlandırılmasında yukarıda Bölüm 3.2.1’ de sözü edilen değişkenler kullanılmıştır. Numune adlandırılmada kullanılan ilk karakter olan B bloğu Türkçede kiriş kelimesinin İngilizcedeki karşılığı olan beam kelimesini

belirtmektedir. Numune adlandırılmasında kullanılan ikinci karakter bloğu kesme güçlendirmesinde kullanılan lifli polimer elyafın cinsini belirtmektedir. İkinci bloktaki C ifadesi CFRP' nin, G ifadesi GFRP' nin, H ifadesi ise Hi-CFRP' nin kullanıldığını ifade etmektedir. Numune adlandırılmasında kullanılan üçüncü karakter bloğu kesme güçlendirmesinde kullanılan lifli polimer elyafın kirişe yapıştırılma şeklini belirtmektedir. Üçüncü bloktaki U ifadesi kirişe yapıştırılan lifli polimer elyafın uçlardan kiriş tabliyesine ankre edilmediğini, A ifadesi ise lifli polimer elyafın uçlarından kiriş tabliyesine ankre edildiğini ifade etmektedir. Şahit numunenin adlandırılmasında herhangi bir güçlendirme uygulanmadığından sadece ikinci blok kullanılmış olup V ile ifade edilmiştir.

Aşağıda güçlendirme esnasında CFRP kullanılmış, yapıştırma şekli ankrajlı olarak uygulanmış numunenin adlandırma örneği Şekil 3.2'de verilmiştir. Tüm numunelerin adlandırılması ve diğer özellikleri Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

B C A

[Kiriş] [Yapıştırma Şekli - Ankrajlı]
[Yapıştırılan Elyaf - CFRP]

Şekil 3.2: Numune adlandırma örneği

Tablo 3.10: Deney Numunelerinin Adlandırılması ve Özellikleri

Numune Adı	Hedef Beton Dayanımı (MPa)	Çekme Donatısı Çapı (mm)	Basınç Donatısı Çapı (mm)	Etriye çapı/aralığı (mm/mm)	Yapıştırılan Lifin Cinsi
BV	12	28	8	6/340	-
BCU	12	28	8	6/340	CFRP
BCA	12	28	8	6/340	CFRP
BGU	12	28	8	6/340	GFRP
BGA	12	28	8	6/340	GFRP
BHU	12	28	8	6/340	Hi-CFRP
BHA	12	28	8	6/340	Hi-CFRP

3.3. Beton Karışımları

Bu çalışmada kullanılan beton karışımları, tüm kirişler için $f_{ck}=12$ MPa basınç dayanımı hedeflenerek hazırlanmıştır. Numune üretiminde kullanılacak beton dayanımını elde etmek amacıyla çeşitli beton karışımları tasarlanmış ve bu tasarlanan betonlardan alınan numuneler denenmiştir. Betonda kullanılan agrega granülometrisi betonun slump değerini düşüreceği düşünülerek, betonun kalıba yerleşmesini zorlaştıracağı için beton tasarımı yapılırken slump değerinin yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Slump değeri yüksek, yerleşebilirliği iyi beton elde edebilmek için betonların imalatı esnasında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda en uygun olduğu düşünülen ve numune üretiminde kullanılan beton karışımları Tablo 3.11’de verilmiştir.

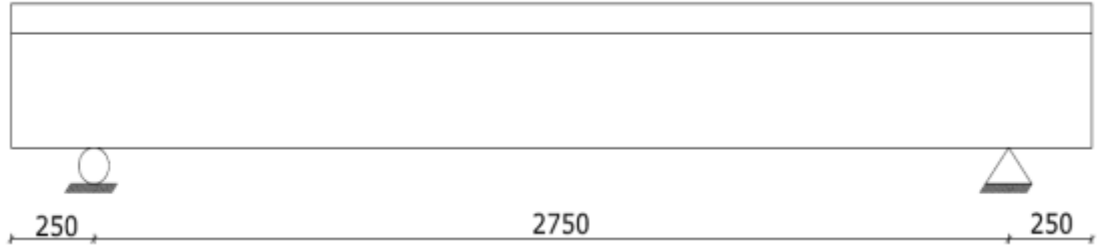
Tablo 3.11: Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m³ için)

Beton Bileşenleri	Hedef Dayanım	12 MPa
Su / Çimento		0.80
Su (kg/m ³)		176
Çimento (kg/m ³)		135
Mineral Katkı – Yüksek Fırın Cürufu (kg/m ³)		85
Kırma Kum (kg/m ³)		586
Taş Tozu (kg/m ³)		351
Mıçır No 1 (kg/m ³)		527
Mıçır No 2 (kg/m ³)		488
Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)*		1.32
Hava (lt.)		15
TOPLAMLAR (kg/m³)		2349

* Akışkanlaştırıcı çimento ağırlığının % 1’ i kadar kullanılmıştır.

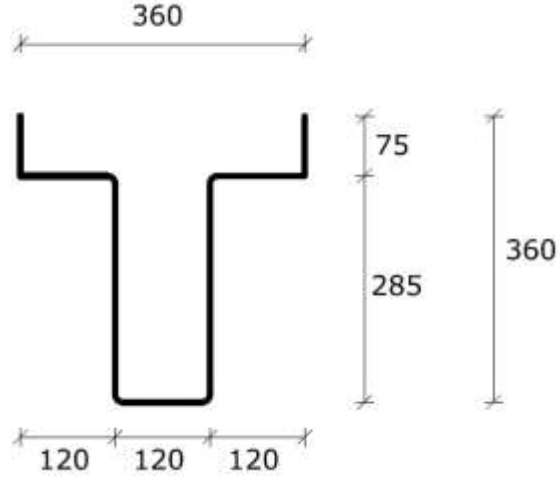
3.4. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Deney numunesi boyutları, laboratuvar imkanlarını da göz önünde bulundurarak uygulamada karşımıza çıkan boyutlara yakın alınmaya çalışılmış ve buna göre numunelerin boyutlarına karar verilmiştir (Şekil 3.3). Üretilcek numunelerde kalıp olarak plywood olarak adlandırılan ahşap kalıp kullanılmıştır. Kalıp için kullanılacak ahşap kalıplar T kesitli kirişin ebatlarına göre Şekil 3.4 deki gibi kesilmiştir.



(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 3.3: Deney numunesinin boyutları



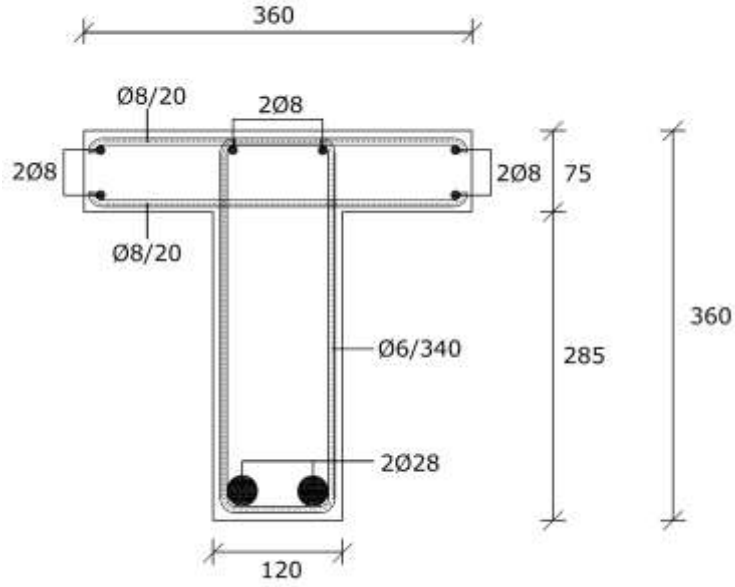
(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 3.4: Kalıp kesiti

İki ucuna arzulanan numune boyutlarını sağlayacak şekilde ahşap bloklar yerleştirilmiş olup hareket etmemesi için uçlarında altta bulunan deliklerden somunlar

geçirilmek suretiyle sabitlenmiştir. Numunenin boyunun uzun olması dolayısıyla, orta bölgesinin açılmasını önleyip, planlanan numune genişliğini sağlamak için ahşap plaka üzerine belirli aralıklarla çelikten yapılmış L şeklinde sabitleyiciler monte edilmiştir. Monte edilen bu kulaklar, ahşap kalıpların beton ile doldurulması sonucu oluşacak dışa açılmayı önleyerek, 360 mm kiriş tabliye genişliğinin tüm numune boyunca sabit olmasını sağlamıştır. Kirişin tabla kısmına betonun dökümü esnasında kalıpta herhangi bir esneme olmaması için kalıplar, tabla altından 50 cm. de bir ahşap takozlarla desteklenmiştir.

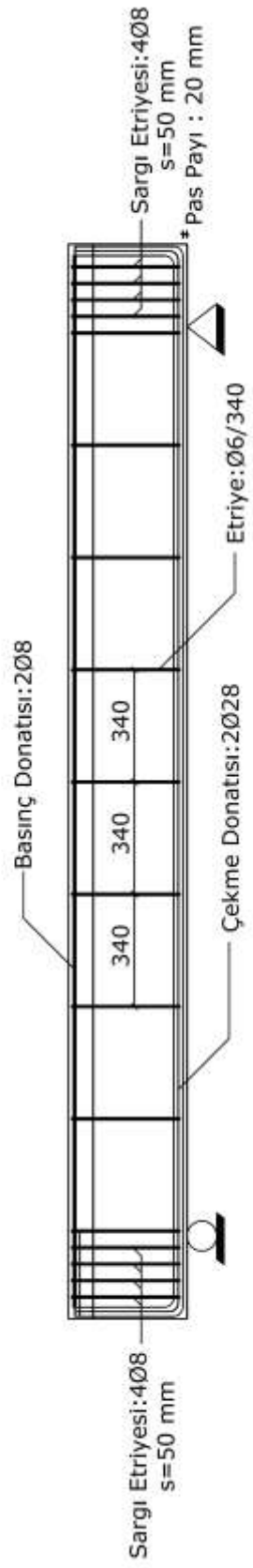
Deney numuneleri için kalıplar hazırlanırken alt tarafta bulunan 2 adet Ø28 çekme donatılarının ucu 90° açıyla kıvrılarak 360 mm uzunluğunda kancalar oluşturulmuştur. Bu kancaların oluşturulmasıyla boyuna donatıların beton içinden sıyrılmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Enine donatıların uçları TS 500-2000' de belirtildiği üzere 135° açıyla kıvrılarak 50 mm uzunluğunda kancalar oluşturulmuştur. 3250 mm uzunluğundaki deney numunesinin ortada kalan 2750 mm uzunluktaki test bölgesinde enine donatılar merkezden merkeze 340 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bölgede enine donatıların 340 mm aralıklarla yerleştirilmesindeki amaç, kiriş faydalı derinliğinin 340 mm olması dolayısı ile deney esnasında kesme etkisi altındaki kirişte oluşan kesme çatlağının hiçbir enine donatı tarafından kesilememesi ya da en fazla bir etriye tarafından kesilmesi ve kirişin kesme donatısız şekilde davranmasını sağlamaktır. Böylece yapılacak olan güçlendirmenin kesme dayanımına ve davranışa etkisi çok daha rahat gözlenecektir. Test bölgesi dışında kalan her iki uçtaki 250 mm uzunluğunda olan bölgelerde Şekil 3.6' de gösterildiği gibi enine donatılar merkezden merkeze 50 mm aralıkla kullanılarak numunenin test bölgesi dışında kalan kısımlarında herhangi bir göçmenin olmaması sağlanmıştır. Deney numunesine donatı yerleşimi Şekil 3.5' de verilmiştir.



(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 3.5: Deney numunelerinin donatı planı

Beton dökümünden önce, hazırlanan kalıpların iç yüzleri kalıp yağı ile yağlanarak üretilen numune yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanmıştır. Hazırlanan donatılar, tel fırça yardımıyla toz, pas ve kirden arındırılarak, yağlanan kalıplar içine yağ bulaşmayacak şekilde dikkatlice yerleştirilmiştir. Donatıların toz, pas, kirden arındırılması ya da yağ olmaması donatının betonla aderansını sağlaması açısından önem arz etmektedir. Donatı ile kalıp yüzeyleri arasındaki pas payları donatı ile kalıp yüzeyleri arasına iri agrega sıkıştırmak suretiyle sağlanmıştır. Her bir numune için beton basınç ve çekme dayanımlarını belirlemek üzere 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler alınmıştır. Pürüzsüz yüzey sağlamak amacıyla bu kalıplar da kalıp yağı ile yağlanarak kullanılmıştır.

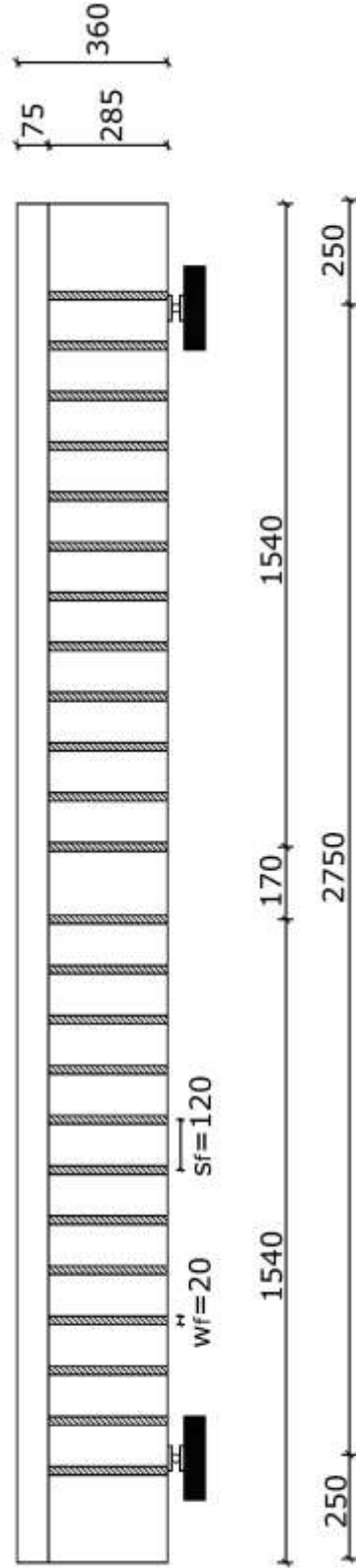


Şekil 3.6: Deney numunesine donatı yerleşimi

Beton dökümü sırasında betoniye kırma kum, taş tozu, çimento, mıcır no:1 ve mıcır no:2 sırayla konulduktan sonra betoniye çalıştırılmış bu üç malzemenin çok kısa süre karıştırılmasından sonra, bu malzemelere içine süper akışkanlaştırıcı katılmış su ilave edilmiştir. Bu işlem bittikten sonra betoniye ortalama hızla 5 dakika süreyle çalıştırılmıştır. Bu süre sonunda yeterli karışma sağlanan beton, kürek yardımıyla kalıplar içine aktarılmış, yerleşmenin tam olarak sağlanması için şişleme ve tokmaktama yöntemi uygulanmıştır. Şahit numunelerin betonunun üretilmesi sırasında adımlar aynen tekrar edilmiştir. Deney numuneleri dökümden sonra 4 gün süre ile kalıplar içinde bırakılmış, bu sürenin sonunda kalıptan çıkartılan numunelere, 3 gün boyunca ıslak keten parçaları örtülerek kür işlemi uygulanmıştır. Bu üç günlük küreleme işleminden sonra test tarihine kadar numuneler laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Beton dökümü ve test tarihini bekleme süresince laboratuvardaki sıcaklık değerleri 13-23° C, bağıl nem değerleri ise %65-75 aralığında tespit edilmiştir.

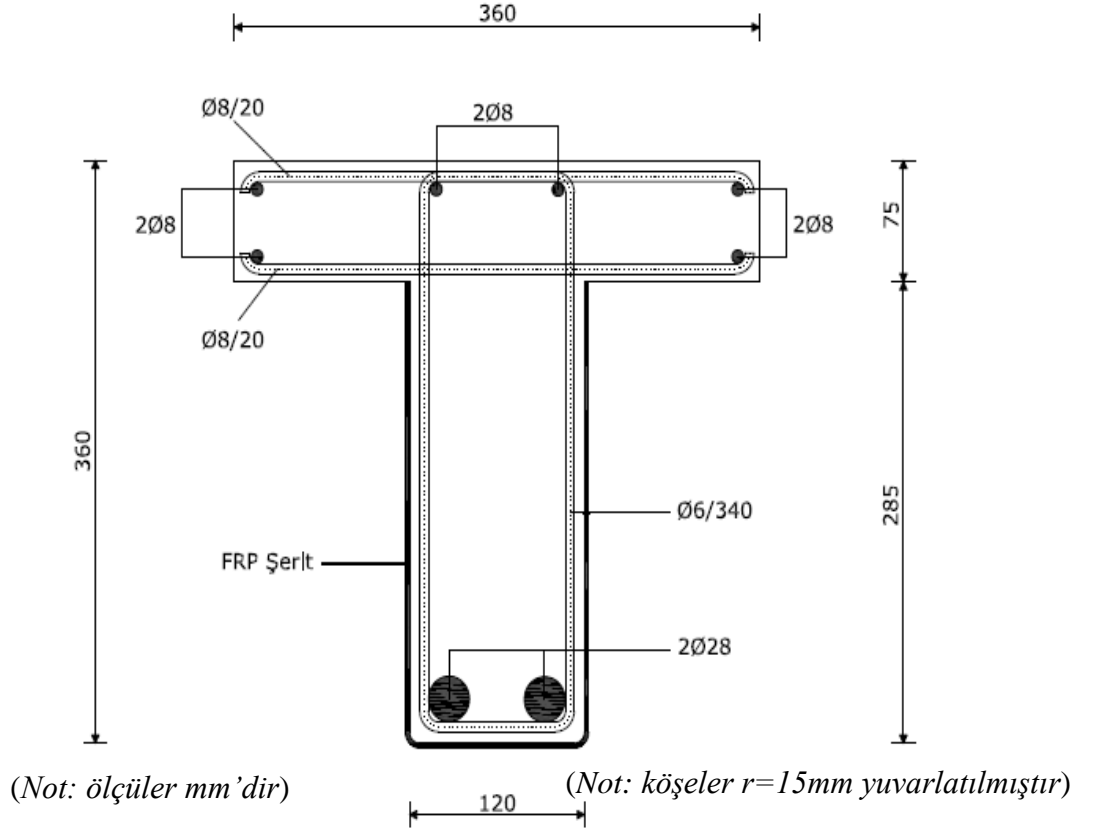
3.5. Güçlendirme İşleminin Yapılması

Uygulama planı Şekil 3.7' de verilen deney elemanlarının gövdesine yapıştırılacak U biçimli FRP şeritler, 690 mm uzunluğunda 20 mm genişliğinde kesilerek hazırlanmıştır. Deney elemanlarında FRP şeritlerin yerleşim bölgeleri işaretlenmiştir. Kiriş yan yüzeylerinde ve alt yüzünde FRP şeritlerin yapışacağı beton şerbeti taşlama motoru kullanılarak temizlenmiş ve beton içindeki agreganın görülmesi sağlanmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra yapıştırılacak FRP şeritlerin beton yüzeye düzgün bir şekilde yapışabilmesi için kiriş yüzeyi ve ankraj delikleri yüksek basınçlı hava ile iyice temizlenmiştir. U şeklinde yapıştırılan FRP liflerin kesit planı Şekil 3.8' de verilmiştir.



(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 3.7: Deney numunesi üzerine FRP şeritlerin yapıştırma planı

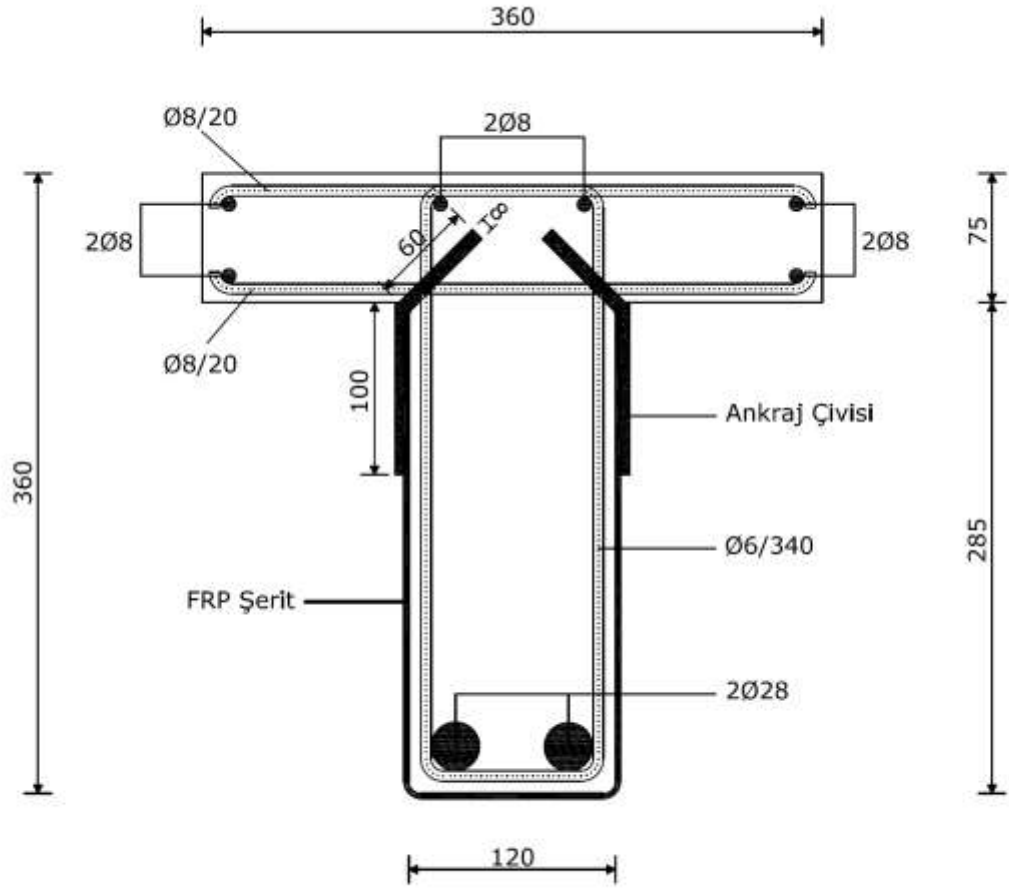


Şekil 3.8: Güçlendirmede kullanılan FRP liflerin kesit planı

FRP şeritlerin kesilmesi, beton yüzey temizliklerinin yapılması, ankraj deliklerinin açılarak yüksek basınçlı hava ile temizlenmesi işlemlerinden sonra epoksi karışımı hazırlama işlemine geçilmiştir. CFRP ve GFRP liflerin yapıştırılması esnasında Sikadur 330, Hi-CFRP liflerin yapıştırılması esnasında Sikadur 300 epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. Epoksi karışımları, içi temiz, nemli olmayan, kullanılmamış boş kaplarda hazırlanmıştır. CFRP ve GFRP liflerin yapıştırılmasında kullanılan Sikadur 330 epoksi karışımı A:B = 4:1 oranında 500 gr'lık seriler halinde hazırlanmış, epoksinin yapıştırma esnasında katılaşmaması için zaman geçirilmeden hemen uygulaması yapılmıştır. Hi-CFRP liflerin yapıştırılmasında kullanılan Sikadur 300 epoksi karışımı A:B = 2,9:1 oranında 390 gr'lık seriler halinde hazırlanmış, epoksinin yapıştırılma esnasında katılaşmaması için zaman geçirilmeden uygulaması yapılmıştır. Uygulama esnasında hazırlanan karışım pamuklu rulo fırça ile kirş

yüzeyine 1 mm kalınlığında sürülmüş, üzerlerine epoksiye iyice doyrulan FRP şeritler yapıştırılmıştır. FRP şeritler kiriş üzerine yapıştırıldıktan sonra kiriş yüzeyi ile FRP şeritler arasında hava boşluğu kalmaması için çelik rulo yardımıyla boşluklar alınmıştır. Çelik rulo ile boşlukların alınması esnasında lif doğrultusunun değışmemesine ve liflere herhangi bir zarar verilmemesine büyük özen gösterilmiştir.

Ankrajlı numunelerde kullanılacak ankraj çivileri için FRP lifler 320 mm. uzunluğunda 60 mm genişliğinde kesilerek hazırlanmıştır. Ankraj çivilerinin tabliyeye ankre edilebilmesi için, tabliye altının kiriş yan yüzeyleriyle birleştiğı noktadan 8 mm çapında, 60 mm derinliğinde yatayla 45° açı yapacak şekilde herhangi bir donatı çeliğine gelmeyecek şekilde delikler açılmıştır (Şekil 3.9). Delikler açıldıktan sonra yüksek basınçlı hava ile içinde toz kalmayacak şekilde iyice temizlenmiştir. 320 mm uzunluğunda, 60 mm genişliğinde kesilen lifler genişliği 20 mm ye düşecek şekilde üçe katlanmıştır. Daha sonra bağ teli kullanılarak boydan ikiye katlanarak uzunluk 160 mm ye getirilmiştir. Ankraj çivilerinin hazırlanma adımları Şekil 3.10' da sırası ile gösterilmiştir. Katlama işlemleri esnasında FRP liflerin doğrultularının değıştirilmemesine ve kopmamasına azami özen gösterilmiştir. Ankraj çivilerinin tabliye içerisinde daha önce açılan deliklere yerleştirilmesinden önce delikler tabanca yardımıyla iyice epoksi ile doldurulur. Hazırlanan ankraj çivileri epoksi ile doyrulduktan sonra, 160 mm uzunluğun 60 mm'si tabliye içine açılan ankraj deliklerine yerleştirilmiştir. Geriye kalan 100 mm' lik kısmı da daha önce kiriş yan yüzeylerine U şeklinde yapıştırılan şeritlerin üst uçlarının üzerine, daha sonra üçe katlanan genişliği tekrar açılıp 60 mm' ye getirilerek yapıştırılmıştır (Şekil 3.11). Hi-CFRP liflerin U şeklinde yapıştırılması esnasında kullanılan Sikadur 300 epoksi yapıştırıcısı sıvı halde bulunmasından dolayı bu numunelerde ankraj çivilerinin döşemede açılan deliklere yerleştirilmesi esnasında CFRP ve GFRP liflerin ankraj çivilerinde kullanılan Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısı Hi-CFRP için de kullanılmıştır.



(Not: ölçüler mm'dir)

(Not: köşeler $r=15\text{mm}$ yuvarlatılmıştır)

Şekil 3.9: FRP ankraj çivilerinin kesit planı



Şekil 3.10: Ankraj çivilerinin hazırlanması



Şekil 3.11: Ankrajlı FRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapışmış hali

3.6. Deney Aşaması

Bu bölümde betonun ve donatı çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler ile eğilme deneylerinin yapıldığı düzenek tanıtıldıktan sonra kesme deneylerinin nasıl yapıldığına dair ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.6.1. Beton deneyleri

Deney numunelerinin üretimi sırasında beton basınç dayanımlarının takip edilebilmesi amacıyla 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğindeki silindir numunelerden 8 adet alınmıştır. Alınan bu silindir numuneler belirli aralıklarla kükürt başlık yapılmak suretiyle 3000 kN kapasiteli beton basınç deney aletinde denenmiş ve üretilen numunenin basınç dayanımı takip edilmiştir. Numunelere ait silindir numuneler basınç deneylerine tabi tutularak basınç dayanımı elde edilmiştir (Şekil 3.12). Yapılan testler neticesinde ortalama basınç dayanımı 12.36 MPa olarak bulunmuştur.

Şekil 3.12 Beton basınç dayanımı deneyi

3.6.2. Donatı çeliği çekme deneyi

Deneyleerde kullanılan donatı çeliklerinden dörder adet numune alınmıştır. Alınan numuneler 600 kN kapasiteli üniversal deney aletinde çelik çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. (Şekil 3.15) Yapılan çelik çekme deneyleri neticesinde akma ve çekme dayanımları bulunmuş olup çıkan sonuçlar Tablo 3.12’ de verilmiştir.

Tablo 3.12 Kullanılan Donatı Çeliklerinin Çekme Deneyi Sonuçları

Donatı Çapı (mm)	Birim Ağırlık (kg/m)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)
28	4.878	487.56	597.43	17.10
28	4.888	491.48	605.28	17.80
28	4.895	480.69	595.47	17.50
28	4.900	485.60	597.43	17.80
8	0.400	483.15	715.06	28.70
8	0.404	472.48	718.17	28.80
8	0.402	478.56	717.42	28.70
8	0.403	480.15	716.35	28.80
6	0.214	250.60	411.10	30.10
6	0.221	247.40	410.50	30.30
6	0.219	248.80	410.70	30.20
6	0.217	249.20	410.90	30.00



Şekil 3.13: İnce nervürlü çelik çubuklar deneyi sonucu



Şekil 3.14: İnce çelik çubuğu çekme için çekme deneyi düzeneği



Şekil 3.15: Çelik çekme deneyi ve aparatı

3.6.3. Kesme deneyleri

Deneyler Kocaeli Üniversitesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Açıklığı 2750 mm, toplam uzunluğu 3250 mm olan kirişlerin testi esnasında tük düze yükleme sıfırdan başlayarak arttırılarak kirişin kesme göçmesi gerçekleşene kadar devam etmiştir. Deney verileri, 30 kanal kapasiteli elektronik veri toplama sistemi ile bilgisayara kaydedilmiştir.

3.6.4. Yükleme ve deney düzeneği

Üretilen deneyi numuneleri Şekil 3.16' de gösterilen düzenek kullanılarak kesme testlerine tabi tutulmuş ve deney süresince numunelerde oluşan kesme çatlakları genişliği ve FRP liflerin üzerinde meydana gelen birim deformasyonlar kaydedilmiştir.

Deney düzeneği hazırlanırken numune basit mesnetli kiriş şeklinde mesnetlenmiş olup kirişin bir ucundaki mesnet şekli basit, diğer ucundaki ise kayıcıdır. Deney esnasında mesnetlerde oluşacak olası çökmelerin her yük aşamasında takibini sağlayacak şekilde mesnetler deney numunesinin diğer bölgeleriyle beraber ölçüm cihazlarıyla donatılmıştır. 300 kN kapasiteli hidrolik silindir pompa seti ile reaksiyon kirişi ortasına yükleme yapılmıştır. Reaksiyon kirişi, deney numuneleri üzerine akstan aksa 170 mm aralıkla, eni 160 mm, kalınlığı 30 mm olan iki çelik plakanın üzerine oturmaktadır. Yükleme hidrolik kriko ile gerçekleştirilmiş olup, yükün değişimi elektronik yük hücreleri yardımıyla takip edilmiştir. Yapılan yüklemelerde kesme açıklığı 1290 mm, kiriş faydalı derinliği ise 340 mm dir.



Şekil 3.16: Deney numunelerini yükleme sistemi

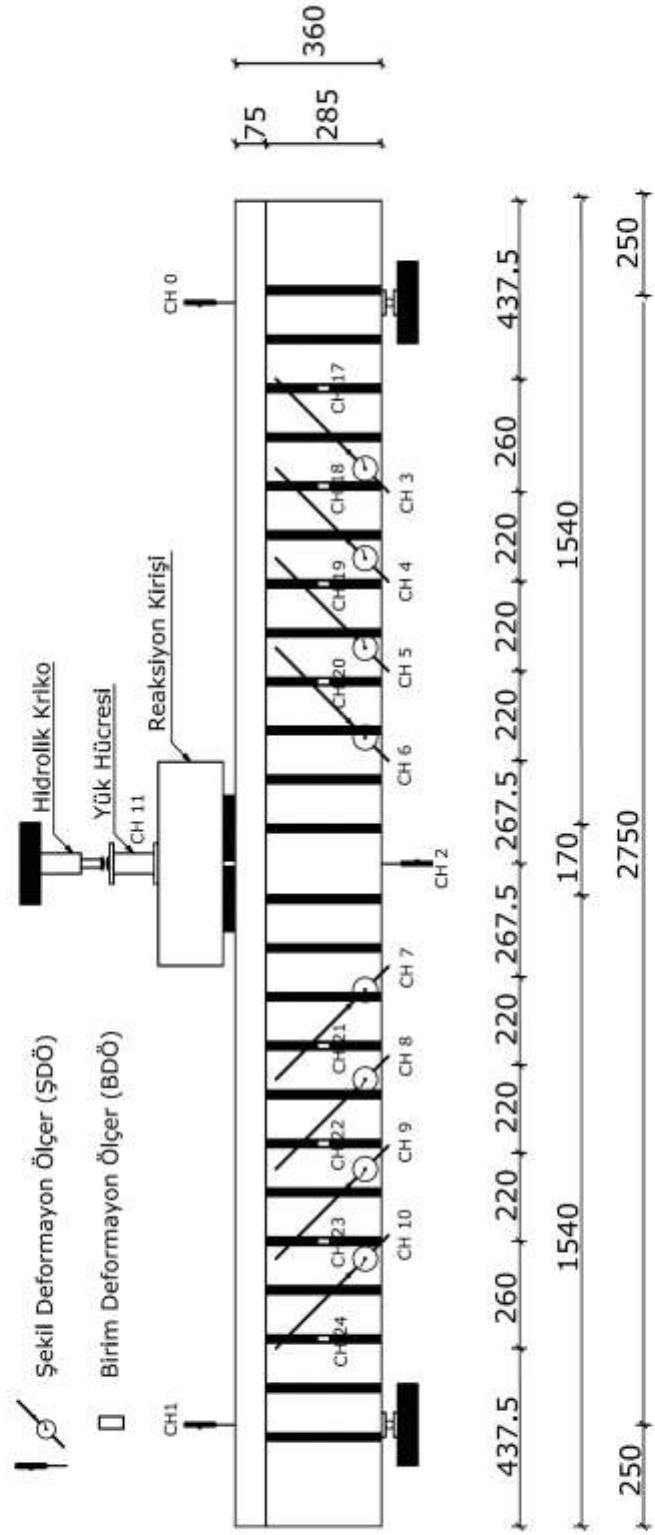
3.6.5. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni

Deney verileri, 30 kanal kapasiteli elektronik veri toplama sistemi ile bilgisayara kaydedilmiştir.

Numunelerde oluşan kesme çatlaklarının genişlikleri, mesnet çökmeleri ve orta nokta deplasmanı 30 mm kapasiteli, 0.01 mm hassasiyetli elektronik komparatörlerle (ŞDÖ) kaydedilmiştir. Elektronik komparatörler, ŞDÖ, kiriş en kesiti ile 45° açı yapacak şekilde 220 mm aralıkla yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). Her bir numunede 2 adet mesnette, 1 adet orta noktada, 8 adet kiriş gövdesinde olmak üzere toplam 11 adet şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Yükleme esnasında yük hücresinden alınan yük okumaları ile şekil değiştirme ölçerlerden alınan okumaların grafikleri çizdirilmiştir.

Güçlendirilmiş deney numunelerinde yapıştırılan FRP şeritlerin simetrik olarak seçilen 8 adetinin üzerlerine 0.01 mm/mm ölçüm kapasiteli, direnci 120 Ω olan elektronik birim deformasyon ölçerler (strain gage) yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerler (BDÖ), yapıştırmada kullanılan epoksinin yeterince kuruması

ve gerekli dayanımını kazanabilmesi için deneyin yapılacağı günden en az bir gün önce FRP şeritlerin üzerine yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerden çıkan ve dataların aktarıldığı kablolar elektronik veri toplama sistemine bağlanmıştır. Bağlama esnasında dataların doğru aktarılabilmesi için kabloların bağlanmasında çok hassas çalışılmış, kabloların zarar görmemesi için azami dikkat gösterilmiştir. (Şekil 3.18)



Şekil 3.17: Deneysel ve ölçüm düzeni



Şekil 3.18: Şekil değiştirme ölçerlerin (ŞDÖ) yerleşim şekli



Şekil 3.19 Birim deformasyon ölçerlerin (BDÖ) yerleşim şekli

4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER

Bu çalışmada, Bölüm 3’de malzeme ve kesit özellikleri verilen 7 adet betonarme kiriş kesme etkisi altında test edilmiş olup kirişlerde kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı 3.8’ dir ($a/d=1290/340=3.8$). Bu bölümde test edilen numunelerin öncelikle göçme davranışları anlatılmıştır. Daha sonra şekil değiştirme ölçerlerden (ŞDÖ) ve FRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden (BDÖ) elde edilen verilerin yük hücresi vasıtasıyla ölçülen ve ikiye bölünerek bulunan kesme kuvvetine karşı grafikleri çizilmiştir. Deney numunelerinin üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarının şematik numaraları Şekil 3.17’ de gösterilmiştir.

4.1. Numunelerin Göçme Davranışları

Deney numunelerinin tasarımı esnasında kesme güçlendirmesinin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için güçlendirilmiş numunelerin kesme dayanımlarına ulaştıracak yükün moment kapasitelerine ulaştıracak yükten daha düşük kalmasına dikkat edilmiştir. Bu sayede tüm kirişler moment kapasitelerine ulaşmadan kesme göçmesine uğrayacak, güçlendirilen kirişin davranışı daha etkin irdelenebilecektir. Kirişlerin TS-500’e göre hesaplanan moment ($M_r=160$ kN.m) ve kesme ($V_r=40.2$ kN) kapasitelerinden hareketle eğilme göçmesine ulaşıldığı andaki orta nokta yükü sırasıyla $P_M=248$ kN, ve $P_V=80.4$ kN olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda malzeme katsayıları dikkate alınmamıştır.

Yapılan deneylerde tüm kirişler tasarımda hedeflendiği gibi kesme göçmesine uğramıştır. Tüm numunelerinde ana kesme çatlakları açılmış ve göçme bu bölgede oluşmuştur. Şahit numunede ilk çatlak 28 kN yükte gözlenmiş olup, 55 kN yükte kesme göçmesine uğramıştır. Diğer elemanlarda açıldığı gözlenen ilk çatlakların ve göçmenin oluştuğu yükler Tablo 4.1’ de verilmiştir. Bu tabloya bakılarak güçlendirilen lifin cinsinin ve güçlendirme yönteminin ilk çatlak dayanımının ve kesme dayanımının üzerindeki etkisi gözlenebilmektedir. Ankraj kullanılmayan FRP şeritli

güçlendirmelerde gözlenen ilk çatlak yükündeki göreceli değişim düşükken, ankrajlı FRP şerit uygulamalarında bu artış yaklaşık yüzde 30 seviyelerine ulaşmıştır. Diğer yandan kesitlerin taşıma kapasiteleri için de ankrajlı numunelerde önemli artışlar gözlenirken ankrajsız numunelerdeki artışlar minimal seviyelerde kalmıştır (Tablo 4.1). Numuneleri güçlendirmede kullanılan FRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden alınan okumalar neticesinde, her bir kanalda oluşan maksimum birim deformasyon Tablo 4.2’ de verilmiştir. Okunan maksimum birim deformasyonlar FRP şeritlerin elastisite modülleri oranında güçlendirmeye katkısını göstermektedir. Bu da uygulama yönteminin etkinliğini anlatmaktadır.

Tablo 4.1: Numunelerin İlk Çatlama ve Göçme Anında Taşıdıkları Kesme Kuvvetleri

Numune Yük Türü	BV	BCU	BCA	BGU	BGA	BHU	BHA
Gözlenebilen İlk Kılcal Çatlağın Açıldığı Yük (kN)	28	35	40	35	42	35	35
Kesme Göçmesinin Gerçekleştiği Yük (kN)	55	62	82	61	77.5	55	62

Tablo 4.2: Numuneler üzerindeki BDÖ’den deney boyunca alınan maksimum okuma değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$) (koyu renkle işaretlenenler çatlağın hizasında olanlardır.)

BDÖ Kanal No Numune	Knl-24 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-23 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-22 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-21 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-20 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-19 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-18 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Knl-17 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
BCU	40	329	319	285	216	488	20	507
BCA	57	517	468	2584	1500	1980	2051	25
BGU	16	72	1282	114	34	1873	36	5
BGA	85	158	946	269	25	214	4260	1113
BHU	5	41	52	37	23	382	349	20
BHA	14	28	87	47	25	1282	45	96

Güçlendirmede CFRP liflerin kullanıldığı numunelerden, BCU adlı numunede yükleme esnasında ilk çatlak 35 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sol kesme açıklığında iki yeni çatlak oluşmaya başlamıştır. Yükün 61 kN olduğu seviyelerde ilk CFRP şerit üst uçlarından beton yüzeyden ayrılmıştır. Hemen devamında diğer CFRP şeritlerde de benzer davranışlar gözlenmiştir. Yüklemenin 62 kN olduğu seviyede U şeklinde yapıştırılan liflerin üst uç bölgesinde epoksi yapıştırıcının beton yüzeyden ayrılmasıyla kesme göçmesi gerçekleşmiştir. BCA numunesinde ise ilk çatlak 40 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sağ ve sol kesme açıklıklarında ikişer kesme çatlakları daha oluşmuştur. Yükün yaklaşık 77 kN olduğu seviyelerde ankraj çivilerini kirişe bağlayan epoksi yapıştırıcısı üzerinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yükün 82 kN olduğu seviyelerde ankraj çivileri altında bulunan U şeklinde yapıştırılmış CFRP şeritlerden ayrılarak kiriş kesme göçmesine uğramıştır.

Güçlendirmede GFRP liflerin kullanıldığı numunelerden, BGU adlı numunede yükleme esnasında ilk çatlak sol kesme açıklığında 35 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sağ kesme açıklığında bir yeni çatlak daha oluşmaya başlamıştır. Yükün 55 kN olduğu seviyelerde ilk GFRP şerit üst uçlarından beton yüzeyden ayrılmıştır. Yük artmaya devam ettikçe diğer GFRP şeritlerde de benzer davranışlar gözlenmiştir. Yüklemenin 61 kN olduğu seviyede U şeklinde yapıştırılan liflerin üst uç bölgesinde epoksi yapıştırıcının beton yüzeyden ayrılmasıyla kesme göçmesi gerçekleşmiştir. BGA numunesinde ise ilk çatlak 42 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sağ ve sol kesme açıklıklarında birer kesme çatlakları daha oluşmuştur. Yükün yaklaşık 67 kN olduğu seviyelerde ankraj çivilerini kirişe bağlayan epoksi yapıştırıcısı üzerinde çatlaklar oluşmaya başlamış ve ankraj çivisi ilk olarak bu yük seviyesinde beton yüzeyden ayrılmıştır. Yükün 73 kN olduğu seviyelerde U şeklinde yapıştırılmış GFRP şeritlerin birkaçı altında açılan kesme çatlaklarının büyümesiyle şerit kesimine dik yönde kesildi. Yüklemenin yaklaşık 77.5 kN olduğu seviyelerde ankraj çivileri altında bulunan U şeklinde yapıştırılmış GFRP şeritlerden ayrıldı, buna müteakip şeritler üst ve alt uçlarından beton yüzeyden ayrılarak kiriş kesme göçmesine uğramıştır.

Güçlendirmede Hi-CFRP liflerin kullanıldığı numunelerden, BHU adlı numunede yükleme esnasında ilk çatlak sol kesme açıklığında 35 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sol kesme açıklığında bir yeni çatlak daha oluşmaya

başlamıştır. Yükün 54 kN olduğu seviyelerde ilk Hi-CFRP şerit üst uçlarından beton yüzeyden ayrılmıştır. Ayrıca yine yükün 54 kN olduğu seviyelerde Hi-CFRP şeritler kesitlerinin dik yönünde kopmaya başladığı gözlenmiştir. Yüklemenin 55 kN olduğu seviyede U şeklinde yapıştırılan liflerin üst uç bölgesinde epoksi yapıştırıcının beton yüzeyden ayrılması ve bazı şeritlerin kopması neticesinde kesme göçmesi gerçekleşmiştir. BHA numunesinde ise ilk çatlak sağ kesme açıklığında 35 kN mertebesinde açılmıştır. Yükleme devam ettikçe sağ kesme açıklığında mesnet noktasından başlayan bir kesme çatlağı daha oluşmuştur. Yükün yaklaşık 61 kN olduğu seviyelerde ankraj çivilerini kirişe bağlayan epoksi yapıştırıcısı üzerinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Ayrıca yine yükün 61 kN olduğu seviyelerde Hi-CFRP şeritler kesitlerinin dik yönünde kopmaya başladığı gözlenmiştir. Yüklemenin 62 kN olduğu seviyede U şeklinde yapıştırılan liflerin üst uç bölgesinde epoksi yapıştırıcının beton yüzeyden ayrılması ve bazı şeritlerin kopması neticesinde kesme göçmesi gerçekleşmiştir. Deneyler neticesinde kirişlerde göçmeye uğramasına neden olan çatlakların FRP şeritlerde oluşan hasarların resimleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.1: BV numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



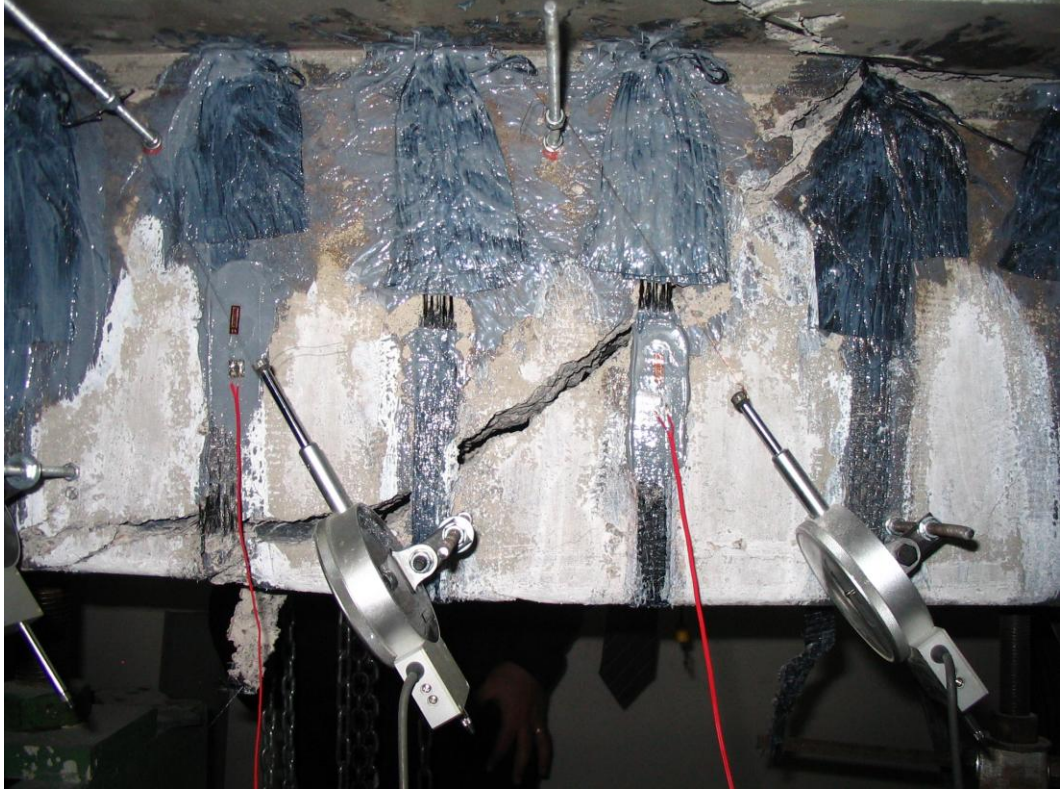
Şekil 4.2: BV numunesinde göçmenin oluştuğu ana çatlağın resmi



Şekil 4.3: BCU numunesinde CFRP şeritlerin beton yüzeyden ayrılması



Şekil 4.4: BCU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



Şekil 4.5: BCA numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



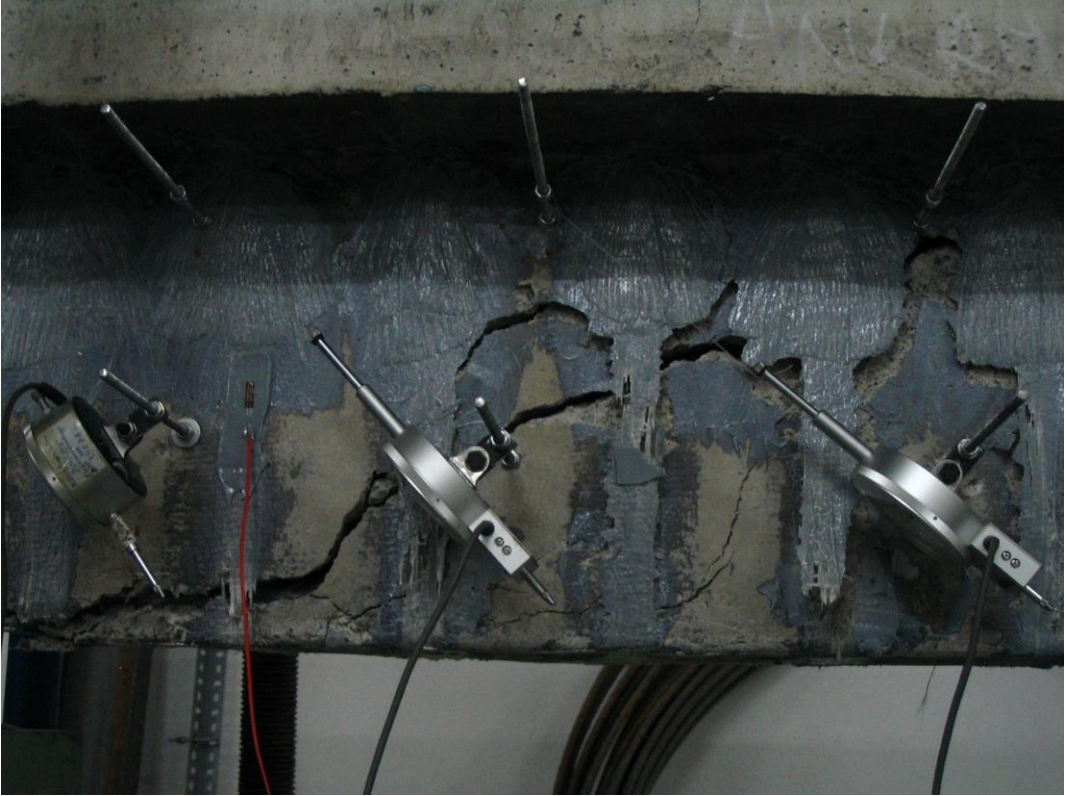
Şekil 4.6: BCA numunesinde ankraj çivisi ve CFRP şeritlerin kopması



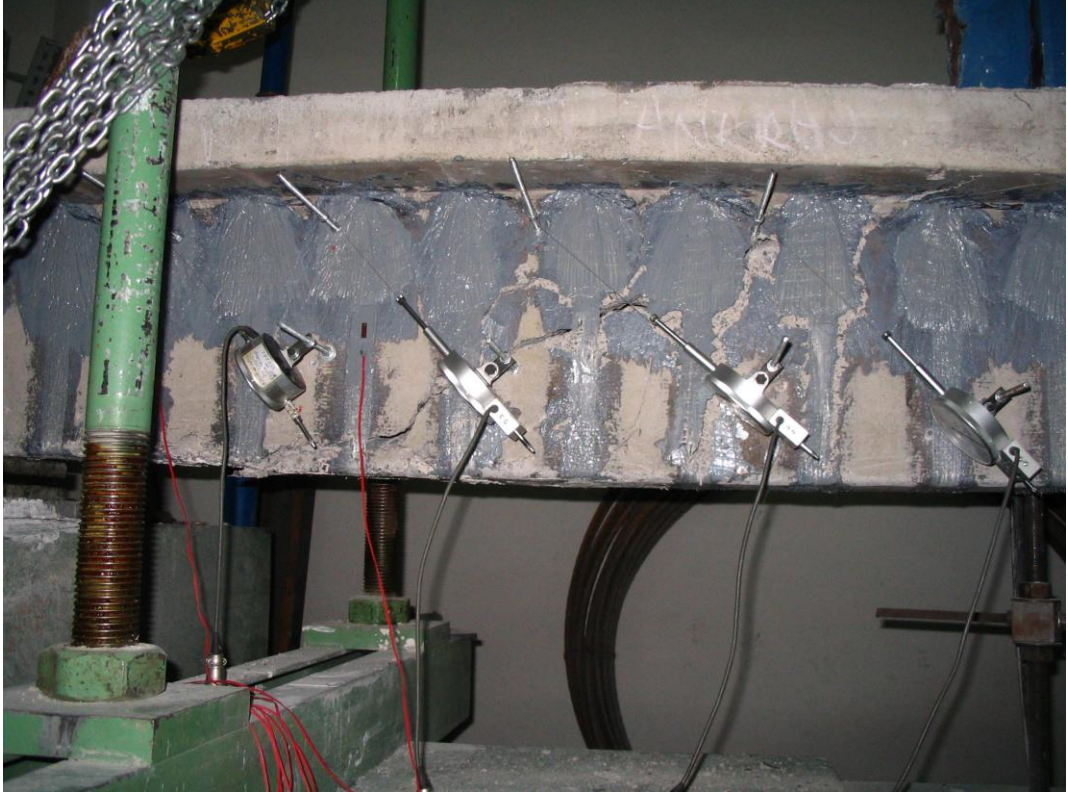
Şekil 4.7: BGU numunesinde GFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması



Şekil 4.8: BGU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



Şekil 4.9: BGA numunesinde ankraj çivisi ve GFRP şeritlerin kopması



Şekil 4.10: BGA numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



Şekil 4.11: BHU numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması



Şekil 4.12: BHU numunesinde göçmenin olduğu ana çatlağın resmi



Şekil 4.13: BHA numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması

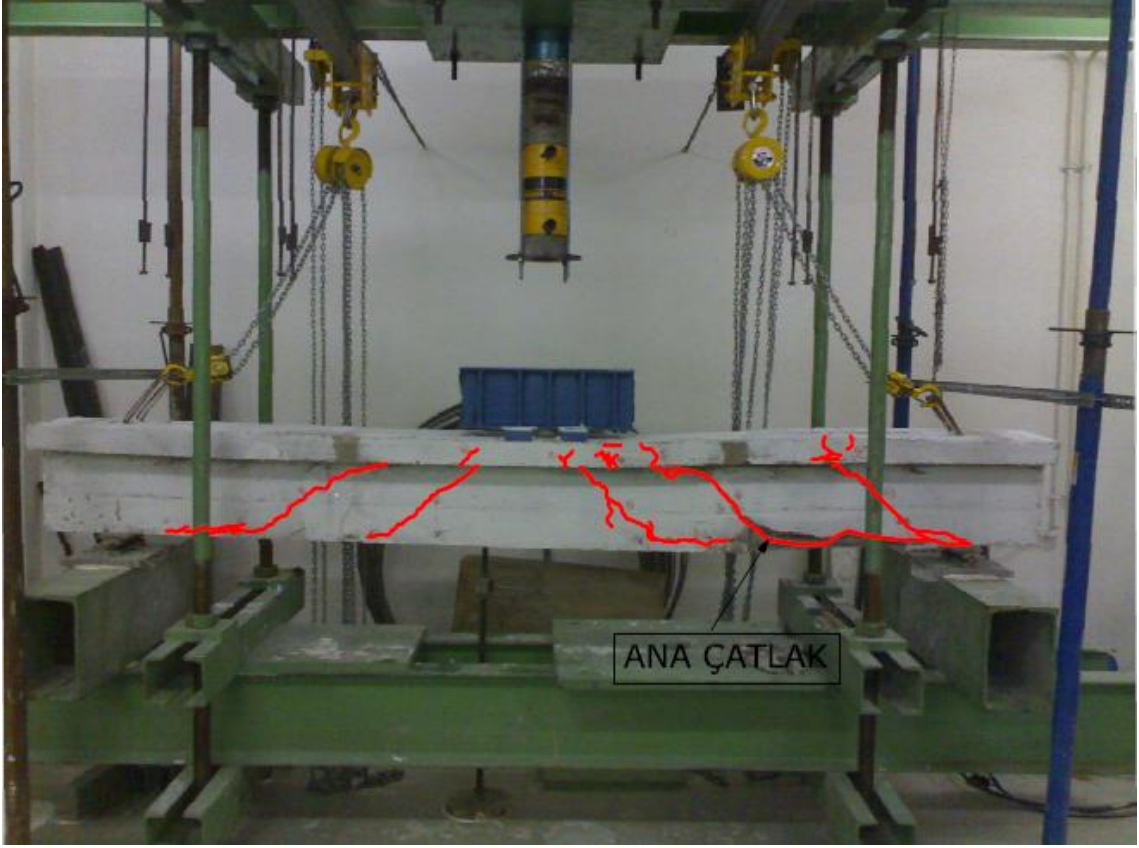


Şekil 4.14: BHA numunesinde göçmenin oluştuğu ana çatlağın resmi

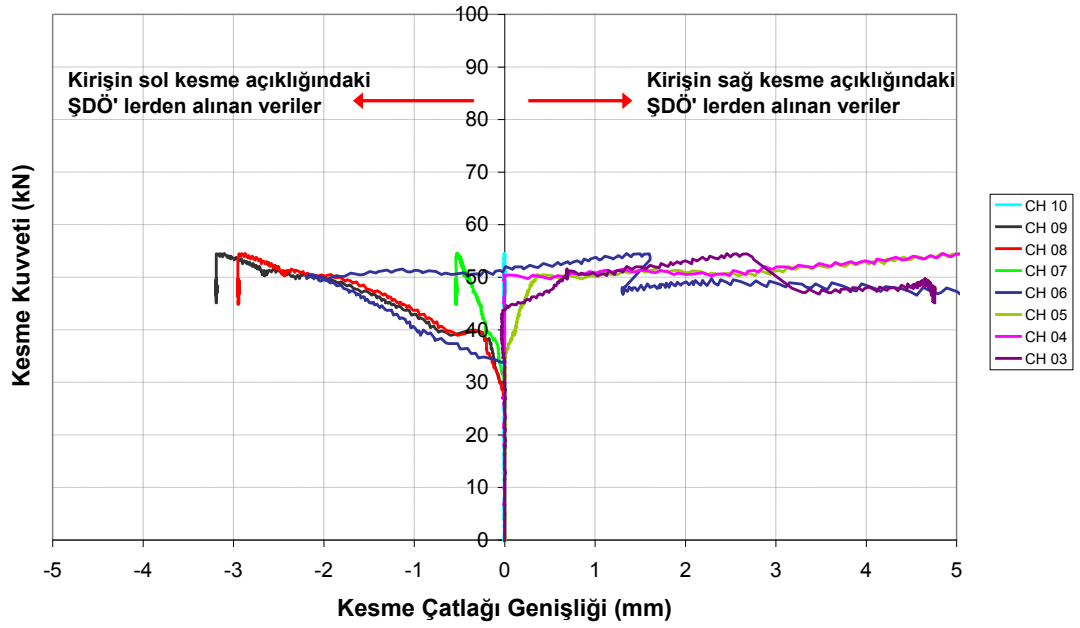
4.2. Deneylelerden Elde Edilen Veriler

Deneylelerde numunelerin üzerine monte edilen ŞDÖ'lerden alına verilerin yaklaşık olarak kesme çatlağı genişliğini verdiği veya bu genişğin bir göreceli göstergesi olduğu düşünölmüş olup kiriş boyunca, yükün sağında veya solunda, elde edilen bu değerler kesit üzerindeki sabit kesme kuvvetine karşı çizilmiştir.. Diğer taraftan güçlendirme amaçlı kullanılan FRP şeritler üzerine yapıştırılan BDÖ'lerden elde edilen veriler de aynı şekilde kesitteki kesme kuvvetine karşı çizilmiş ve elde edilen grafikler ilerleyen sayfalarda her bir numune için ayrı ayrı verilmiştir.

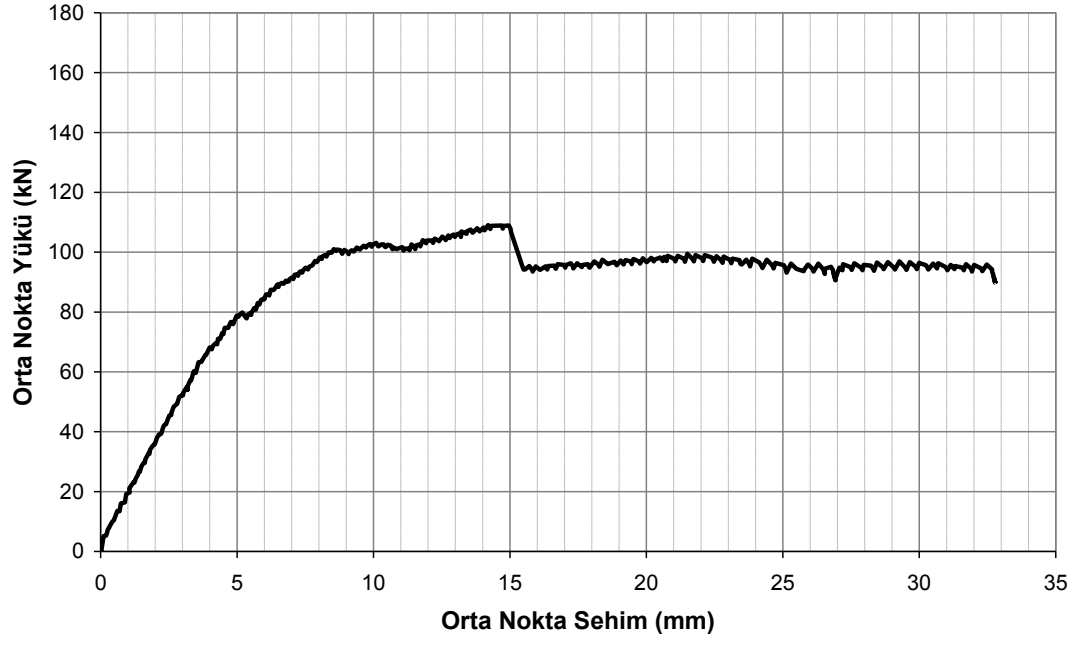
4.2.1. BV numunesi



Şekil 4.15: BV numunesi çatlak dağılımı



Şekil 4.16: BV numunesi kesme çatlağı genişliği – kesme kuvveti grafiği

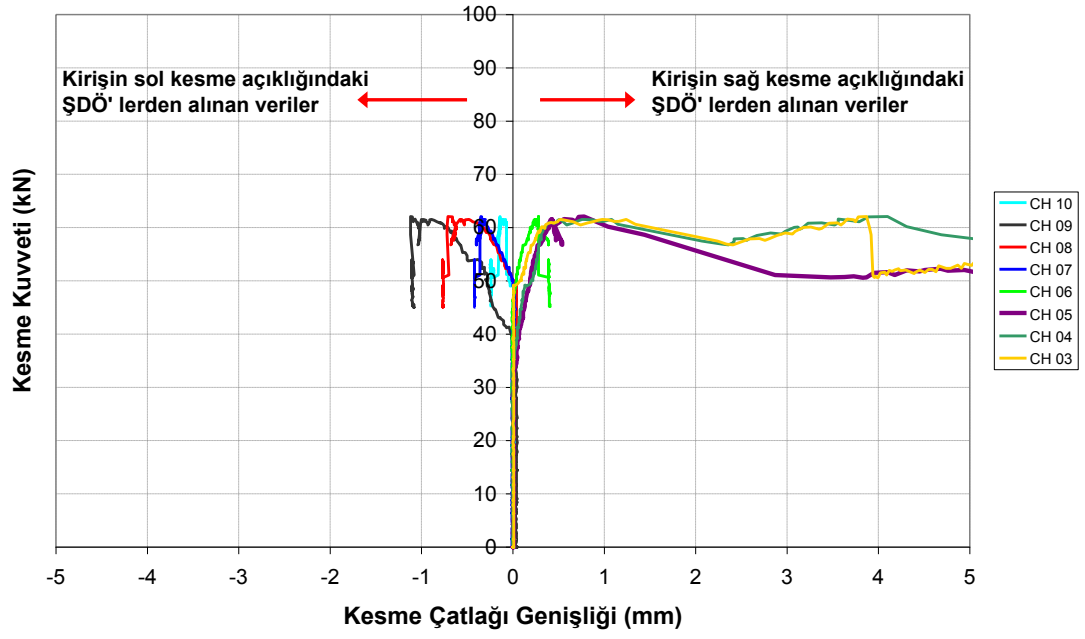


Şekil 4.17: BV numunesi orta nokta sehim – orta nokta yüku grafiği

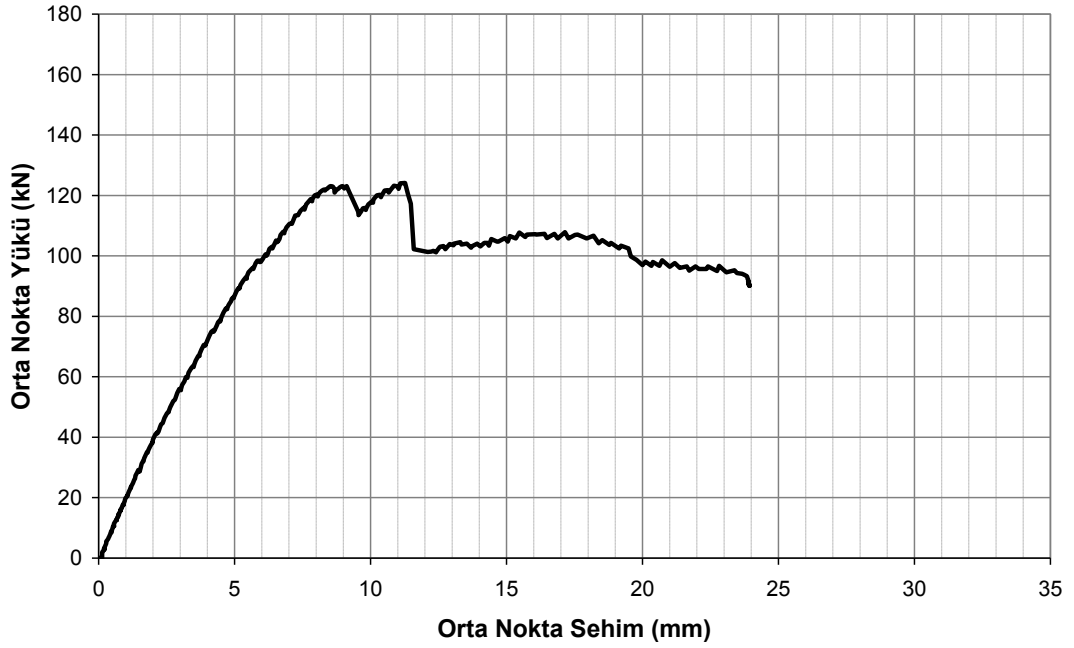
4.2.2. BCU numunesi



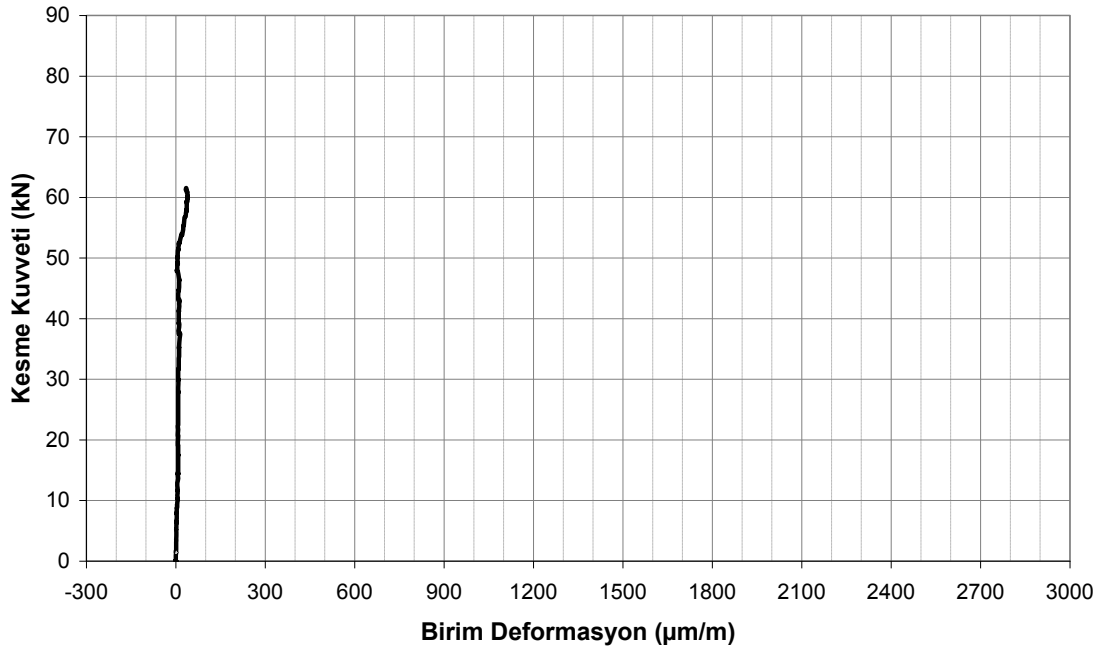
Şekil 4.18: BCU numunesi çatlak dağılımı



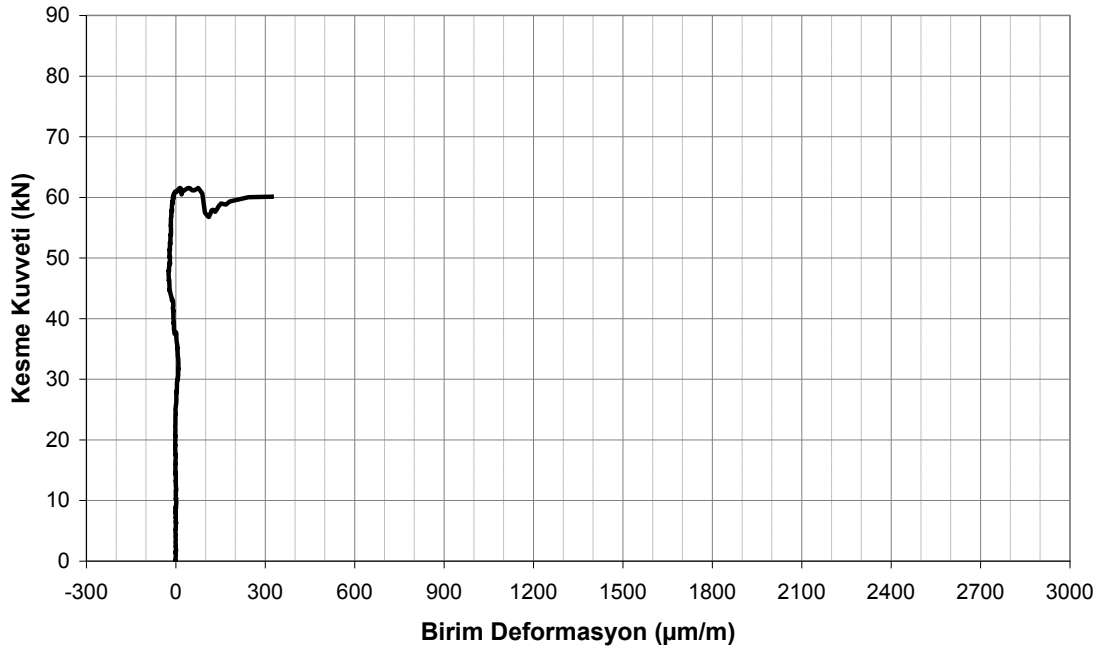
Şekil 4.19: BCU numunesi kesme çatlak genişliği – kesme kuvveti grafiği



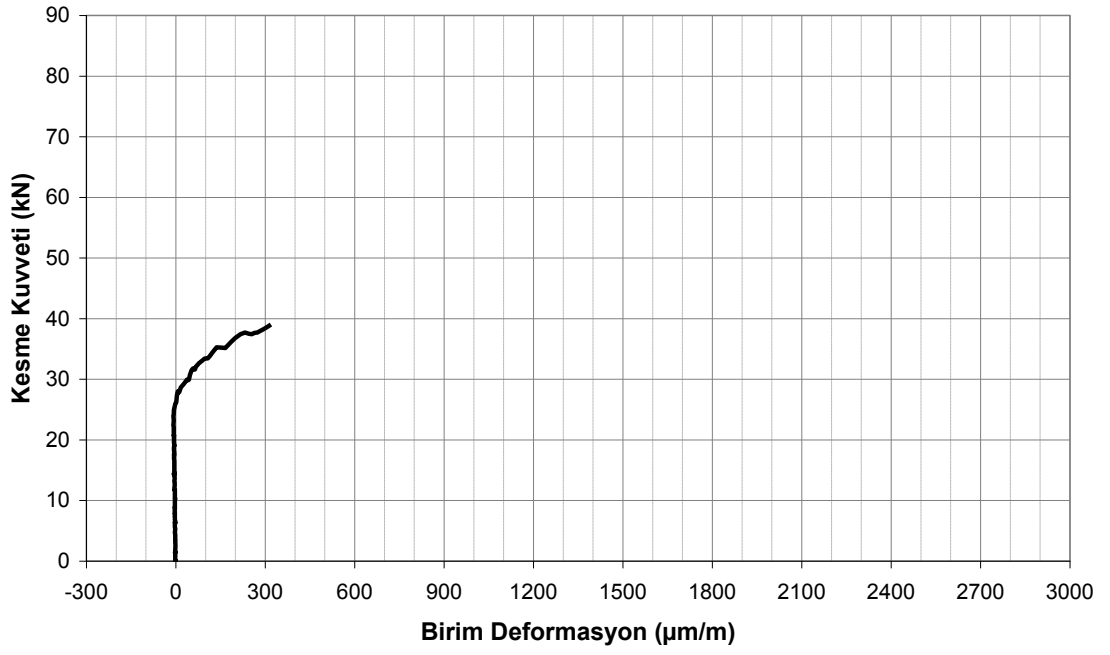
Şekil 4.20: BCU numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği



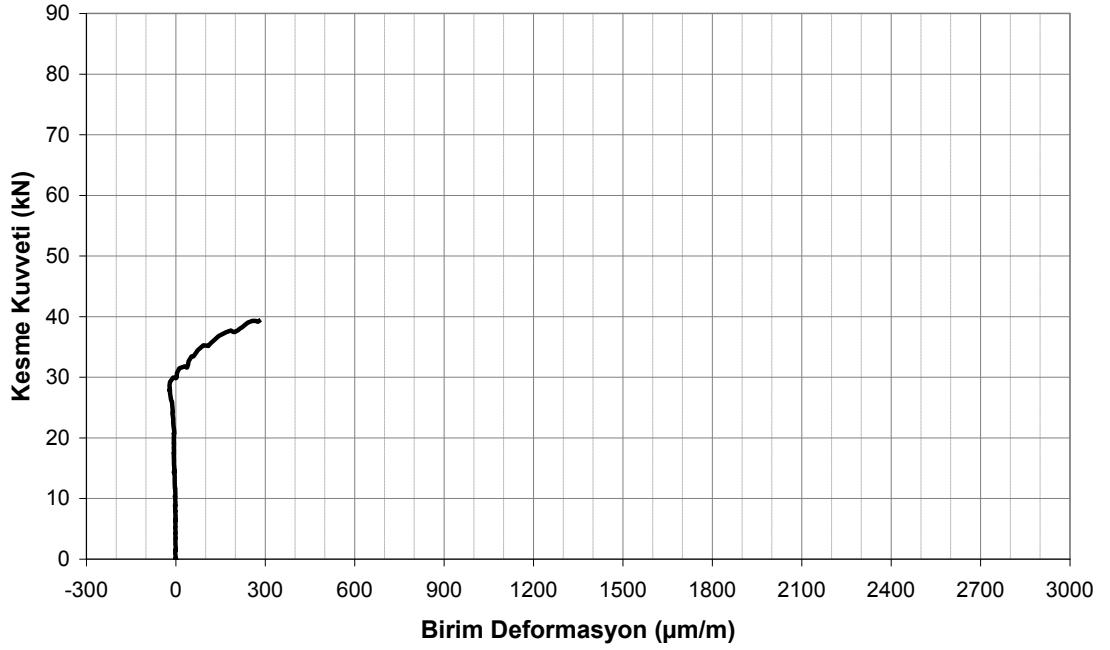
Şekil 4.21: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' ten okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



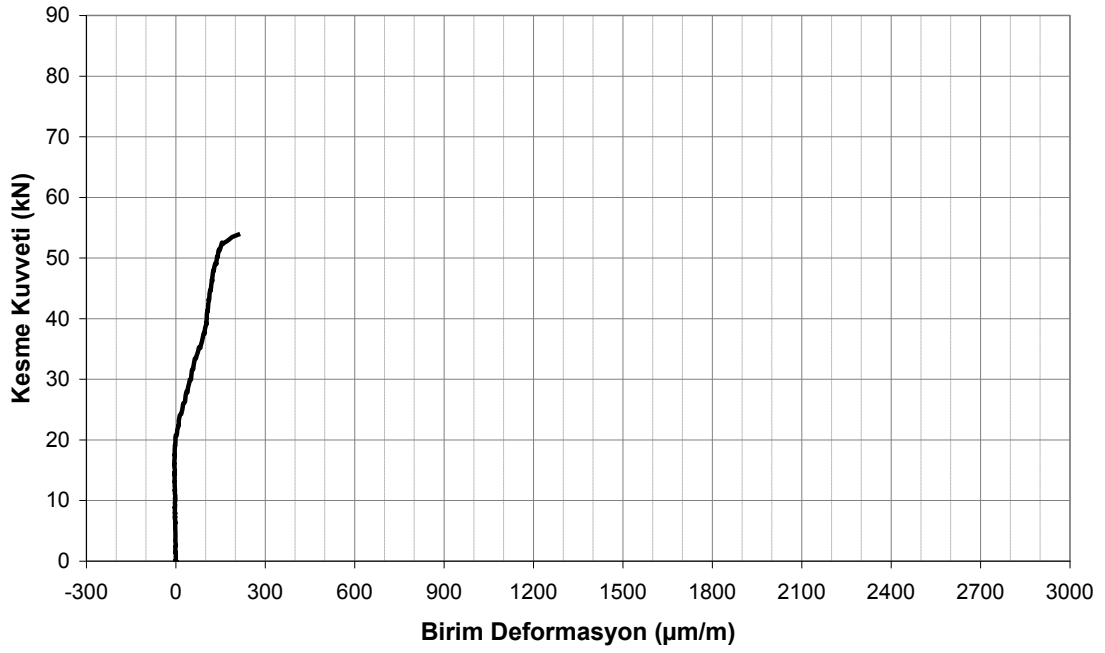
Şekil 4.22: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' ten okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



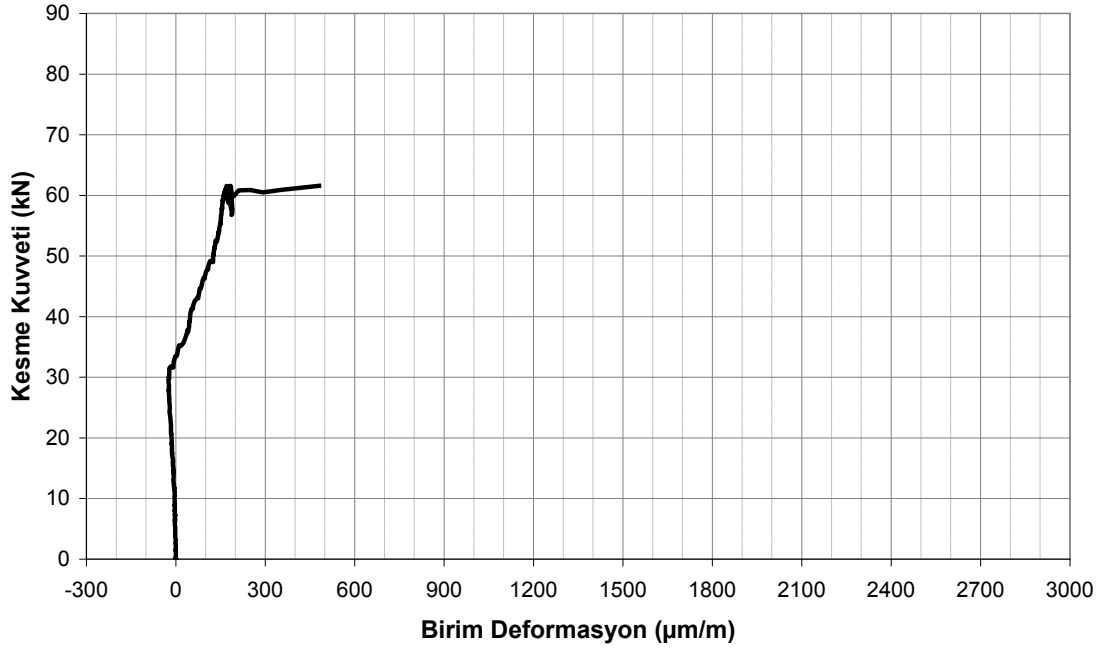
Şekil 4.23: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



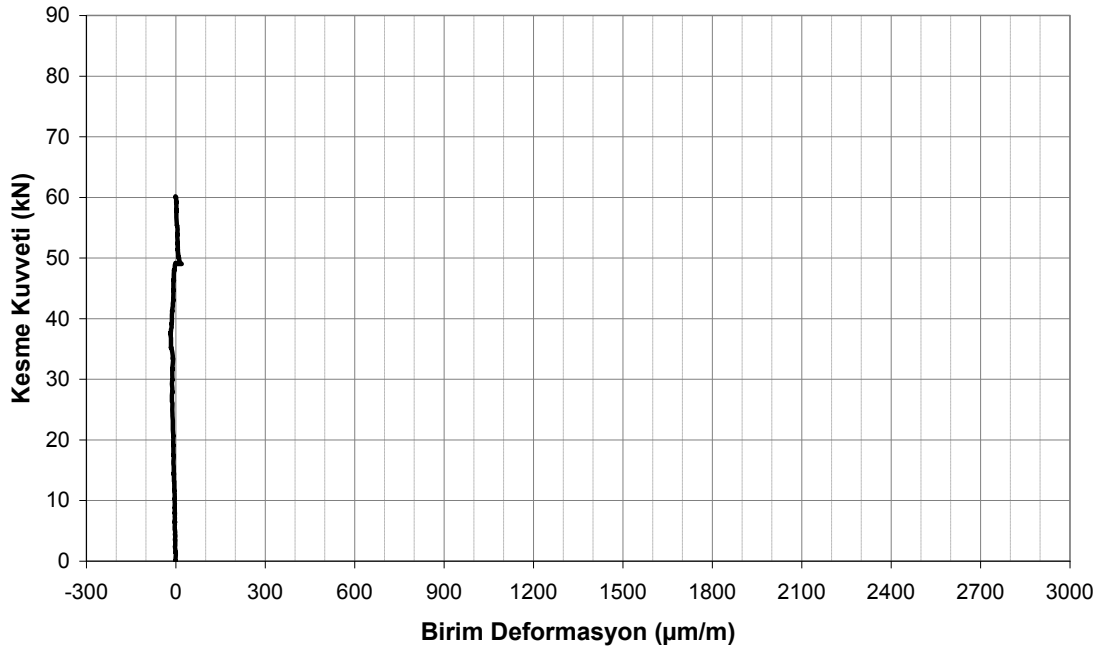
Şekil 4.24: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



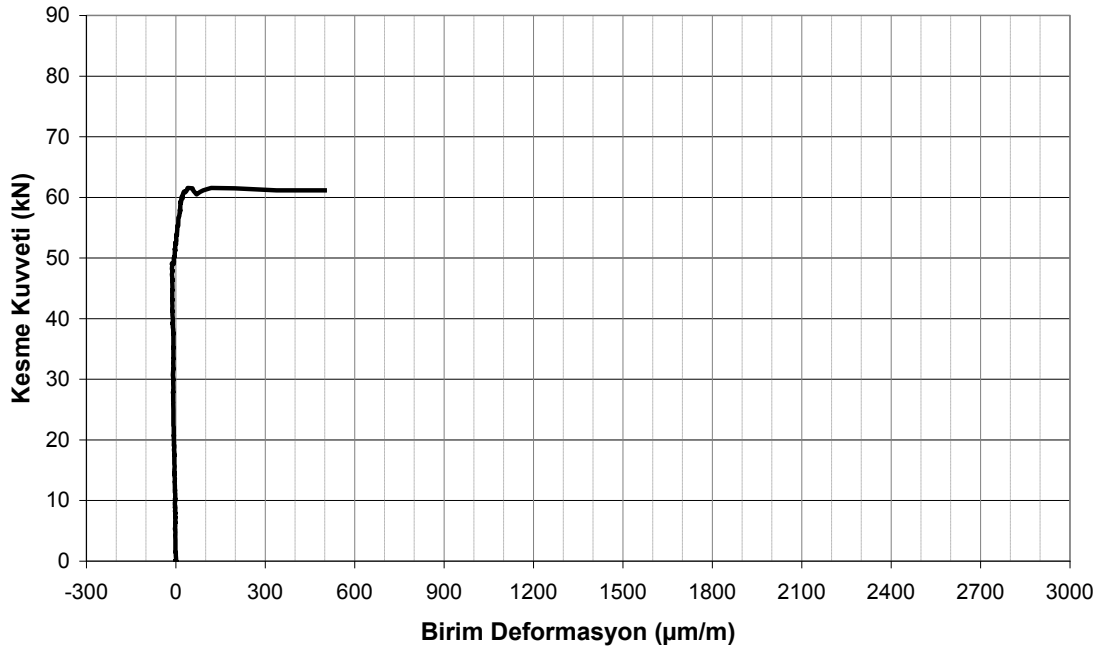
Şekil 4.25: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.26: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.27: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

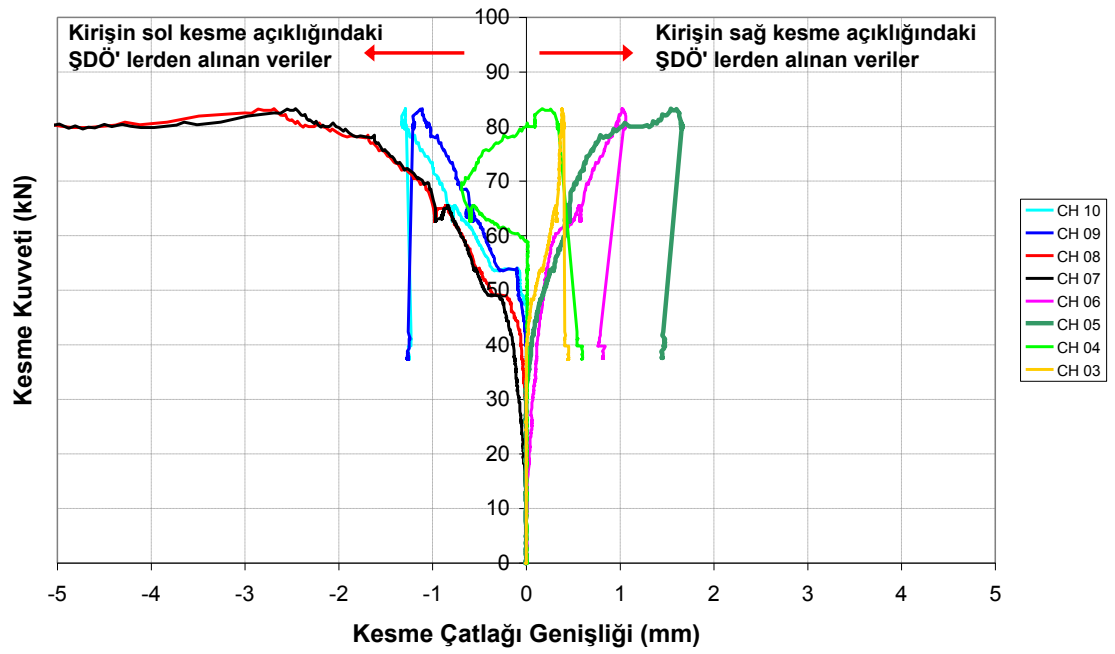


Şekil 4.28: BCU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

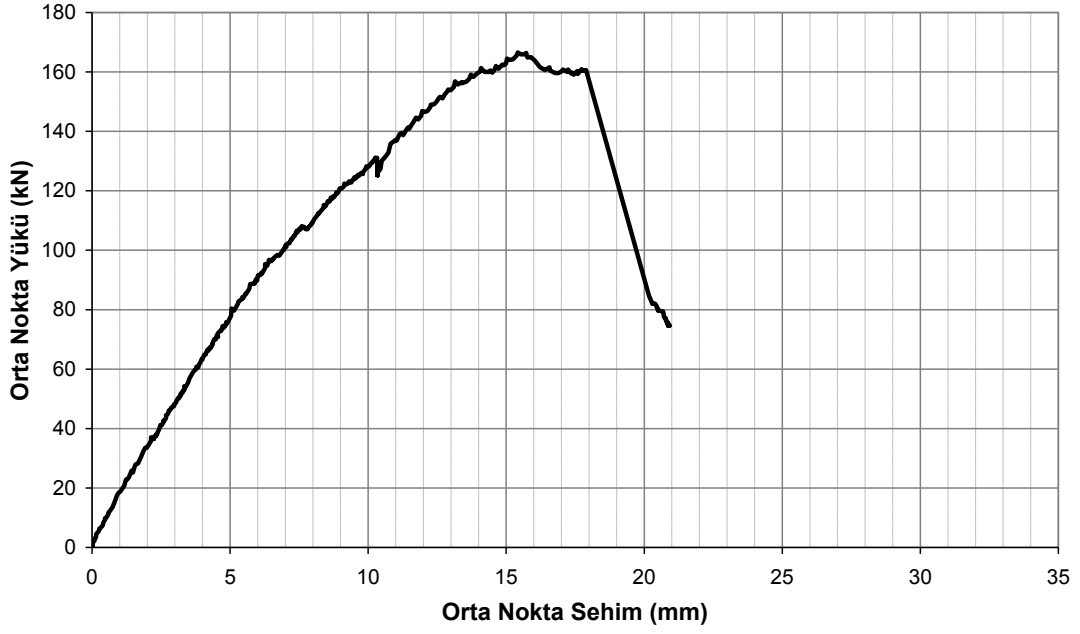
4.2.3. BCA numunesi



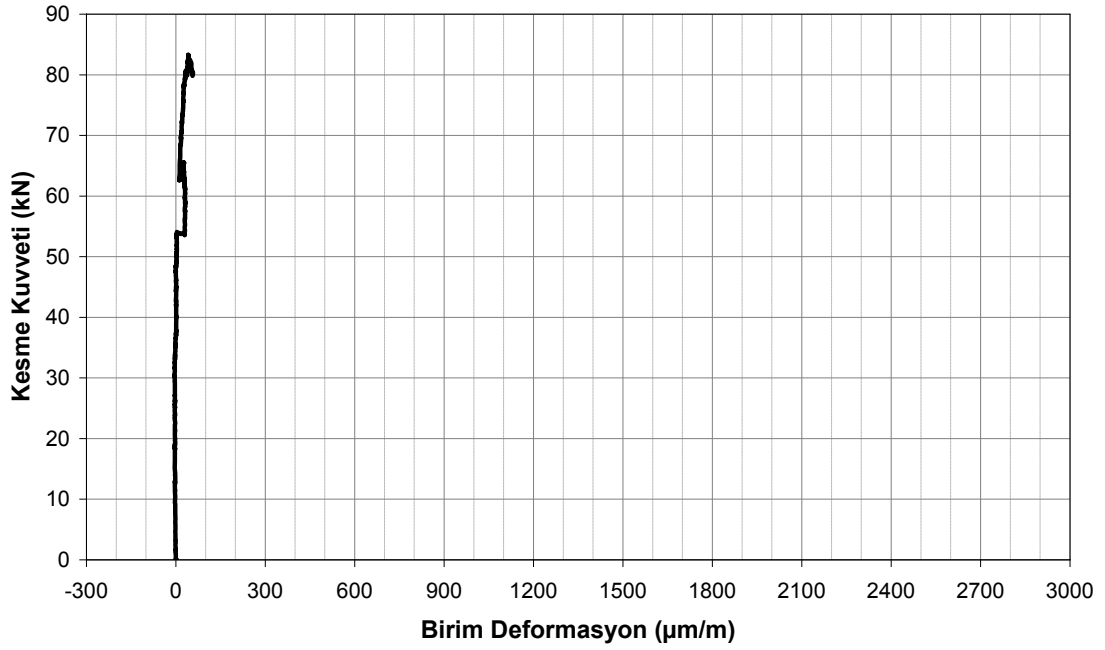
Şekil 4.29: BCA numunesi çatlak dağılımı



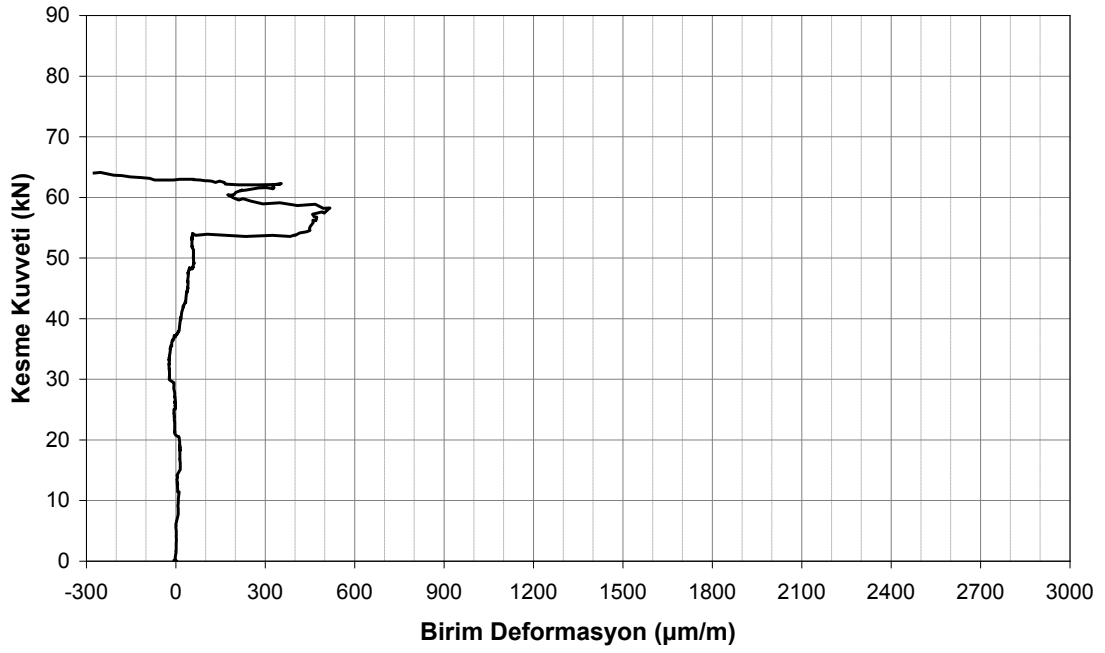
Şekil 4.30: BCA numunesi kesme çatlağı genişliği – kesme kuvveti grafiği



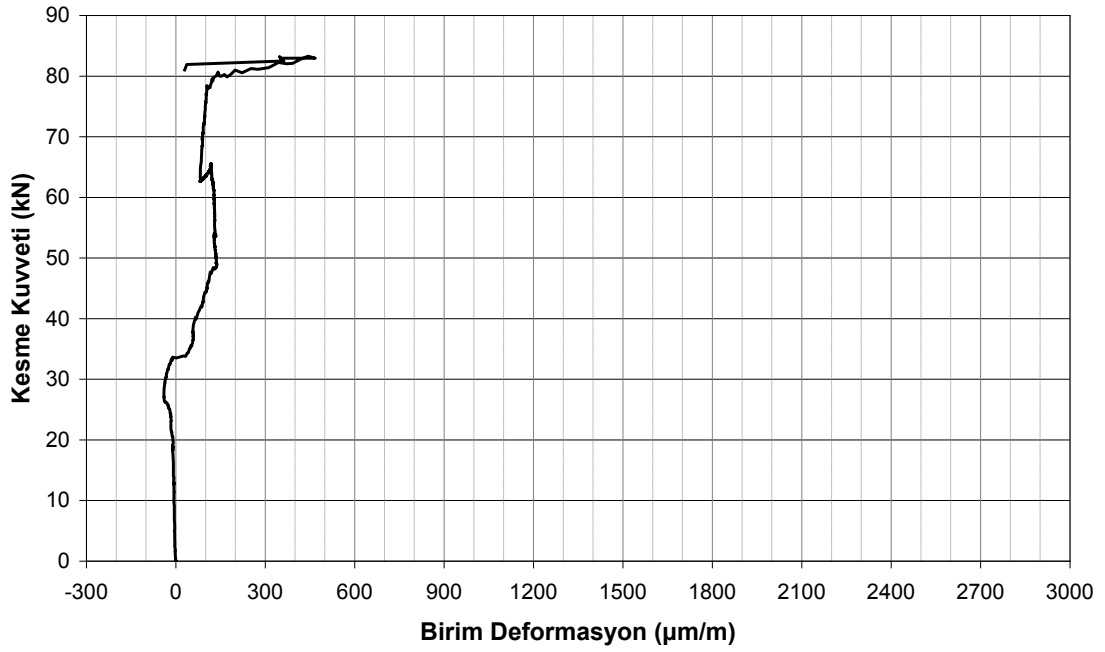
Şekil 4.31: BCA numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği



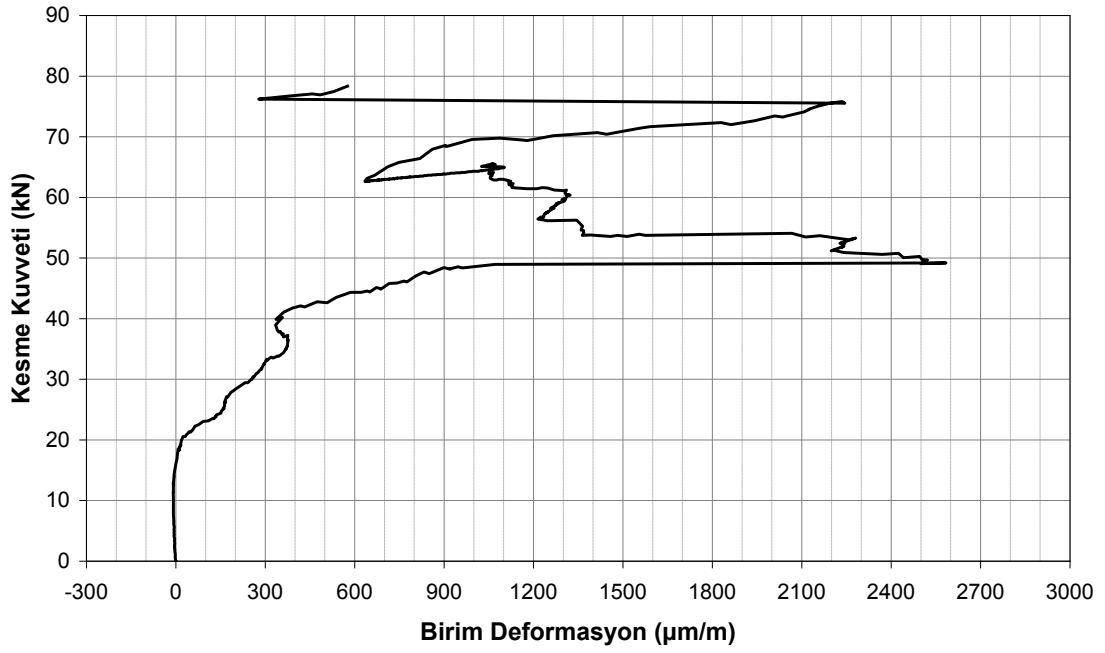
Şekil 4.32: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



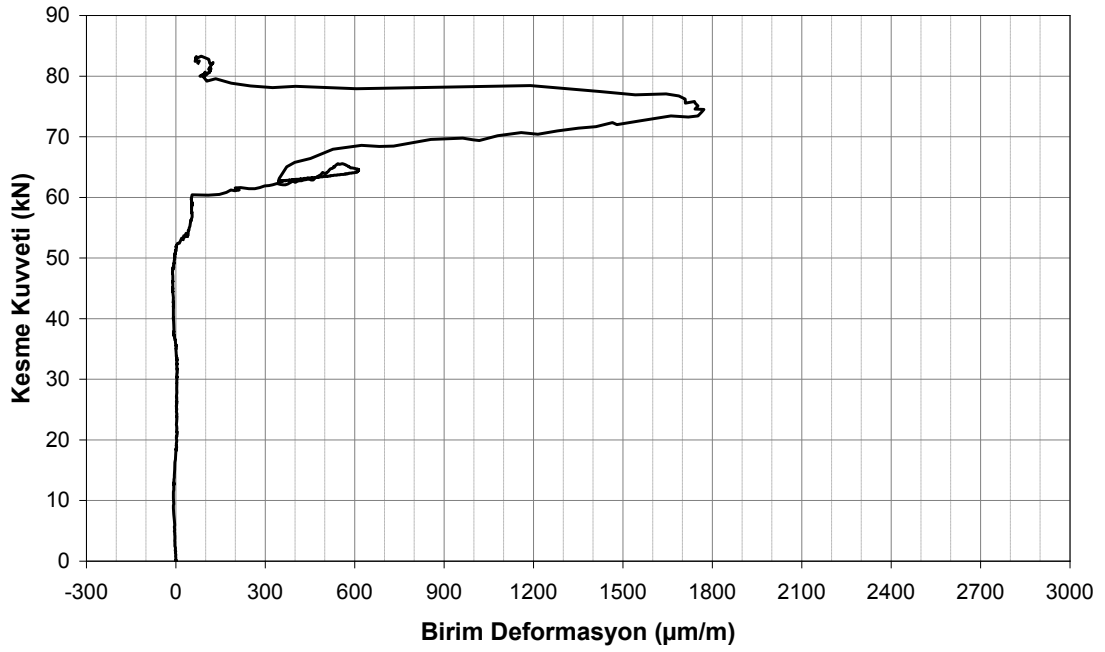
Şekil 4.33: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' ten okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



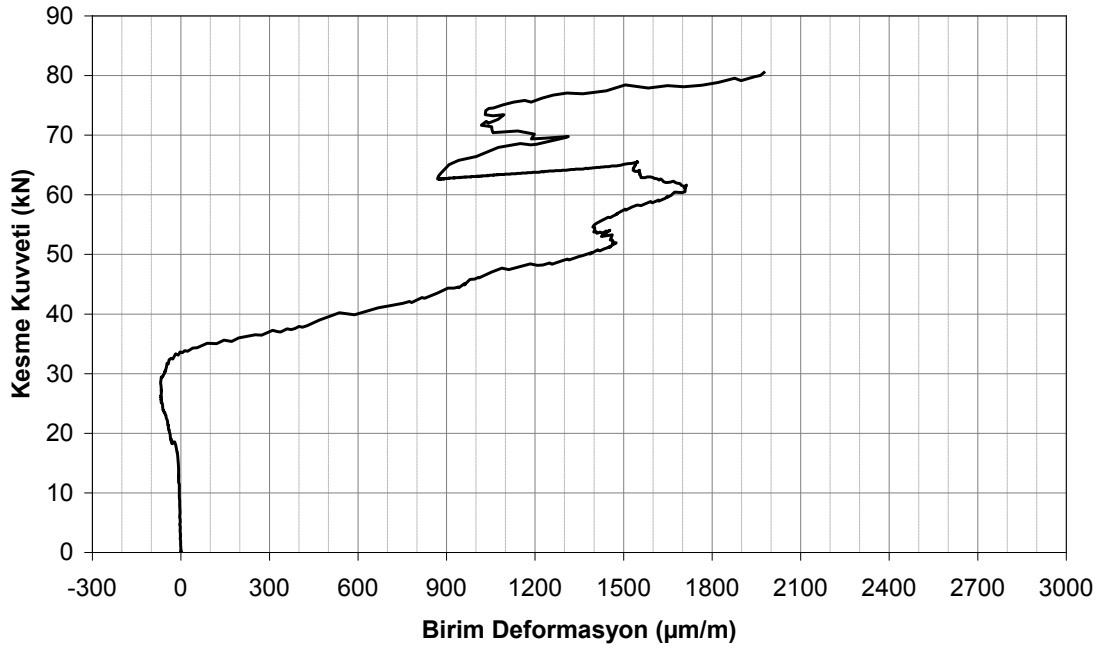
Şekil 4.34: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



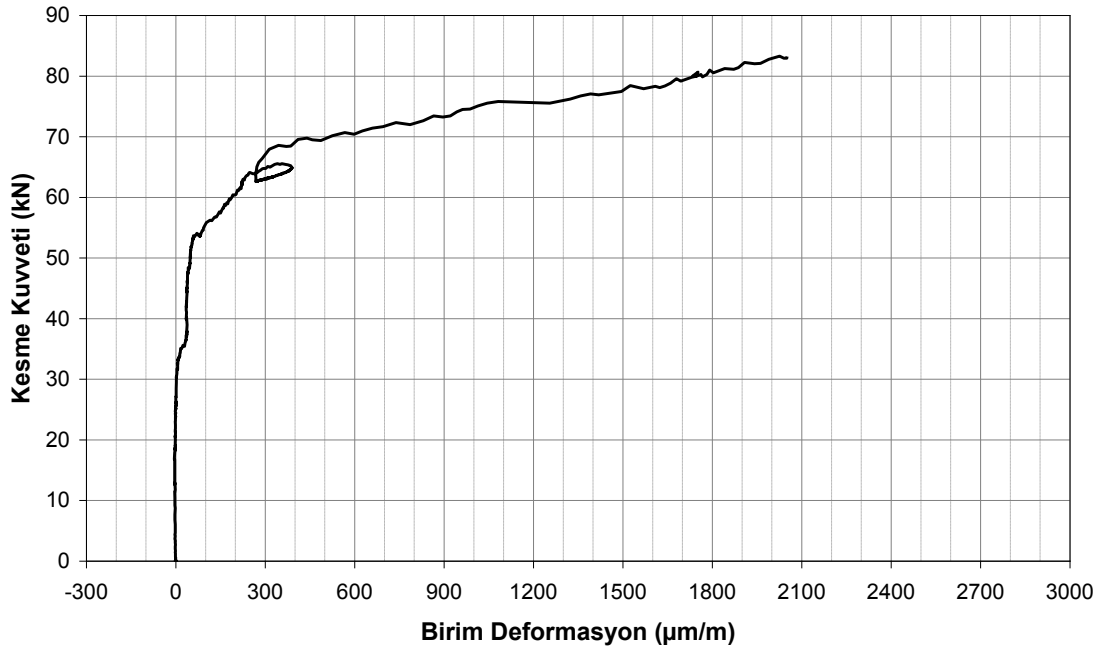
Şekil 4.35: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21’ den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



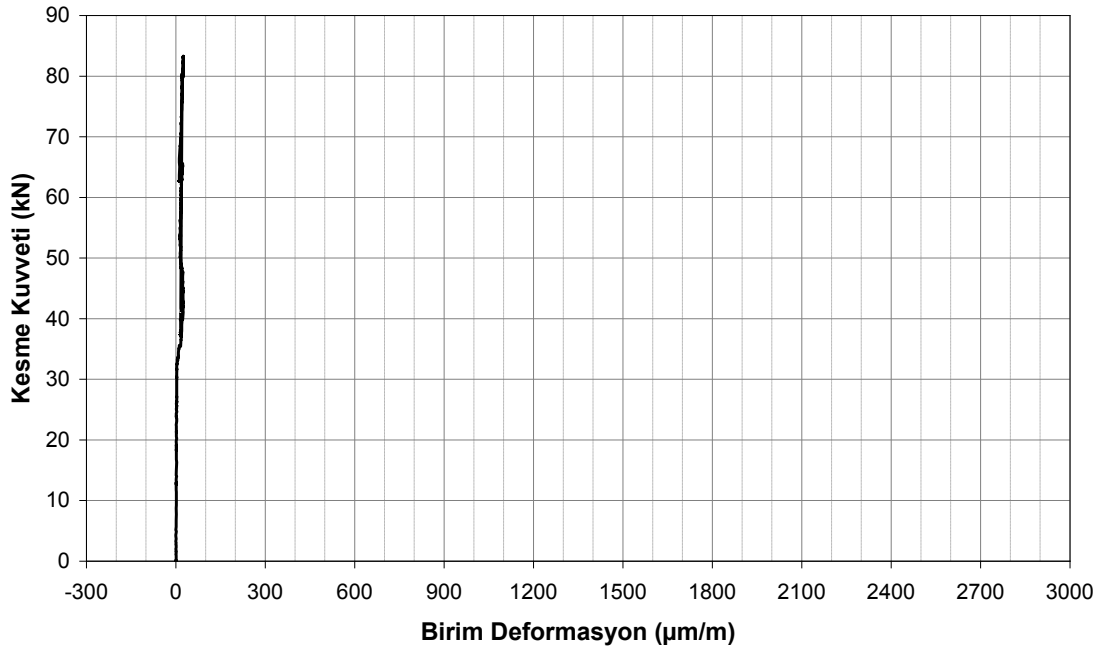
Şekil 4.36: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20’ den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.37: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.38: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

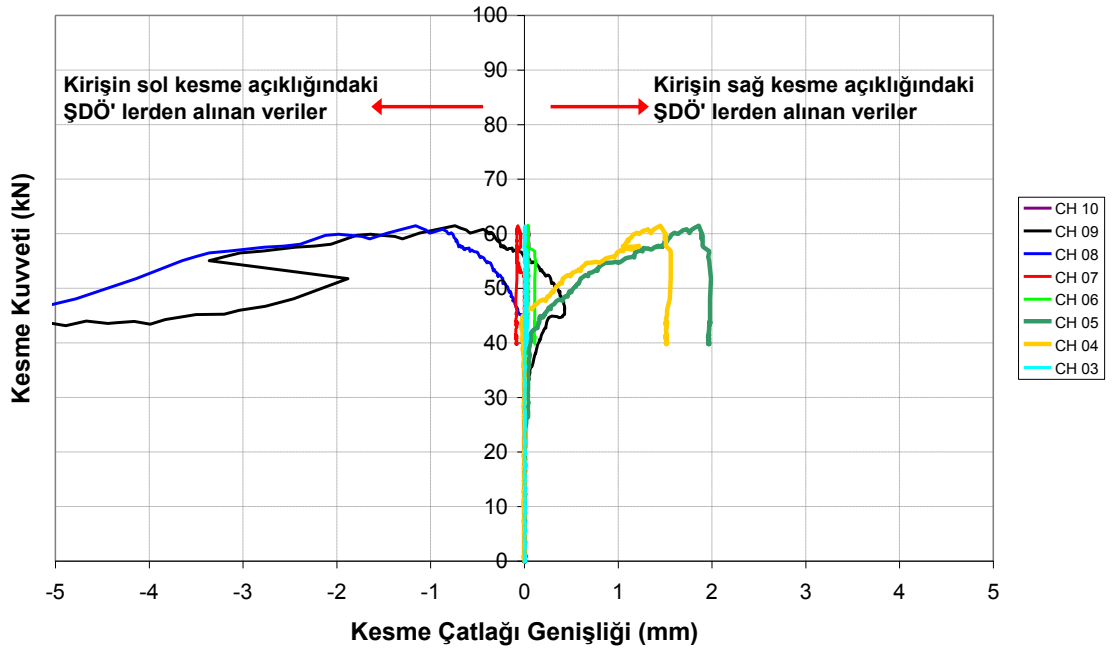


Şekil 4.39: BCA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

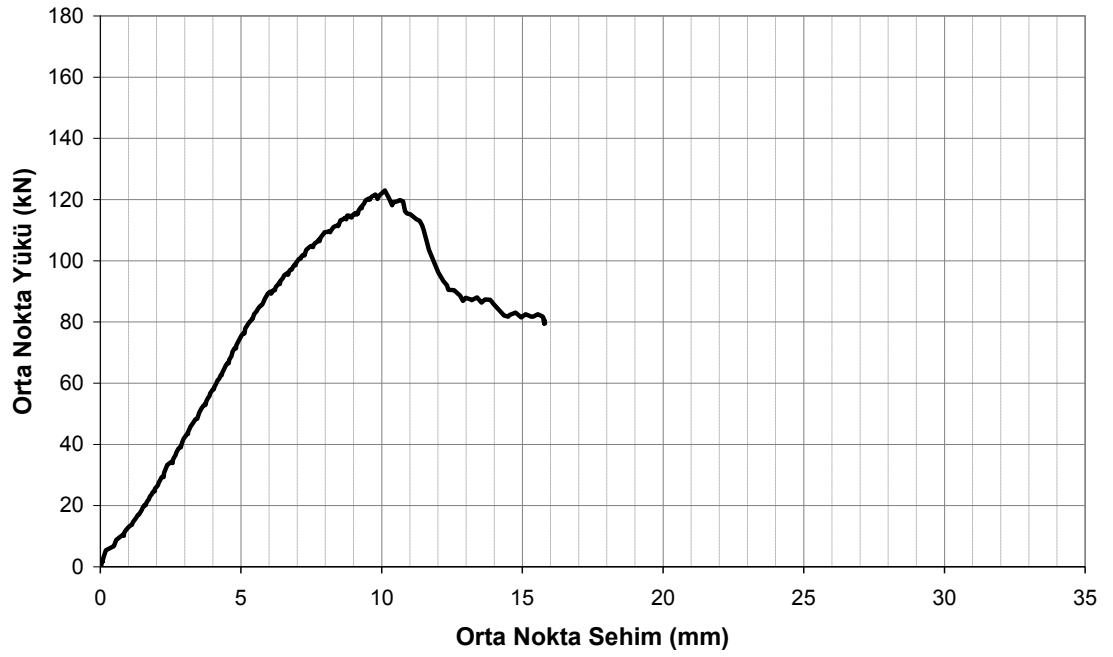
4.2.4. BGU numunesi



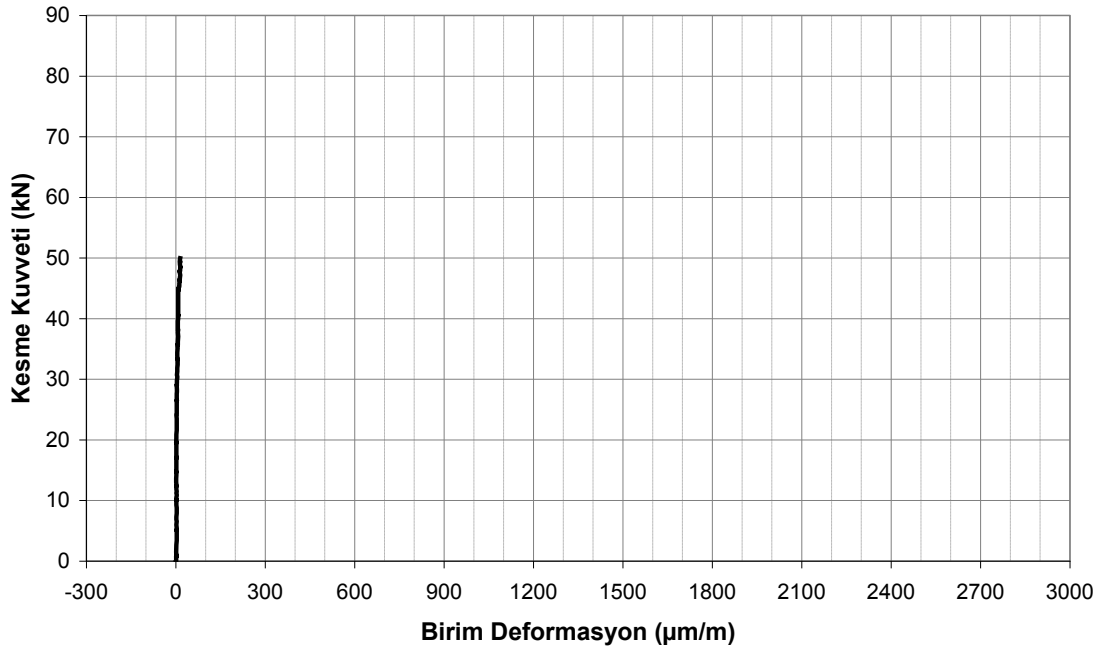
Şekil 4.40: BGU numunesi çatlak dağılımı



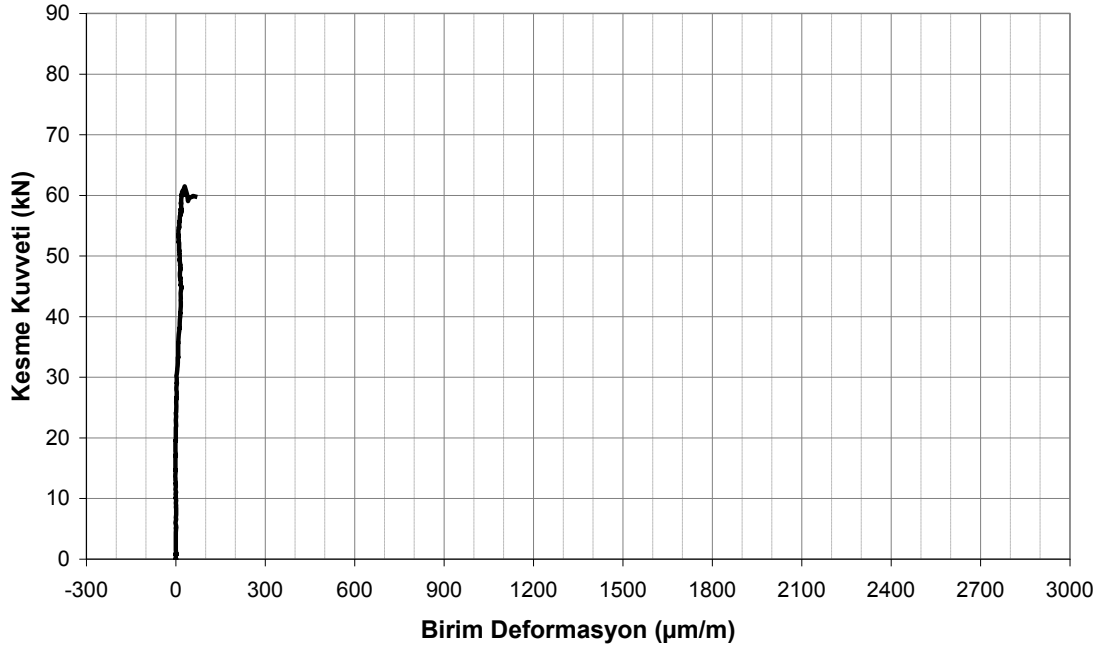
Şekil 4.41: BGU numunesi kesme çatlak genişliği – kesme kuvveti grafiği



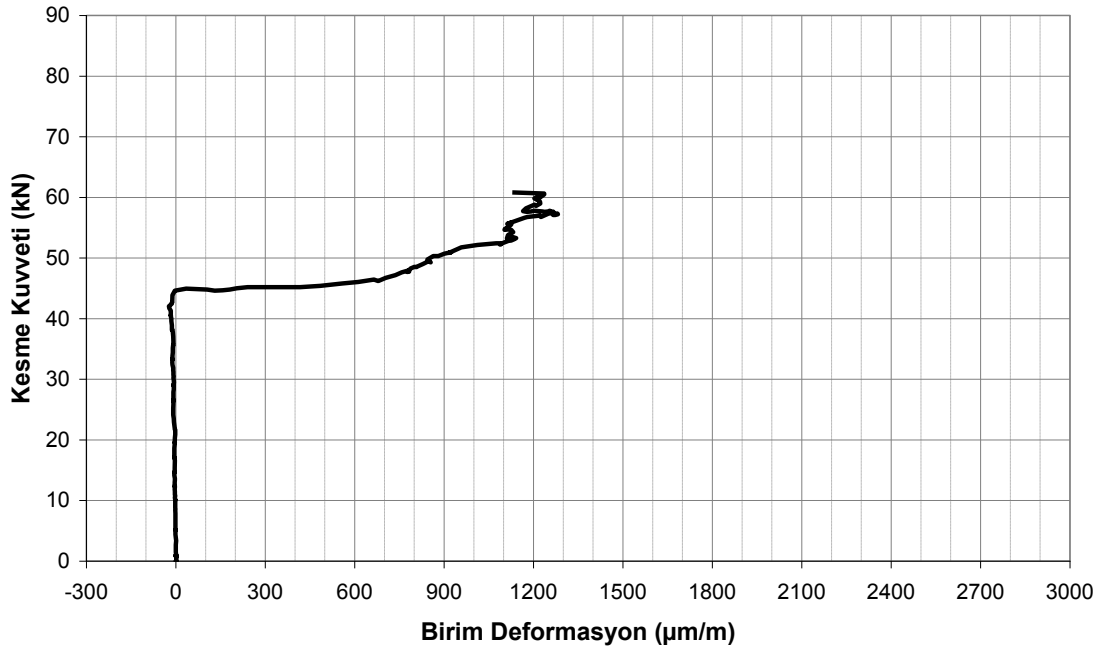
Şekil 4.42: BGU numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği



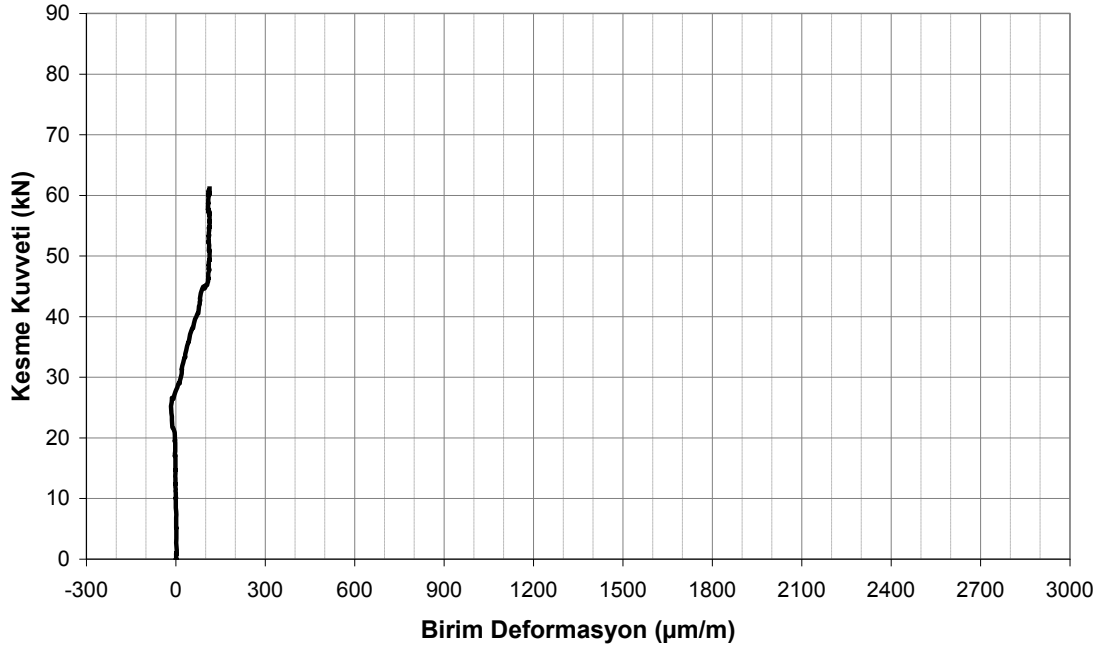
Şekil 4.43: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



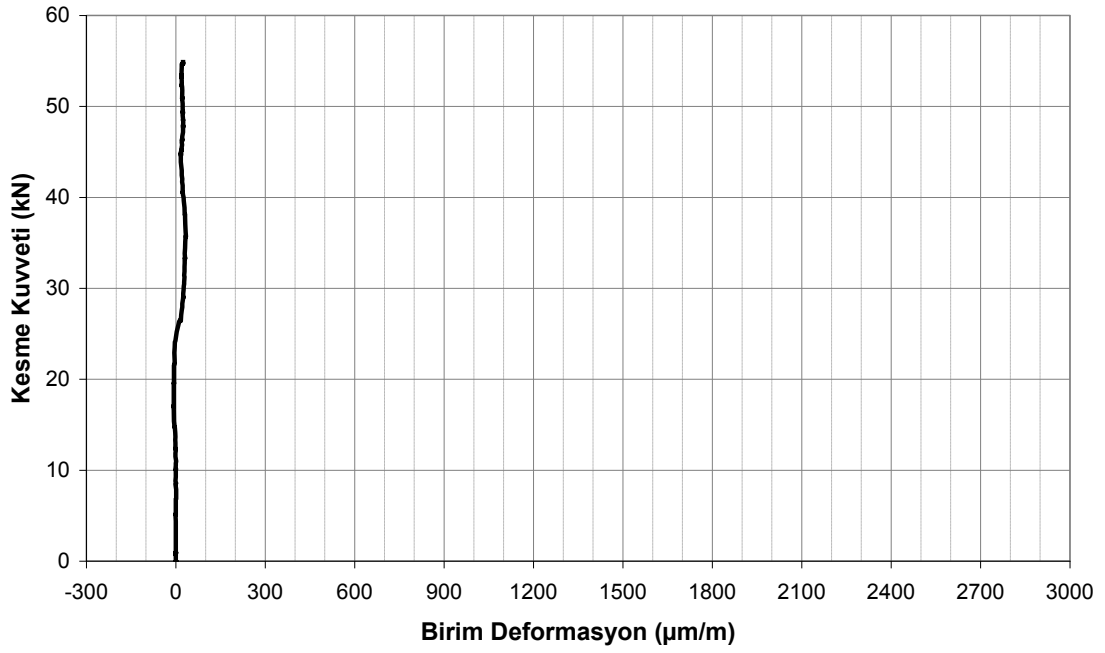
Şekil 4.44: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



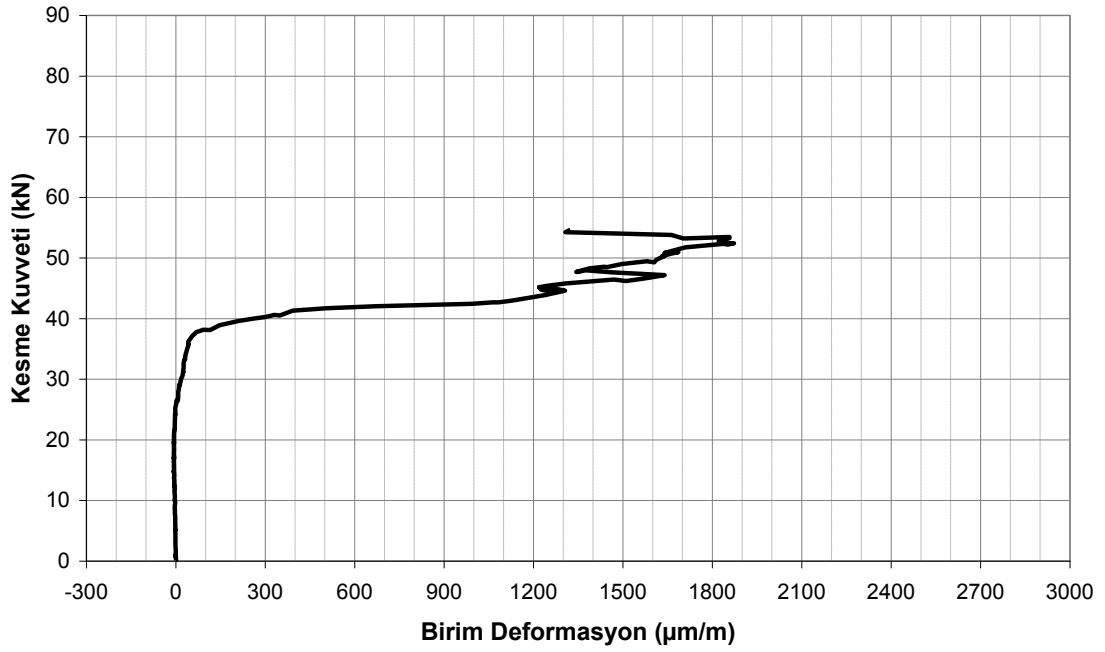
Şekil 4.45: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



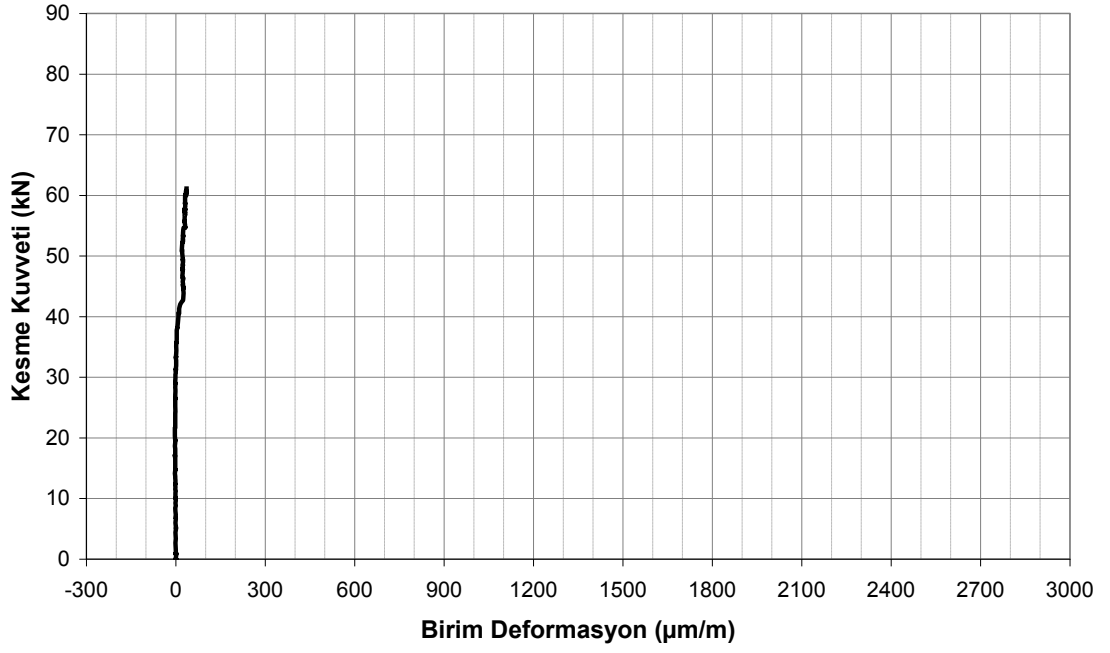
Şekil 4.46: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



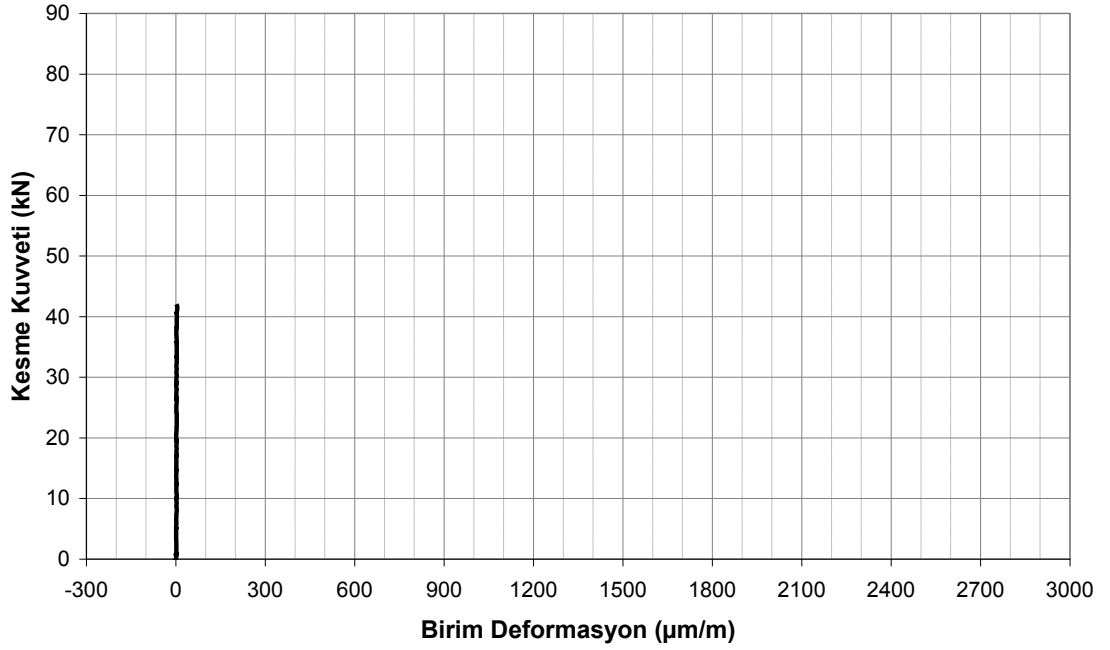
Şekil 4.47: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.48: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.49: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

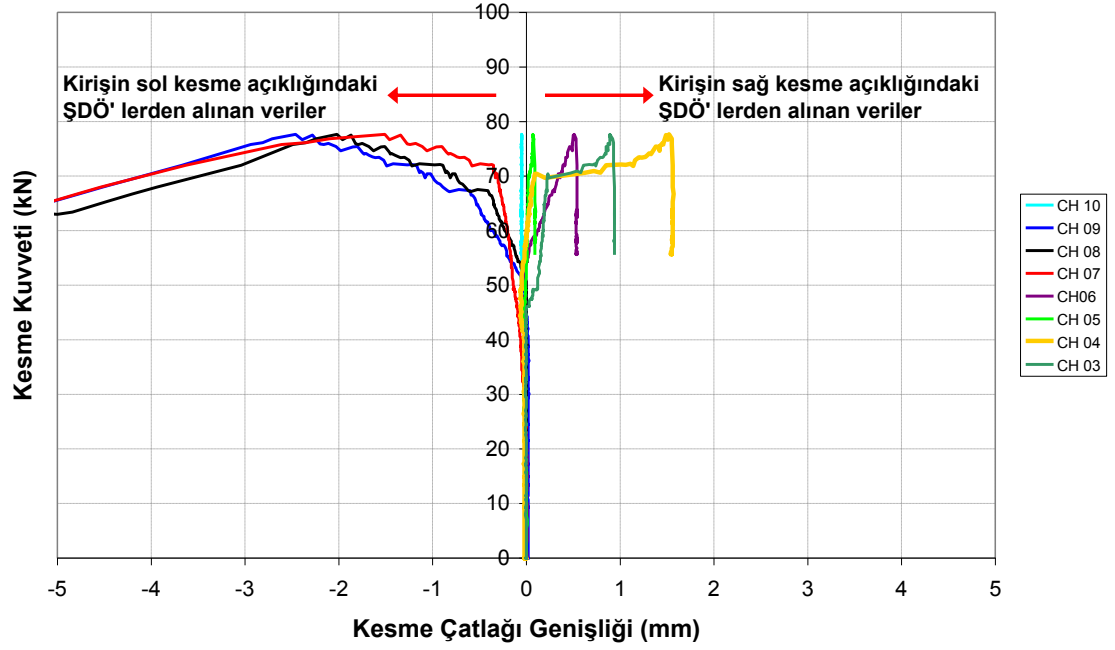


Şekil 4.50: BGU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

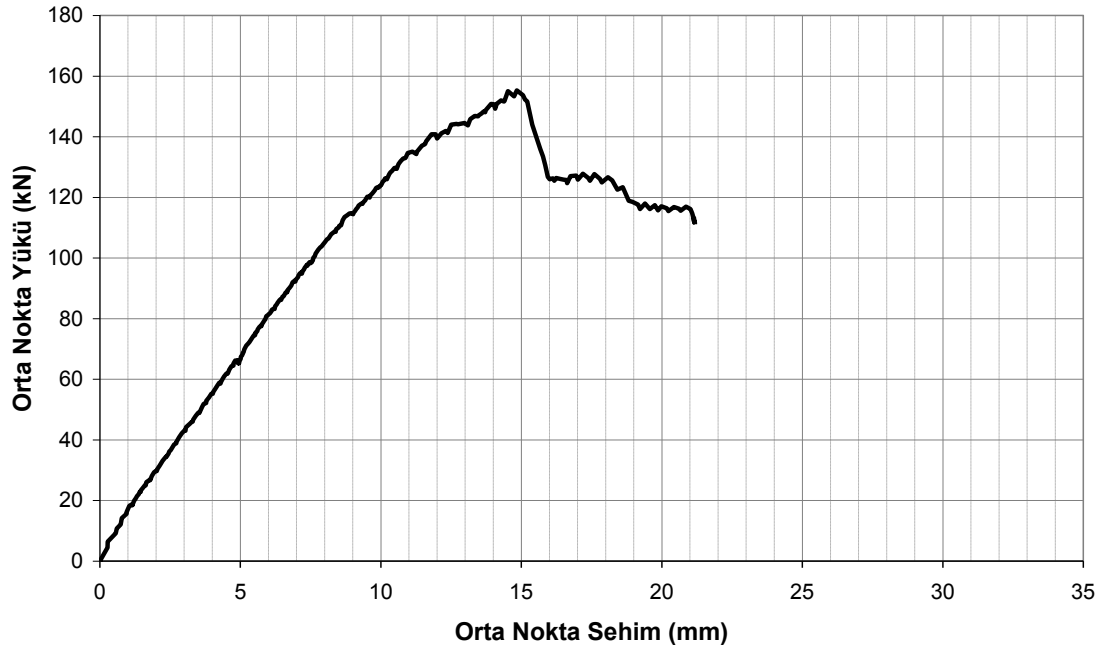
4.2.5. BGA numunesi



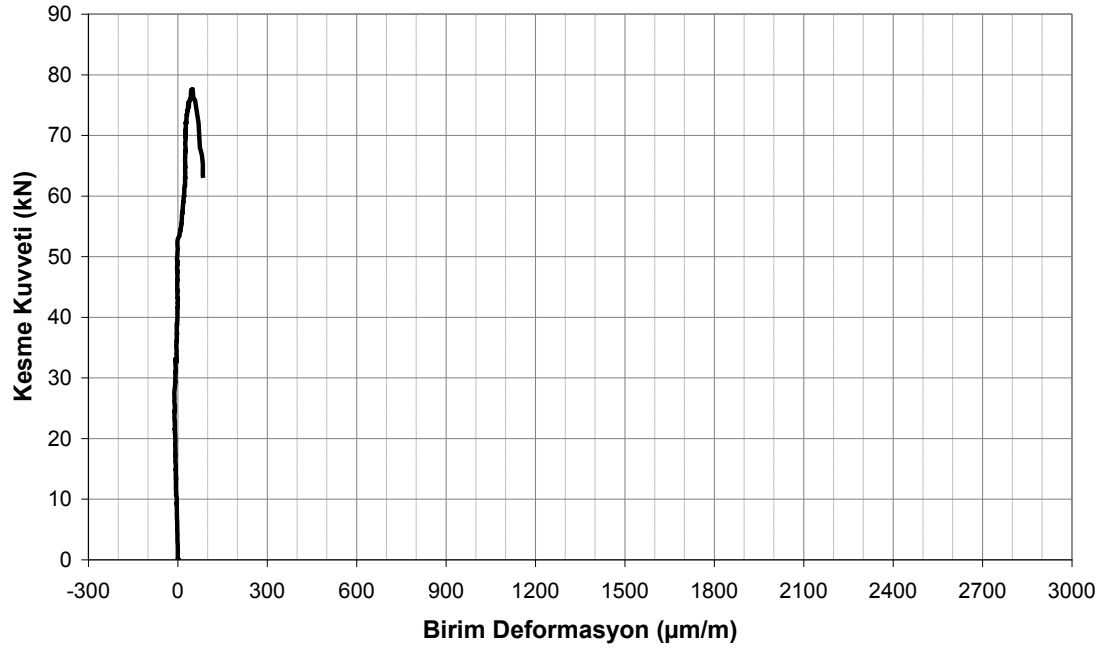
Şekil 4.51: BGA numunesi çatlak dağılımı



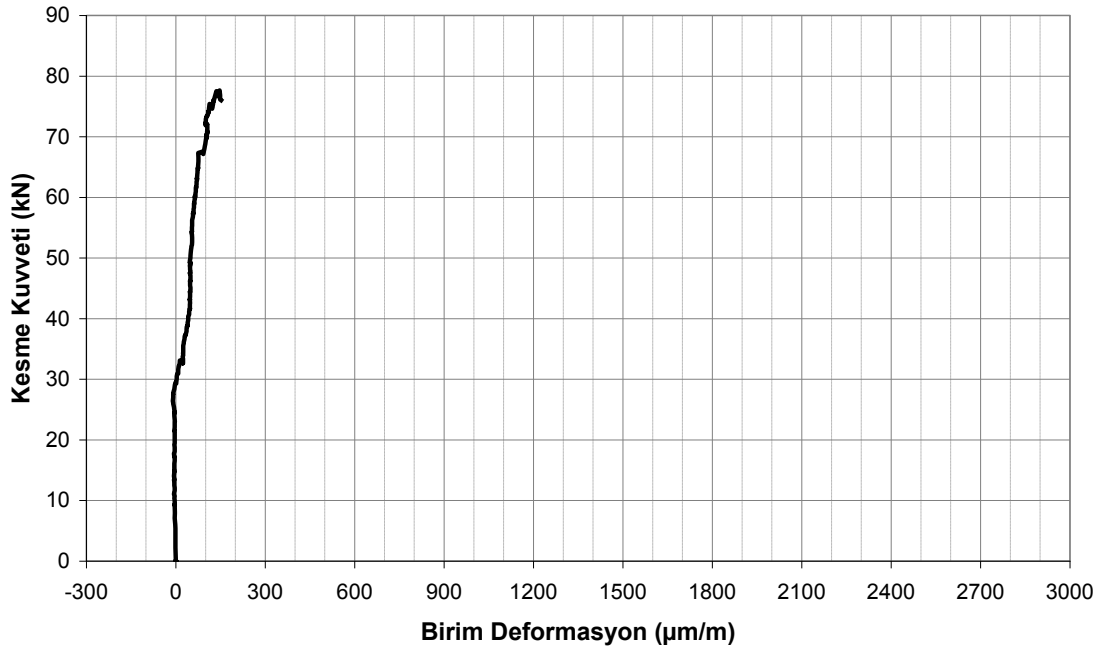
Şekil 4.52: BGA numunesi kesme çatlağı genişliği – kesme kuvveti grafiği



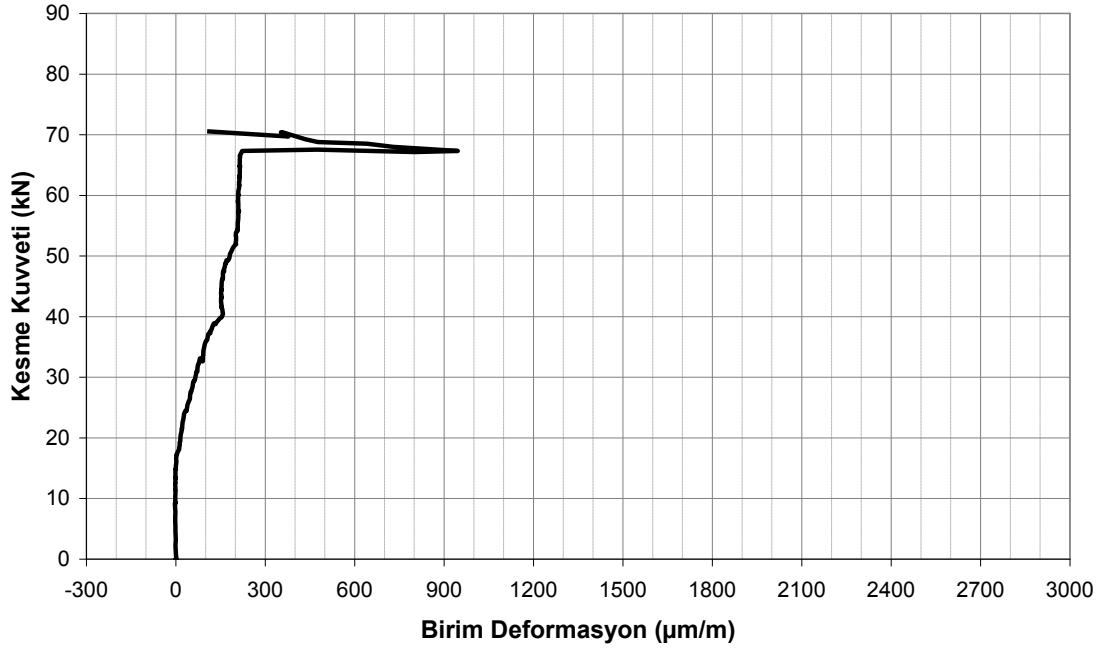
Şekil 4.53: BGA numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği



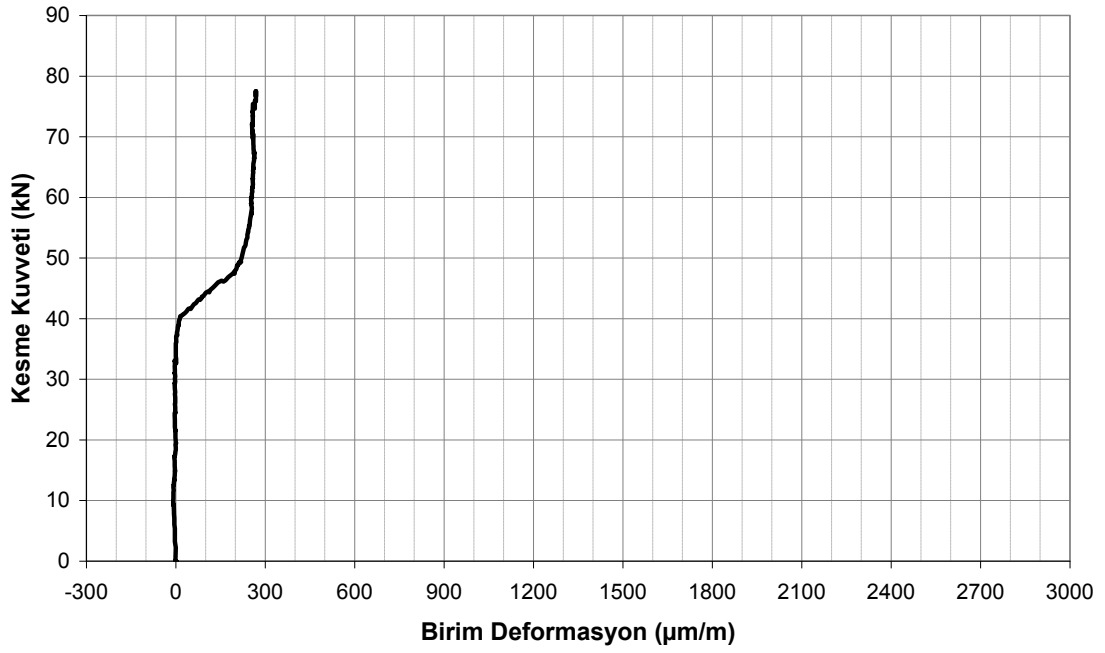
Şekil 4.54: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



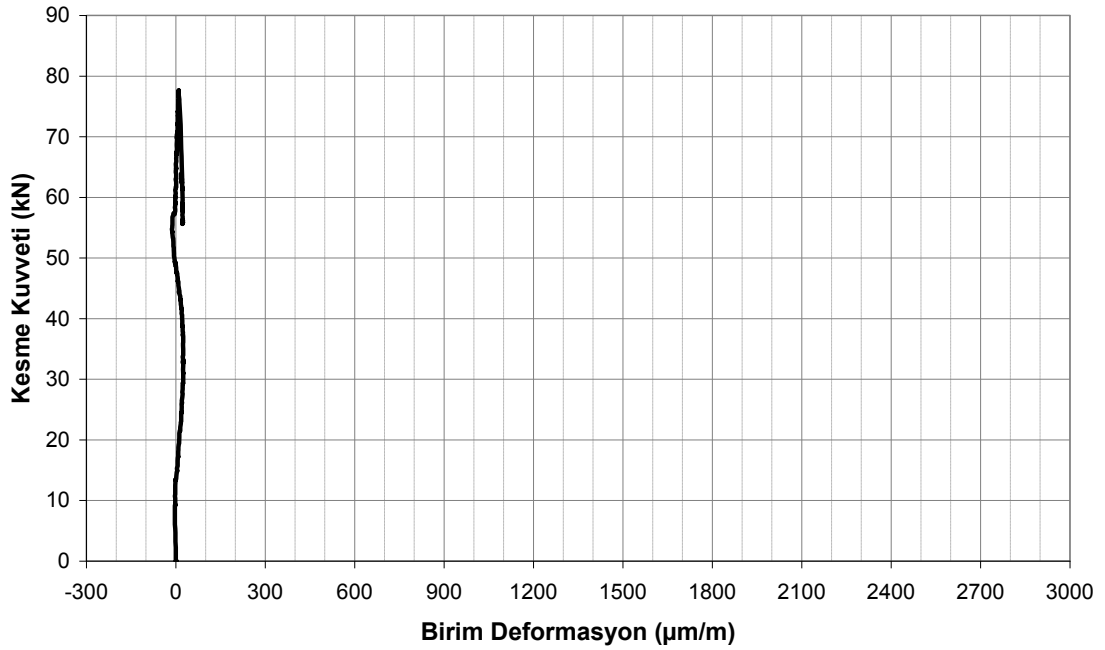
Şekil 4.55: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



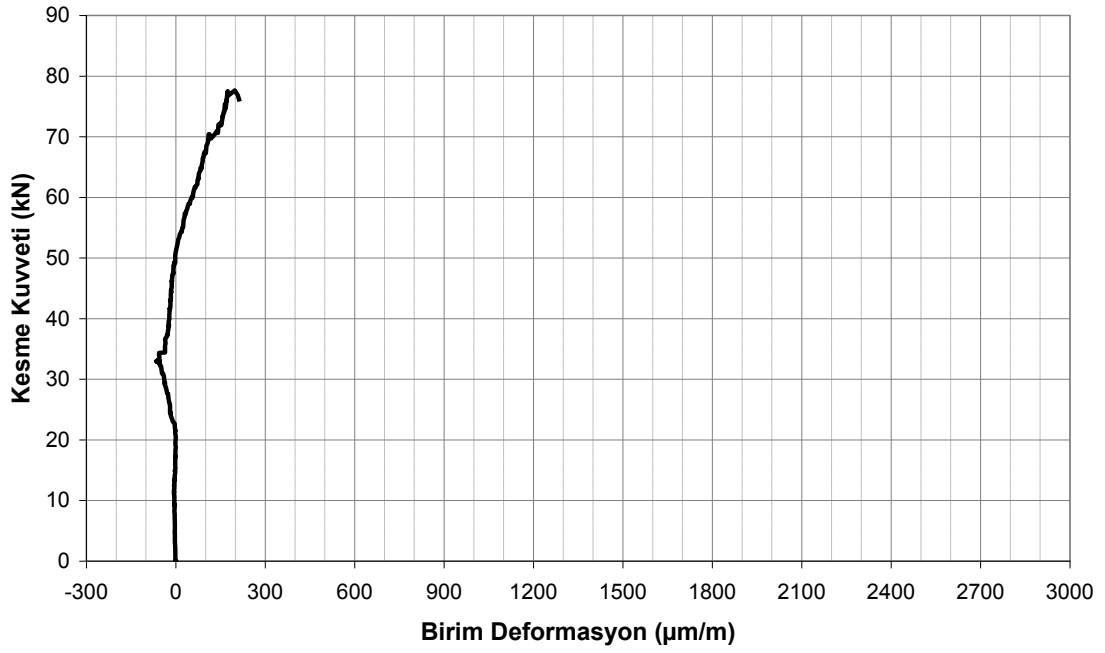
Şekil 4.56: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



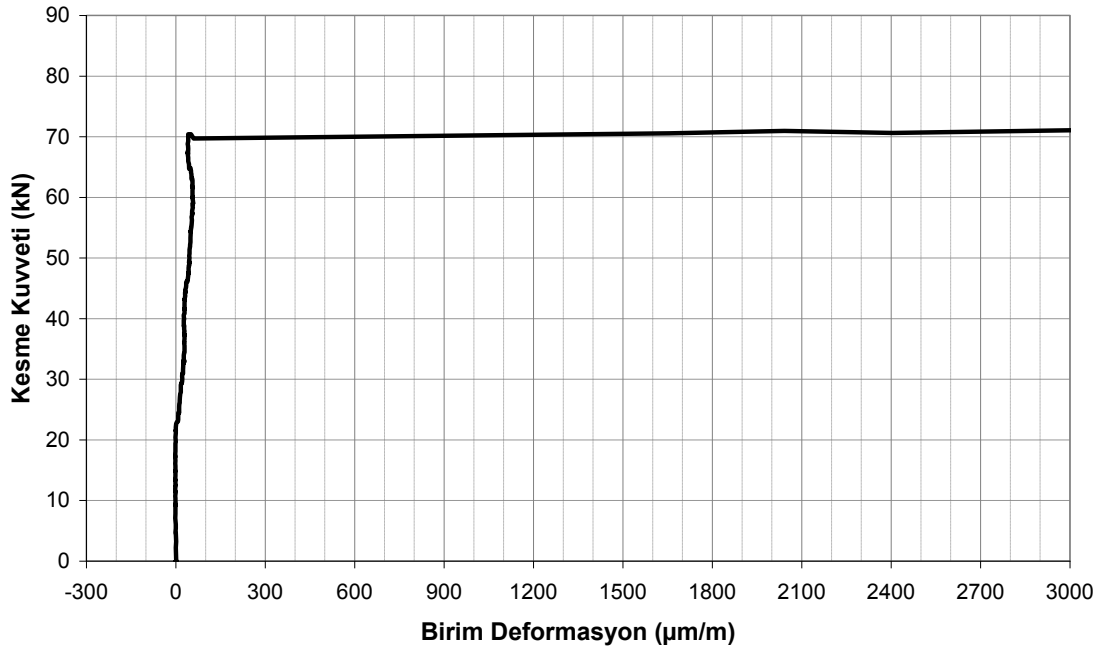
Şekil 4.57: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



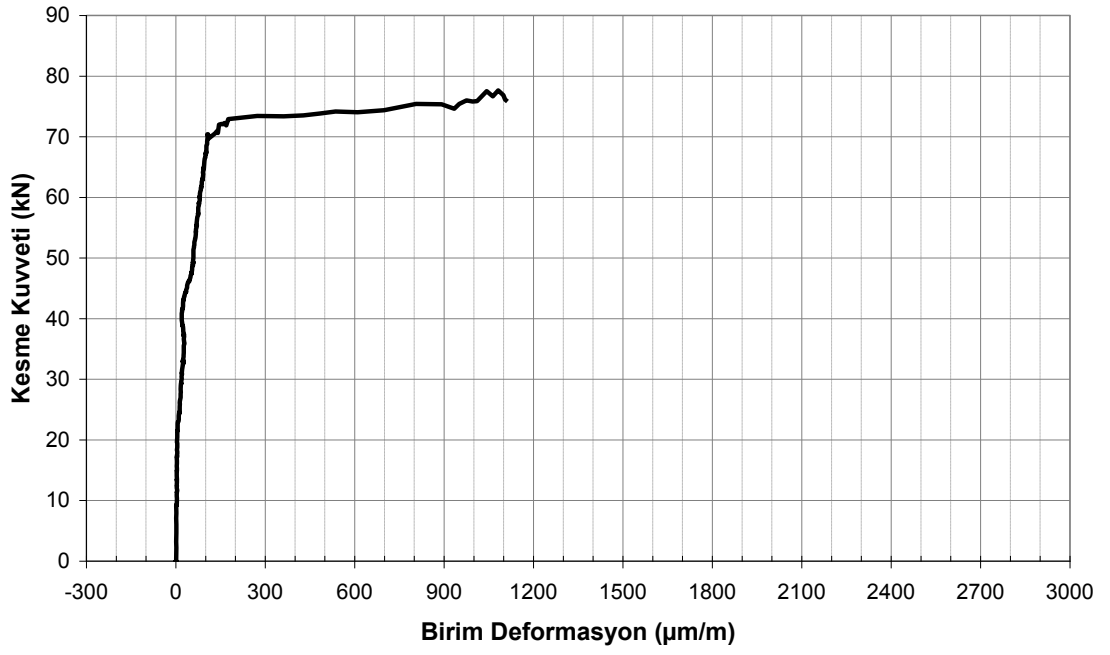
Şekil 4.58: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.59: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.60: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

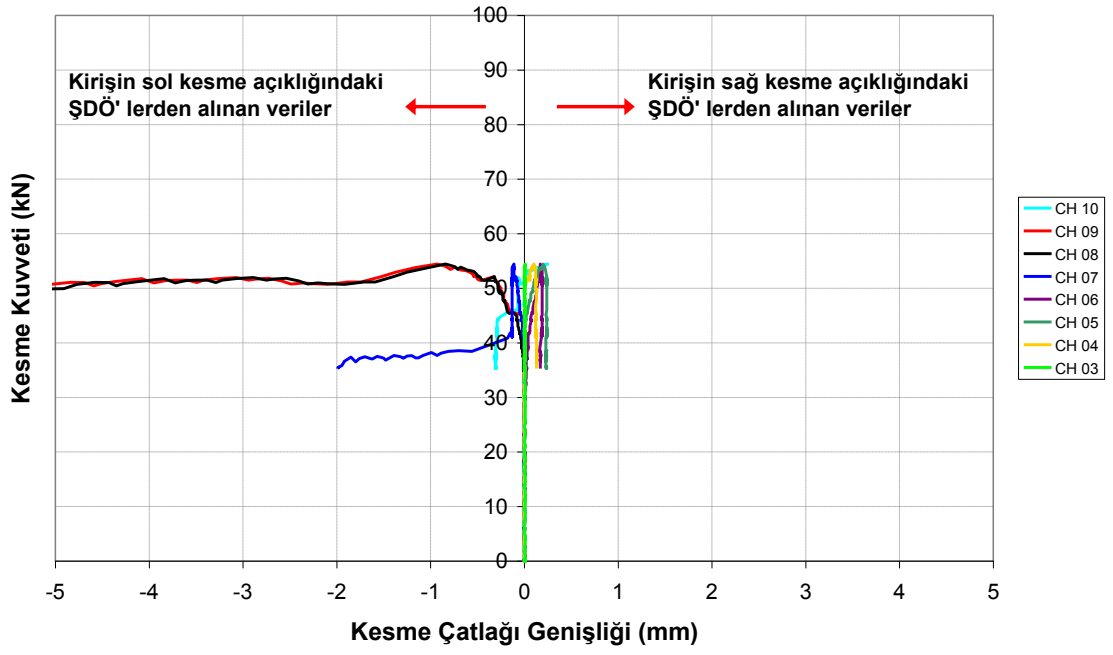


Şekil 4.61: BGA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

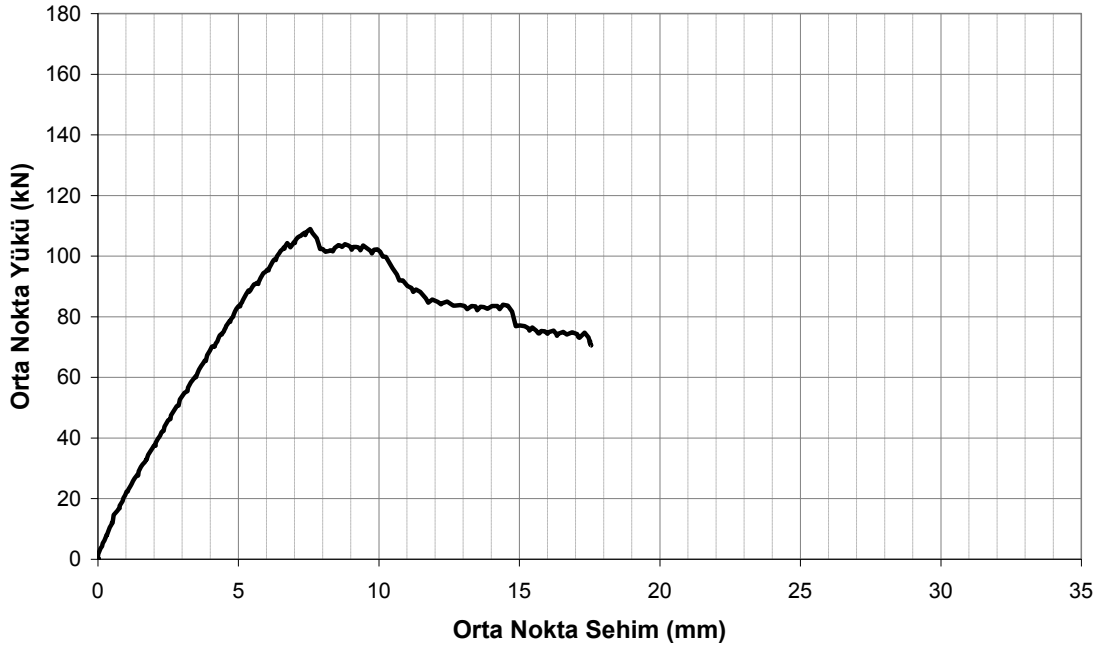
4.2.6. BHU numunesi



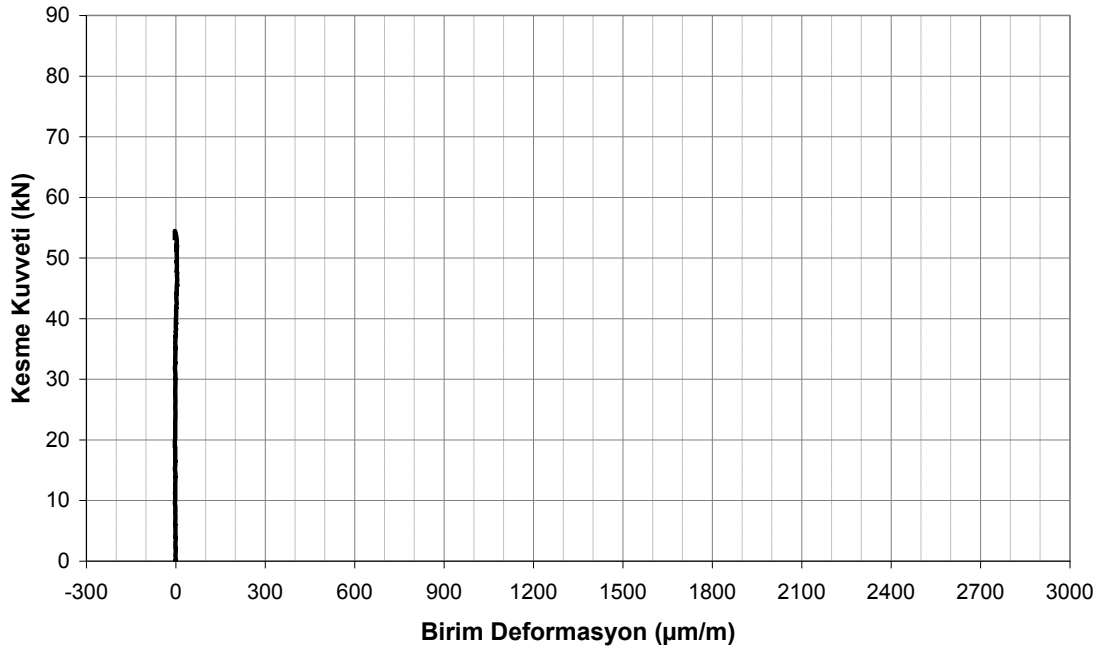
Şekil 4.62: BHU numunesi çatlak dağılımı



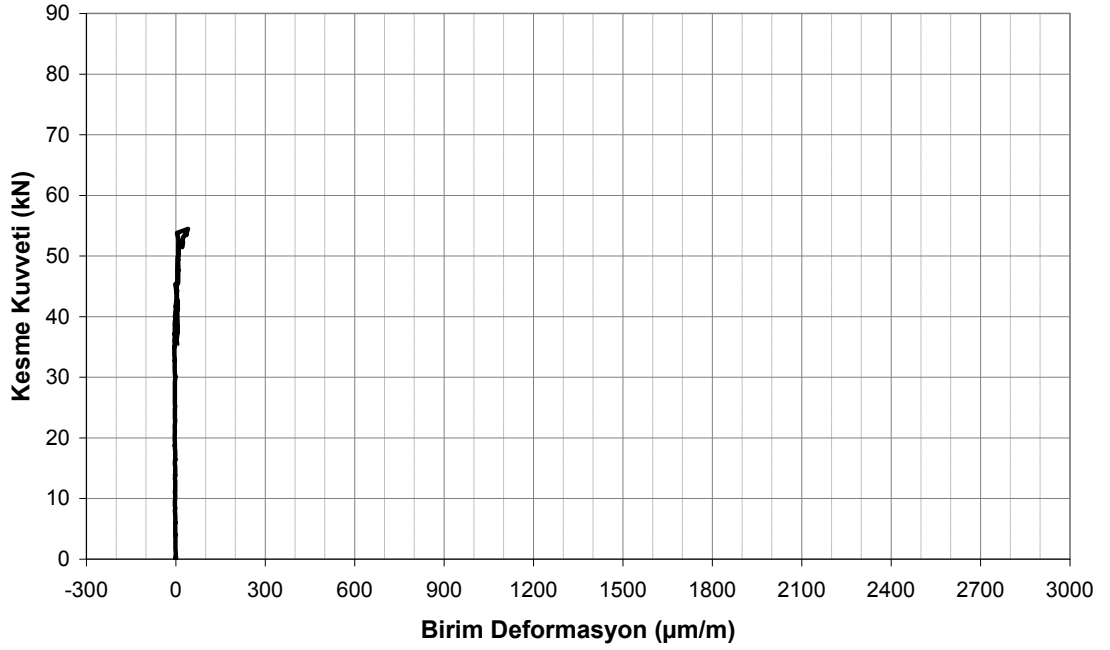
Şekil 4.63: BHU numunesi kesme çatlak genişliği – kesme kuvveti grafiği



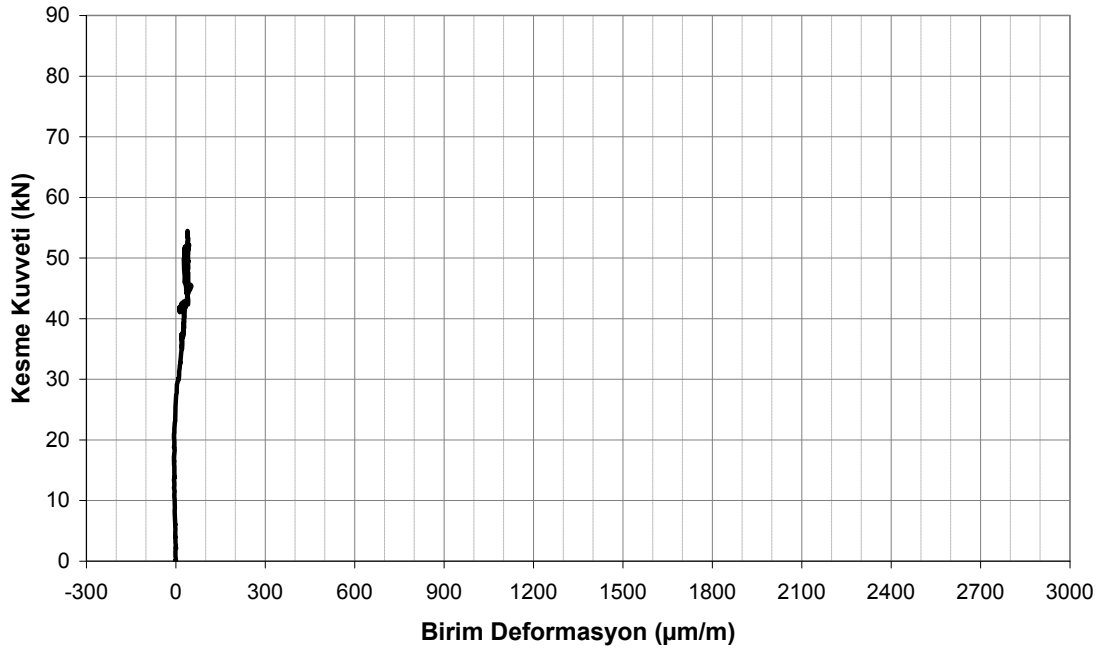
Şekil 4.64: BHU numunesi orta nokta sehim – orta nokta yükü grafiği



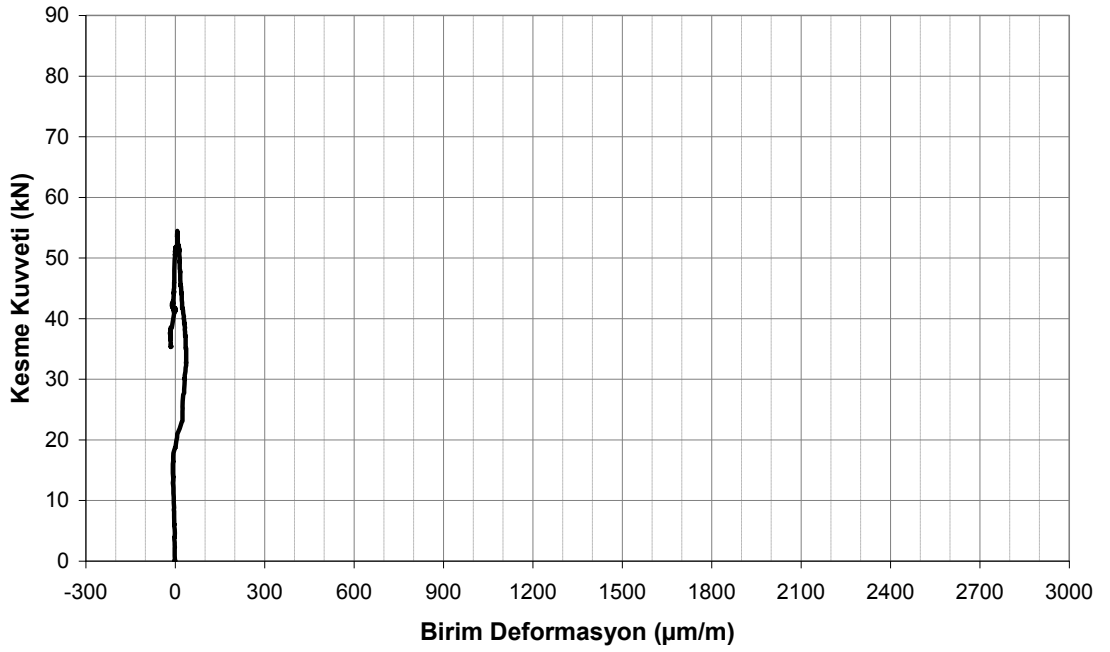
Şekil 4.65: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



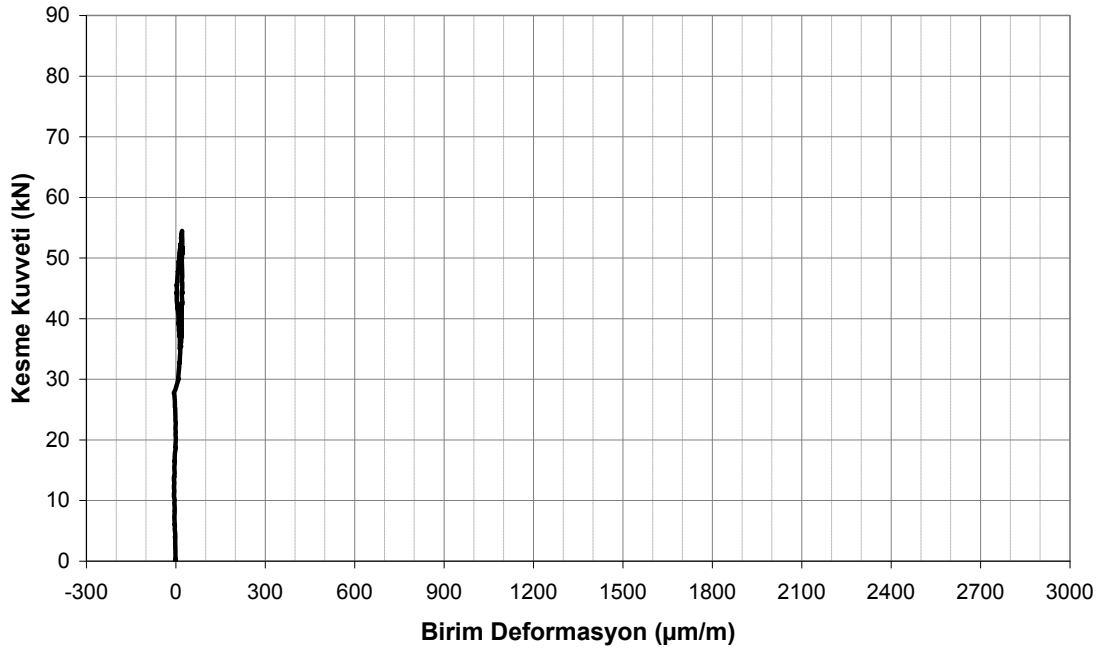
Şekil 4.66: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



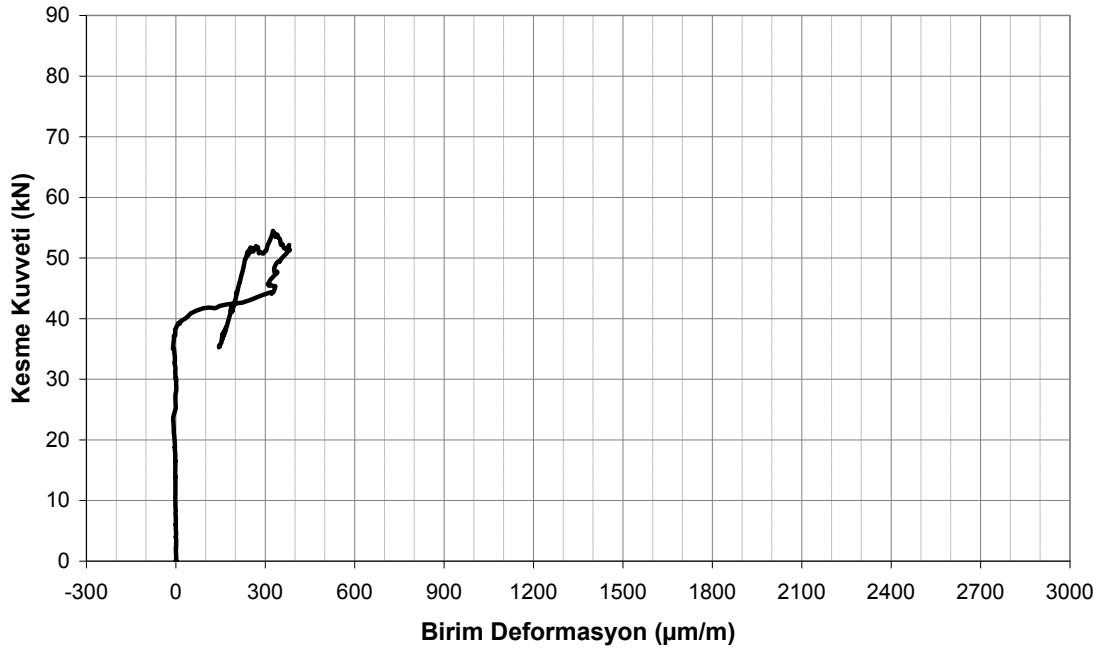
Şekil 4.67: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



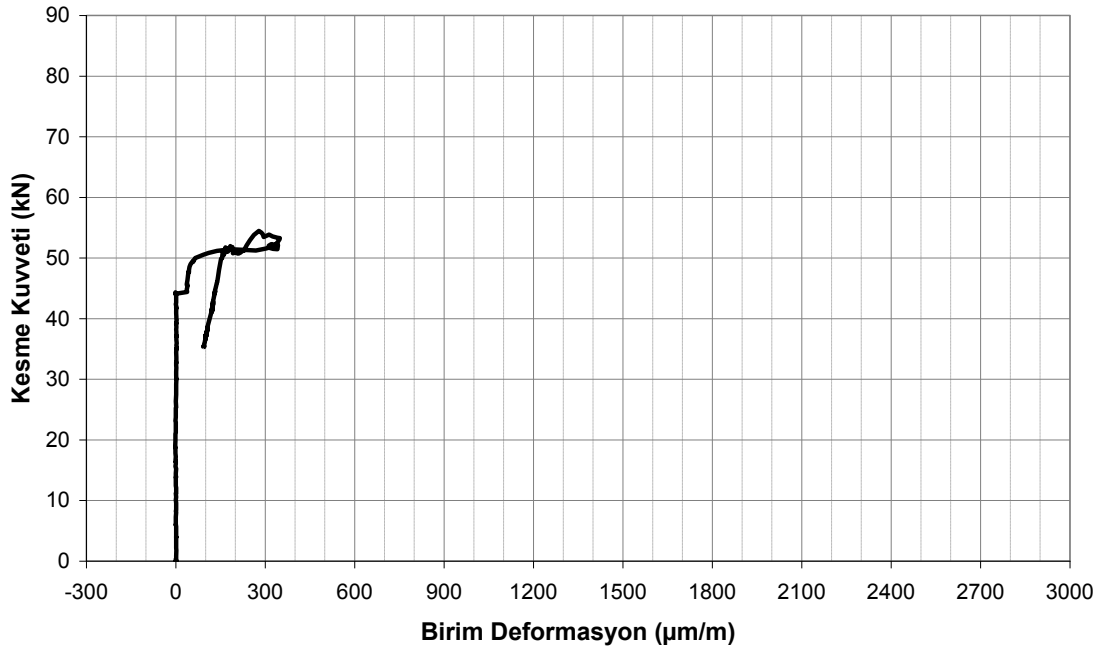
Şekil 4.68: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



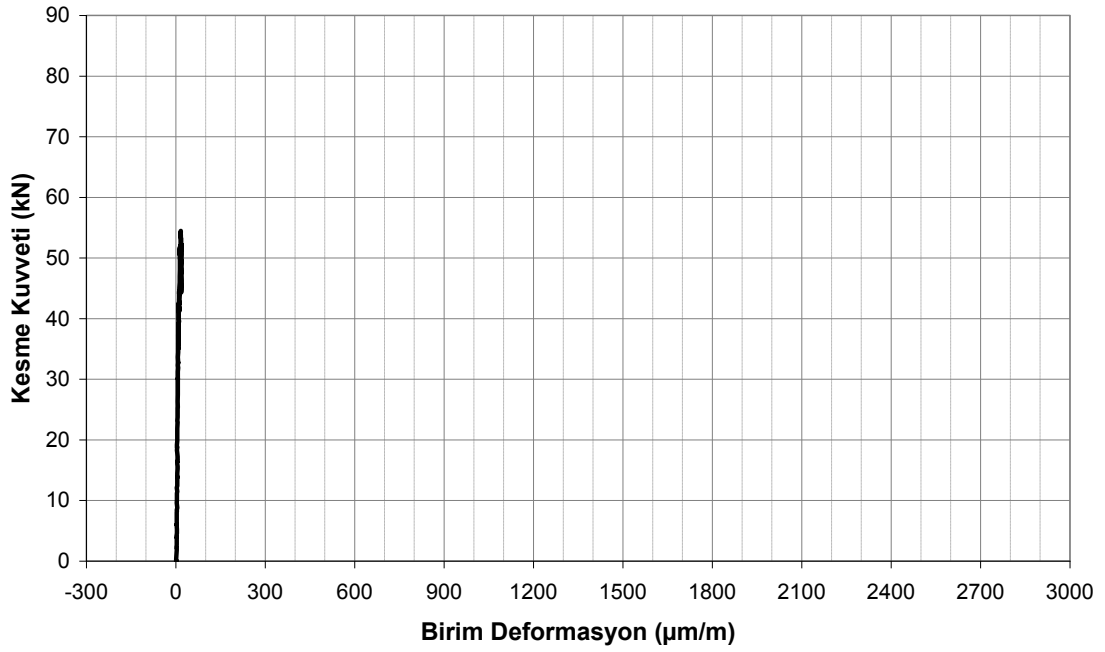
Şekil 4.69: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.70: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.71: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

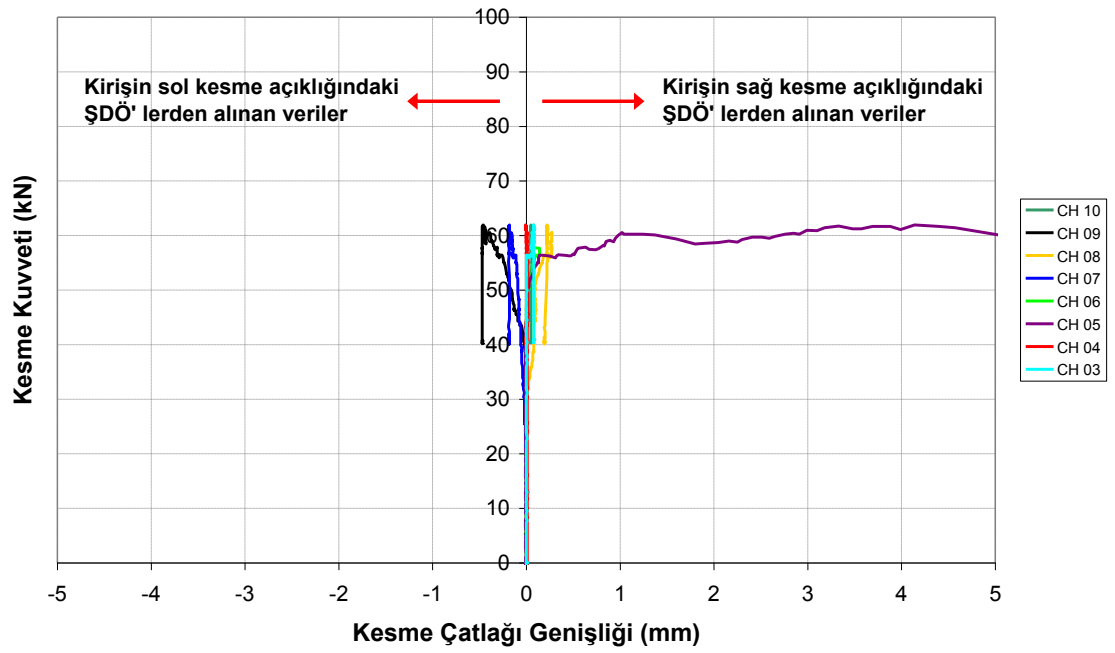


Şekil 4.72: BHU numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

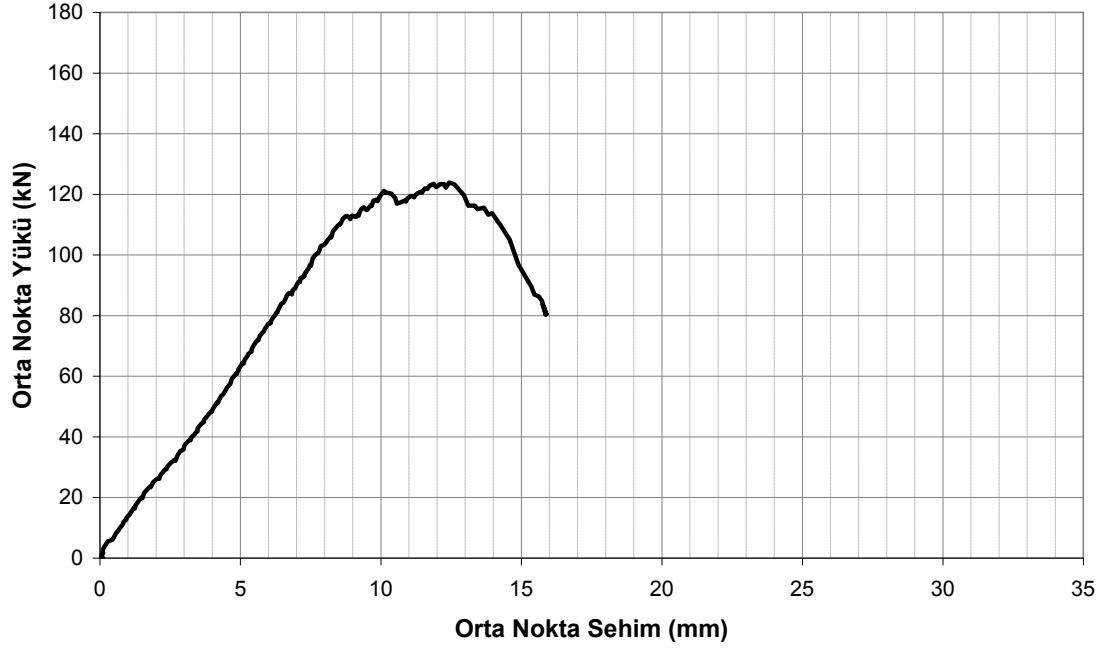
4.2.7. BHA numunesi



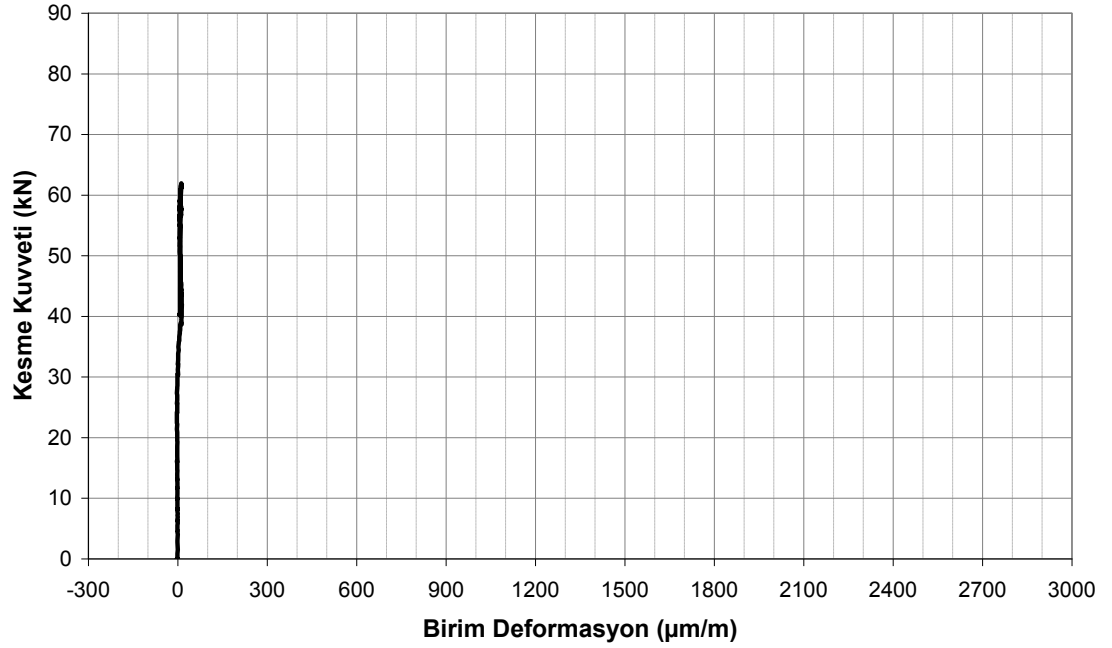
Şekil 4.73: BHA numunesi çatlak dağılımı



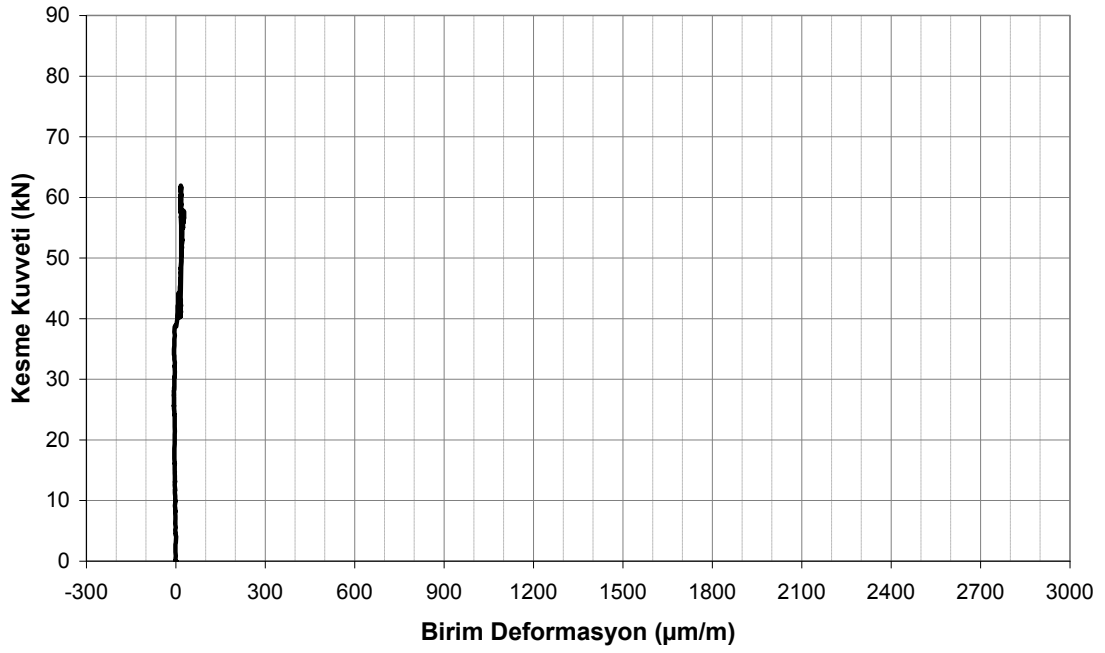
Şekil 4.74: BHA numunesi kesme çatlağı genişliği – kesme kuvveti grafiği



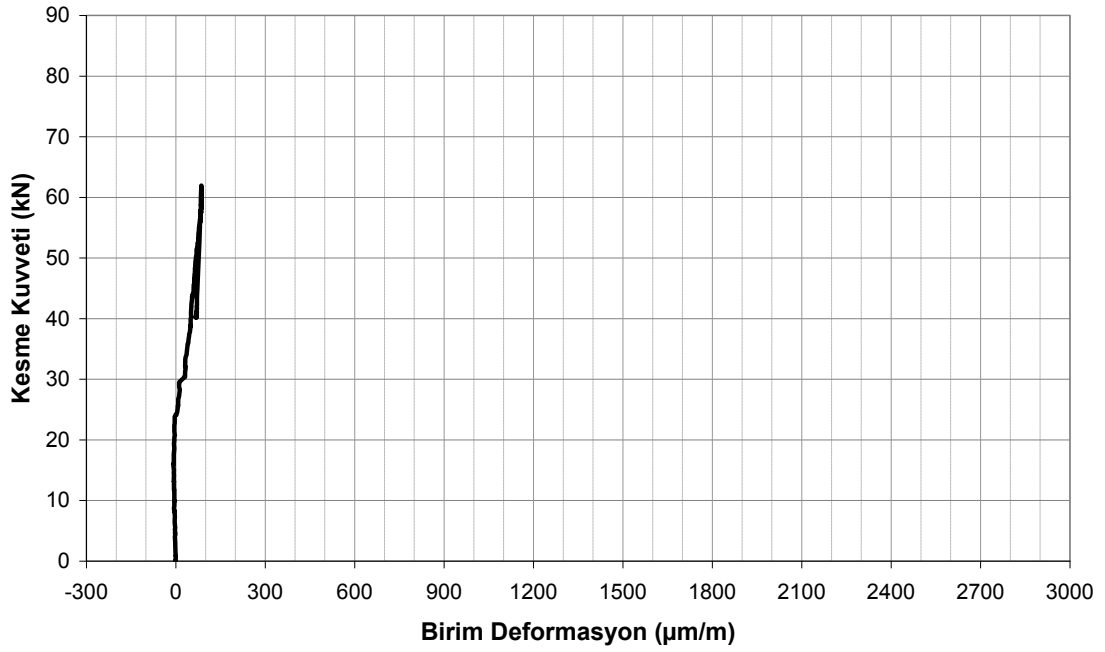
Şekil 4.75: BHA numunesi orta nokta sehim – orta nokta yüğü grafiğı



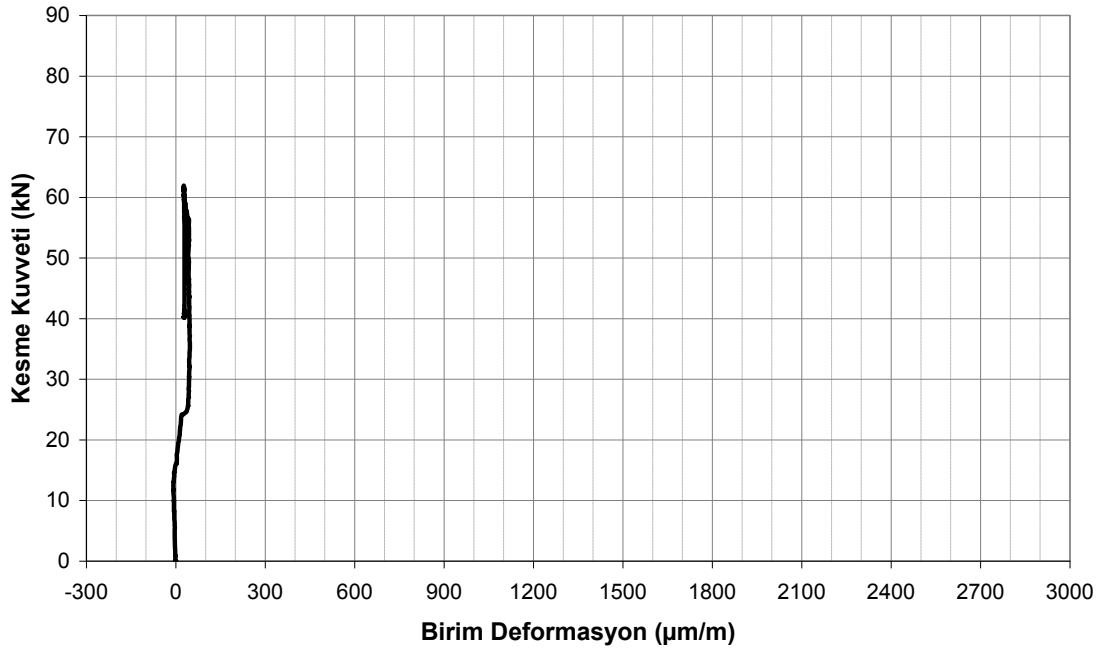
Şekil 4.76: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğı



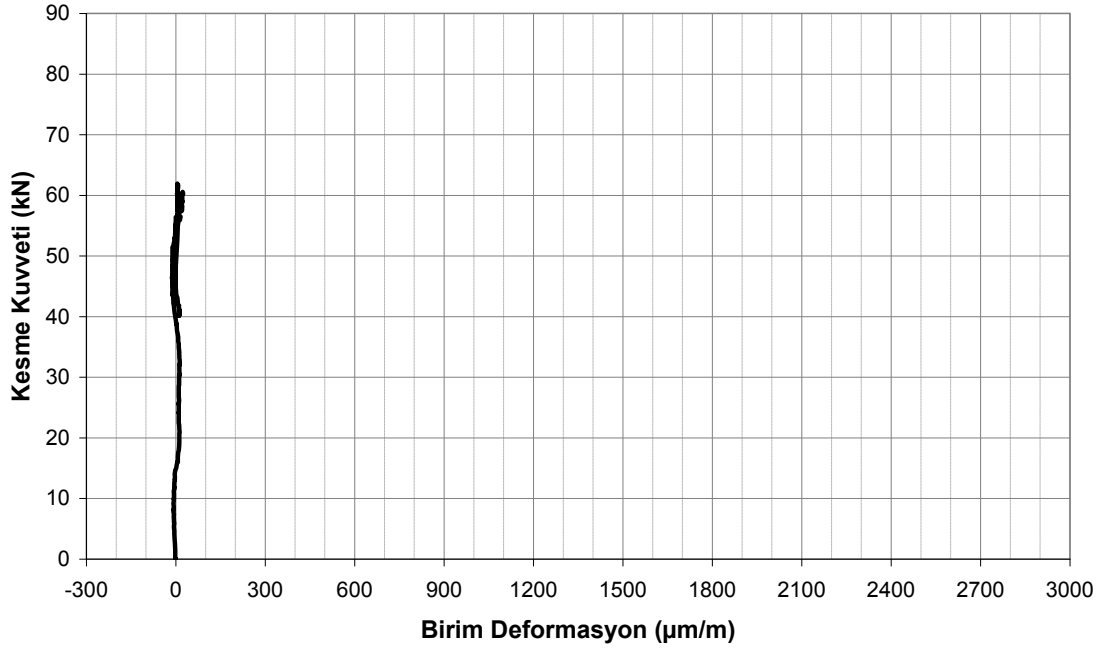
Şekil 4.77: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



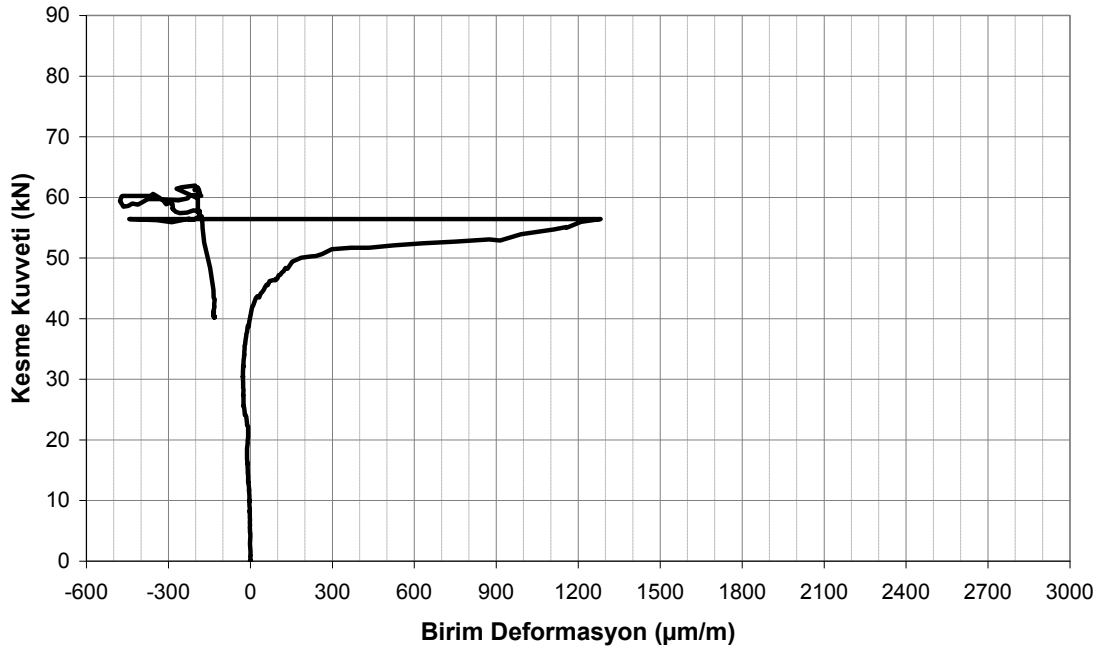
Şekil 4.78: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



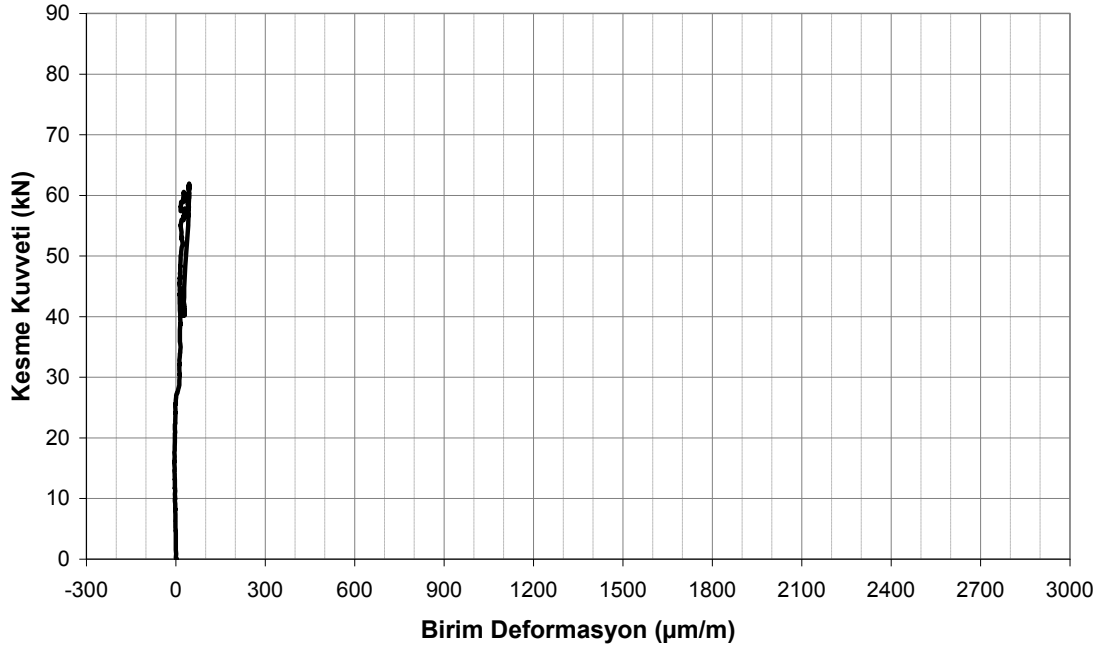
Şekil 4.79: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



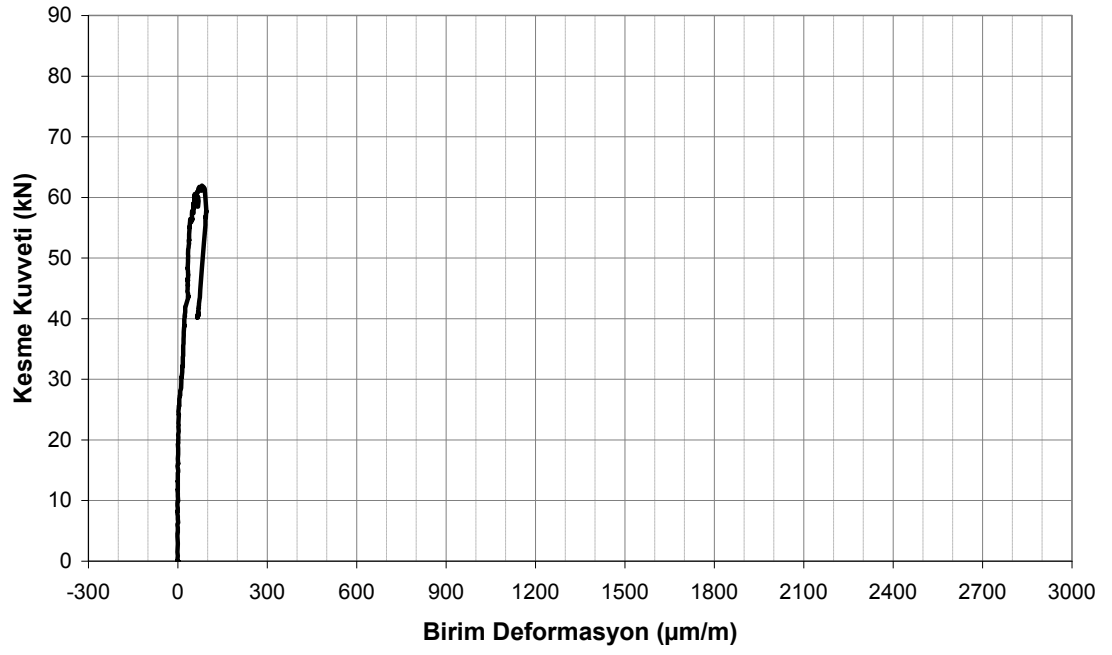
Şekil 4.80: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.81: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.82: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği



Şekil 4.83: BHA numunesinde FRP üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiği

5. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Bölüm 4’ de verilen deney verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Öncelikle numunelerin göçme davranışları değerlendirilmiş, daha sonra da deneylerden elde edilen grafikler yardımıyla güçlendirilmiş numunelerin kesme etkisi altında davranışındaki değişimler irdelenmiştir.

5.1. Numunelerin Göçme Davranışlarının Değerlendirilmesi

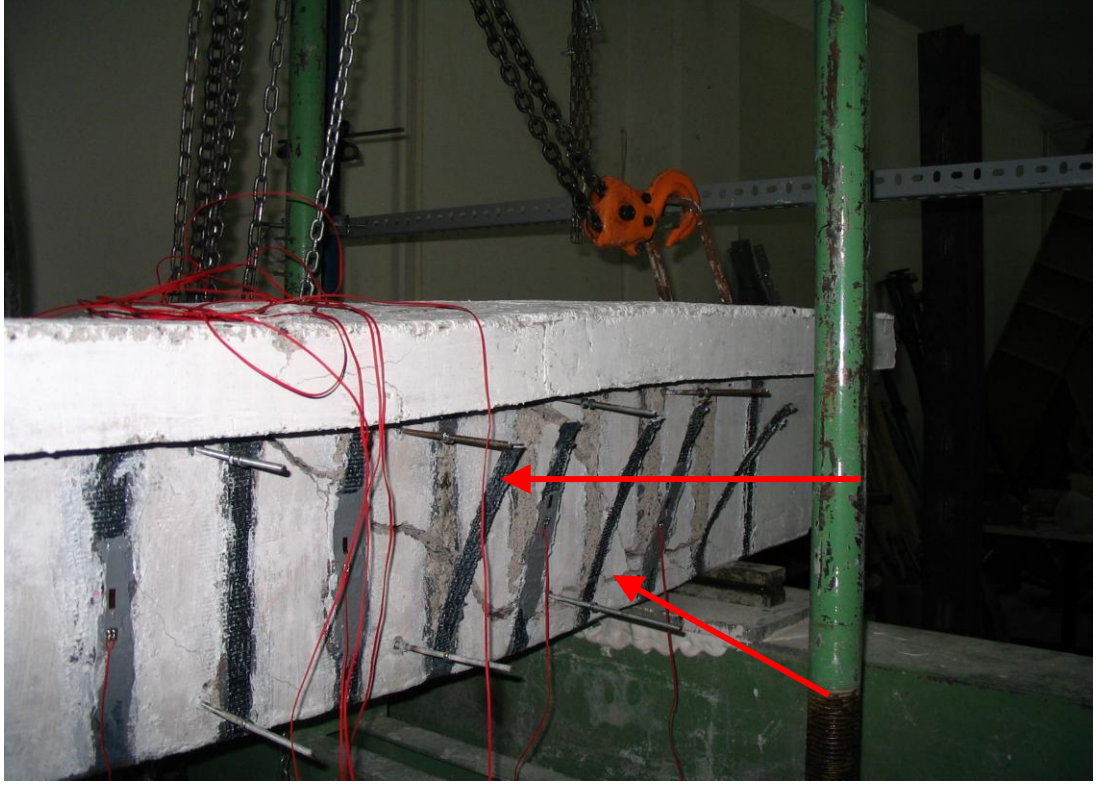
Deneyle yapılmadan önce numunelerin tasarımı esnasında kesme güçlendirmesinin etkisini tam anlamıyla anlayabilmek, sonuçları doğru irdelenebilmek adına tüm numunelerde kesme göçmesinin olması hedeflenmiştir. Donatı hesabı yapılırken kirişleri moment kapasitelerine ulaştıracak yükün, güçlendirme yapıldıktan sonra kesme kapasitesine ulaştıracak yükten daima yüksek olması gerektiğine dikkat edilmiştir.

Deneyle neticesinde test edilen tüm kirişlerde kesme göçmesi gözlenmiştir. Tüm kirişlerde sağ ya da sol kesme açıklığında açılan kesme çatlaklarının dökülmeye sebep olmasından sonra deneyler sonlandırılmıştır. Çekme donatılarının yüksek moment kapasitesi ihtiyacı sebebiyle büyük çapta seçilmesi nedeniyle (Ø28) deneyler esnasında açılan ve göçme mekanizmasının oluştuğu ana kesme çatlakları, çekme donatısı boyunca mesnet bölgesine doğru ilerlemiş ve çok büyük çatlak genişliklerine ulaşmıştır. (Şekil 5.1) Hatta şahit numunede dışarıdan herhangi bir FRP elyaf yapılandırılmadığından kirişin dış yüzeyinde betonu saracak bir sargılama olmaması nedeniyle açılan çatlak neticesinde pas payı olarak nitelendirilen bölge çatlak boyunca dökülmüş ve çekme donatıları ortaya çıkmıştır (Şekil 5.2). Bunun nedeni donatının kaldıraç etkisidir (pim etkisi). Şekil 5.3 de kesiti ve serbest cisim diyagramı gösterilen kesme çatlaklarının oluştuğu bir kiriş uygulanan kesme kuvveti V , üç ayrı iç kuvvetle dengelenmektedir. Bunlardan birincisi Şekil 5.3 ‘ de görülen serbest cisim diyagramında 2 nolu kesitte çatlama basınç bölgesinde taşınan

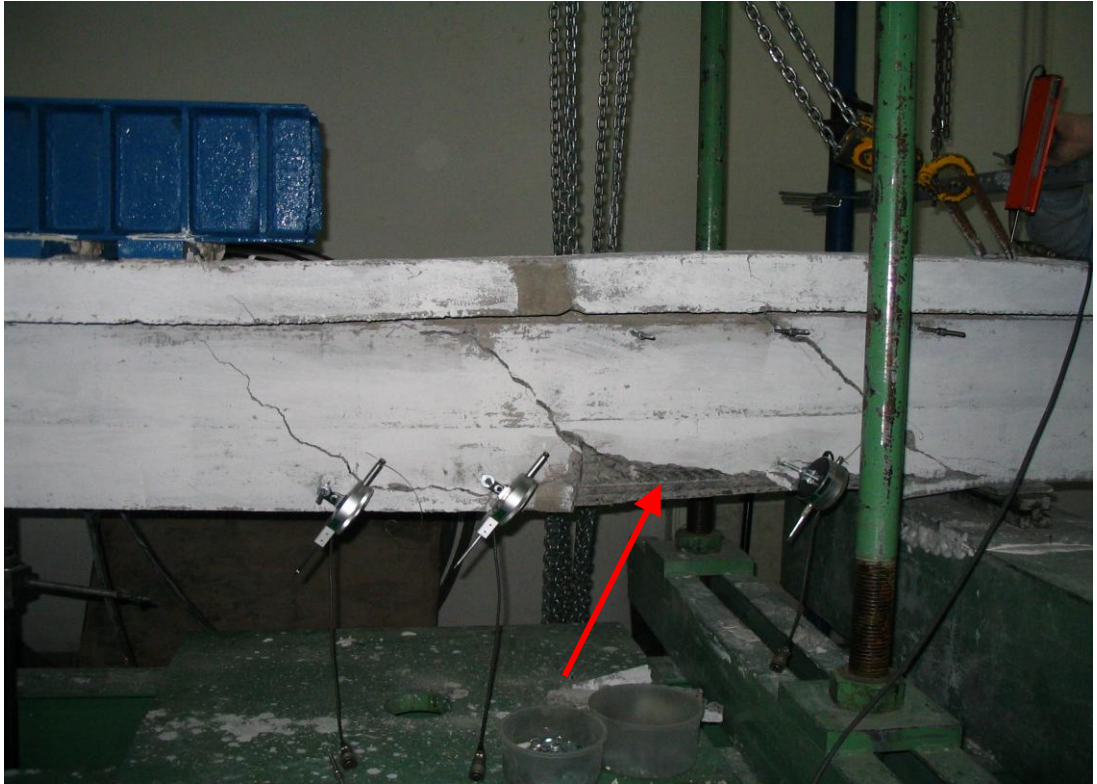
kesme kuvveti V_{cc} , ikincisi çekme donatısınca taşınan kesme kuvveti V_{cd} , üçüncüsü ise çatlak içi kesme gerilmeleri olan q_{ci} dir. Şekil 5.3' de çatlak oluştuktan sonra çatlağın solunda kalan kiriş parçası yük etkisi ile aşağı doğru yer değiştirmeye çalışacak, çekme donatısı ise bunu engelleyecektir. Bu durumda donatı kesmeye zorlanacak ve sağda kalan kiriş parçasını donatı boyunca yırtmaya çalışacaktır. İşte çekme donatısının bu etkisine literatürde kaldıraç etkisi denmektedir. Açılan kesme çatlaklarının yüzleri agregalar nedeniyle pürüzlü olduğundan Şekil 5.3' de gösterildiği gibi iki çatlak yüzünün görelî yer değiştirmesi, çatlak içinde oluşan kesme gerilmelerince frenlenmeye çalışılmaktadır. q_{ci} olarak adlandırılan bu kesme gerilmelerinin toplamının düşey bileşkesi V_{ci} , uygulanan kesme kuvvetinin karşılanmasına katkıda bulunacaktır. Yani yukarıda yazılanları kısaca özetleyecek olursak, kesme çatlağının oluştuğu kirişteki düşey kuvvetler dengesi Denklem 5.1' deki gibi sağlanacaktır.

$$V = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} \quad (5.1)$$

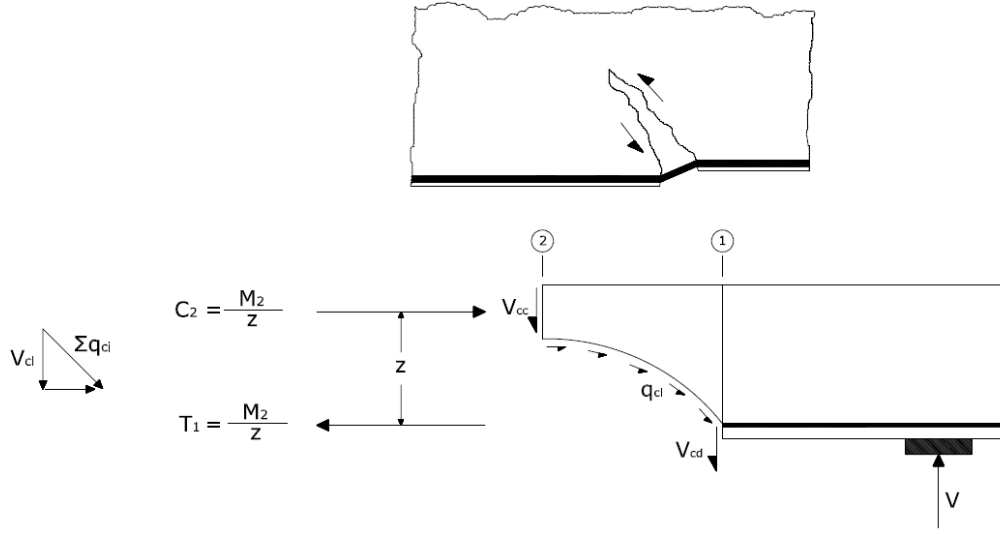
Çatlak oluştuğunda V_{cc} , V_{cd} , V_{ci} ' den oluşan iç kuvvetlerin toplamı, uygulanan V kesme kuvvetinden büyükse, kiriş yük taşımaya devam edecektir. Tersî durumda kesme çatlağının oluşması ile denge sağlanamadığından, kiriş aniden kırılacaktır. Bu kırılma durumu $3 < a/d < 7$ durumundaki göçme türü olup deney numunelerimizin a/d oranının 3.8 olmasından dolayı deneylerde bu göçme türü oluşmuştur. Kaldıraç etkisinde en önemli etkenin çekme donatısında oluşan gerilme olduğu belirtilmişti. Bu gerilmelerde ani artış olmasının nedeni, çekme donatısı kesme çatlağı oluşmadan önce mesnete yakın bölgelerdeki momenti taşımaktadır. (Şekil 5.2 deki serbest cisim diyagramında 1 nolu en kesitteki gibi.) Ancak çatlak açıldıktan sonra yükün uygulandığı noktaya doğru ilerlemekte olan çatlak ucundaki moment zorunu taşımaya başlayacaktır. Bununla birlikte çatlağın açılmasıyla birlikte kiriş faydalı derinliğinde de ani azalma, moment kolunda da ani artış olacaktır. Bu nedenle artan moment zorunu karşılayacak moment kapasitesinde azalmanın olmaması için kiriş kesitlerinin de daralmasıyla birlikte çekme donatısında ani gerilme artışı gözlenecektir. Bu da çekme donatısının kaldıraç etkisini hızla aktifleştirecektir.



Şekil 5.1: BCU numunesinde oluşan ana kesme çatlağı ve kaldıraç etkisi



Şekil 5.2: BV numunesinde kaldıraç etkisinde oluşan çatlak

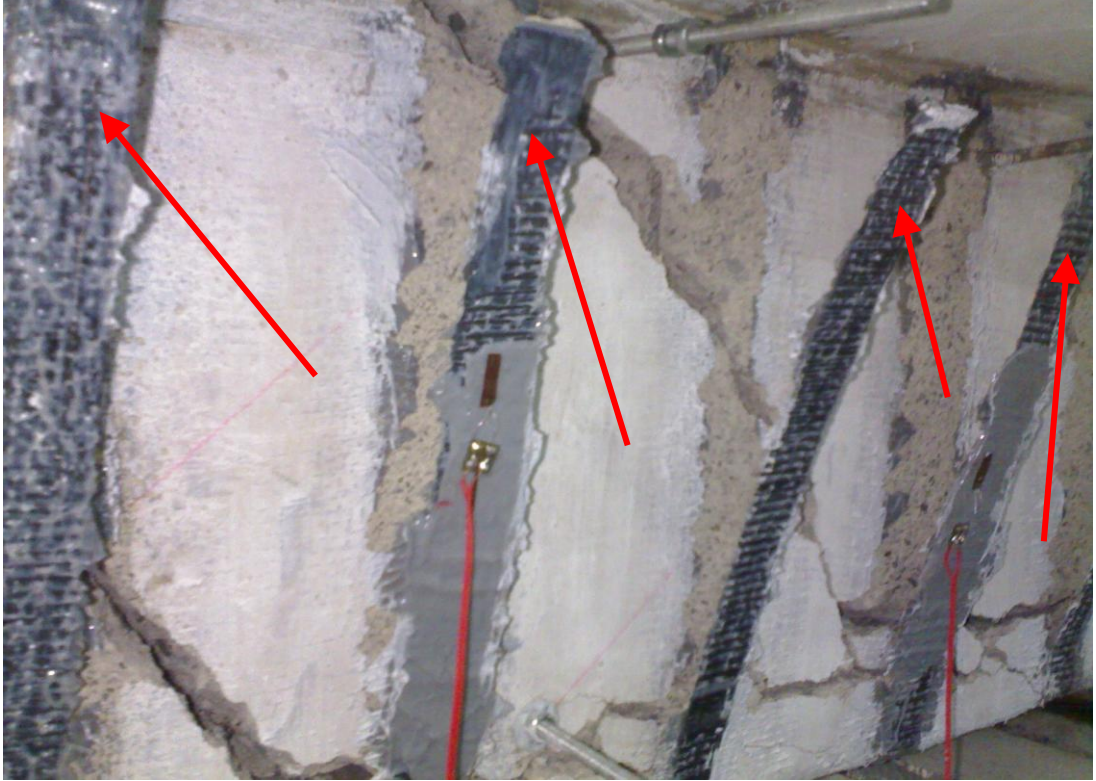


Şekil 5.3: Kaldıraç etkisinde çatlama kesit ve bu kesitin serbest cisim diyagramı

Deneylerde ilk olarak test edilen BV adlı şahit numunesinde ilk çatlak 28 kN' da açılmıştır. Daha sonra sırasıyla BCU numunesinde 35 kN' da, BCA numunesinde 40 kN' da, BGU numunesinde 35 kN' da, BGA numunesinde 42 kN' da, BHU numunesinde 35 kN' da, BHA numunesinde ise 35 kN' da ilk çatlağın açıldığı gözlenmiştir. Bu da bize FRP elyaf ile kesme güçlendirmesi uygulamasının kirişlerde betonun ilk çatlama dayanımına olumlu yönde bir katkısı olduğunu göstermektedir. Ancak bu etki güçlendirmenin uygulama yöntemiyle ve kullanılan FRP elyaf ve epoksi cinslerinin malzemesel özellikleriyle de değişkenlik göstermektedir. Yapılan deneyler neticesinde FRP elyafların kiriş döşemesine alttan ankraj çivisi ile bağlanmadığı numunelerin tamamında aynı yük altında ilk çatlağın açıldığı gözlenmiştir. Bu demek oluyor ki döşeme içerisine ankraj yapılmadan yapılan güçlendirmelerde yapıştırılan FRP şeritler, sargılamanın tam anlamıyla olmaması nedeniyle üzerlerinde taşıdıkları gerilmeleri tam olarak kirişe aktaramamaktadır.

FRP şeritlerin döşemeye ankraj yapılmadan U şeklinde yapıştırıldığı BCU, BGU, BHU numunelerinde deneyler neticesinde beton yüzeyden sıyrılan FRP şeritin kiriş yüzünden dışarı doğru ayrıldığı gözlenmiştir (literatürde peeling-off olarak adlandırılmaktadır). Bunun nedeni yukarıdaki sebeplerle benzer şekilde sargılamanın tam anlamıyla sağlanamaması nedeniyle FRP şeritlerin taşınması gereken gerilmenin

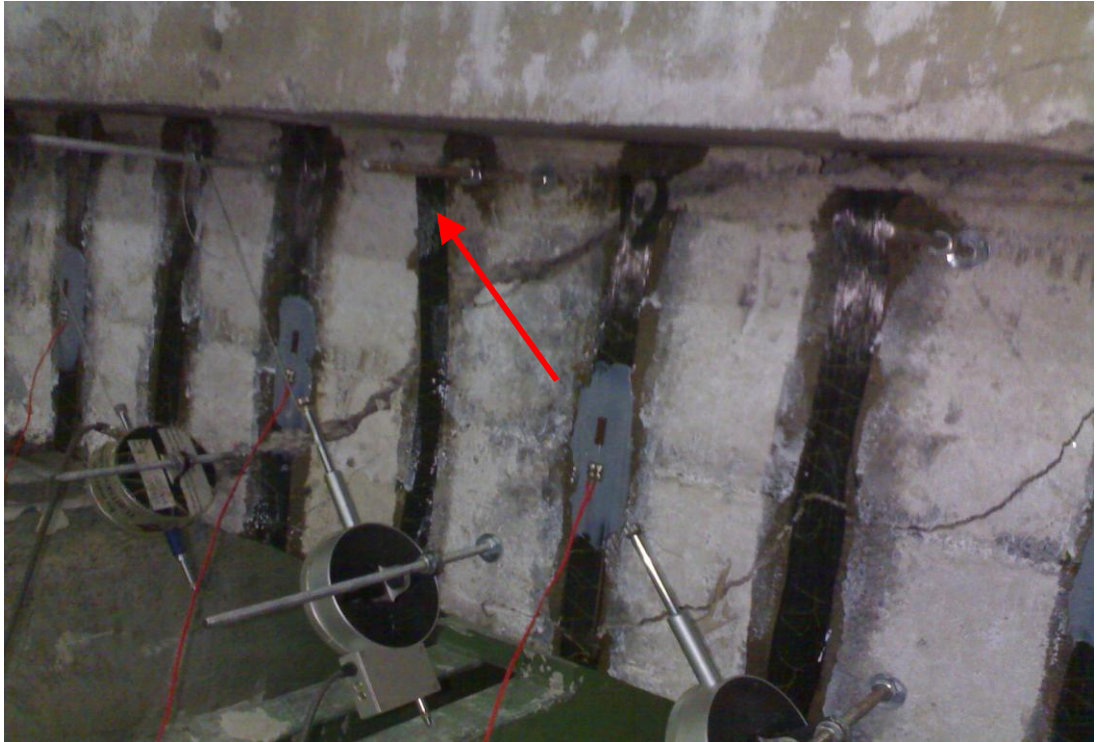
daha altında bir kesme zoruna maruz olmasına rağmen, epoksinin yapışkanlığını yitirmesinden dolayı FRP şeritlerden kirişin beton yüzeyine gerilme aktarımının sağlıklı bir şekilde yapılamamasıdır. FRP şeritler taşınması gereken gerilmeden daha az bir gerilmeyi taşıdığı için açılan kesme çatlakları hızlı bir şekilde açılmış, açılan çatlakların genişliği kadar epoksinin de deformasyon yapması ve çatlak uçlarında gerilme artışlarından dolayı aderans bozulmaya başlamıştır.



Şekil 5.4: BCU numunesinde CFRP şeritlerin uçlarından beton yüzeyden ayrılması (peeling off)



Şekil 5.5: BGU numunesinde GFRP şeritlerin uçlarından beton yüzeyden ayrılması (curling) ve ana çatlak üzerindeki GFRP şeridin kopması



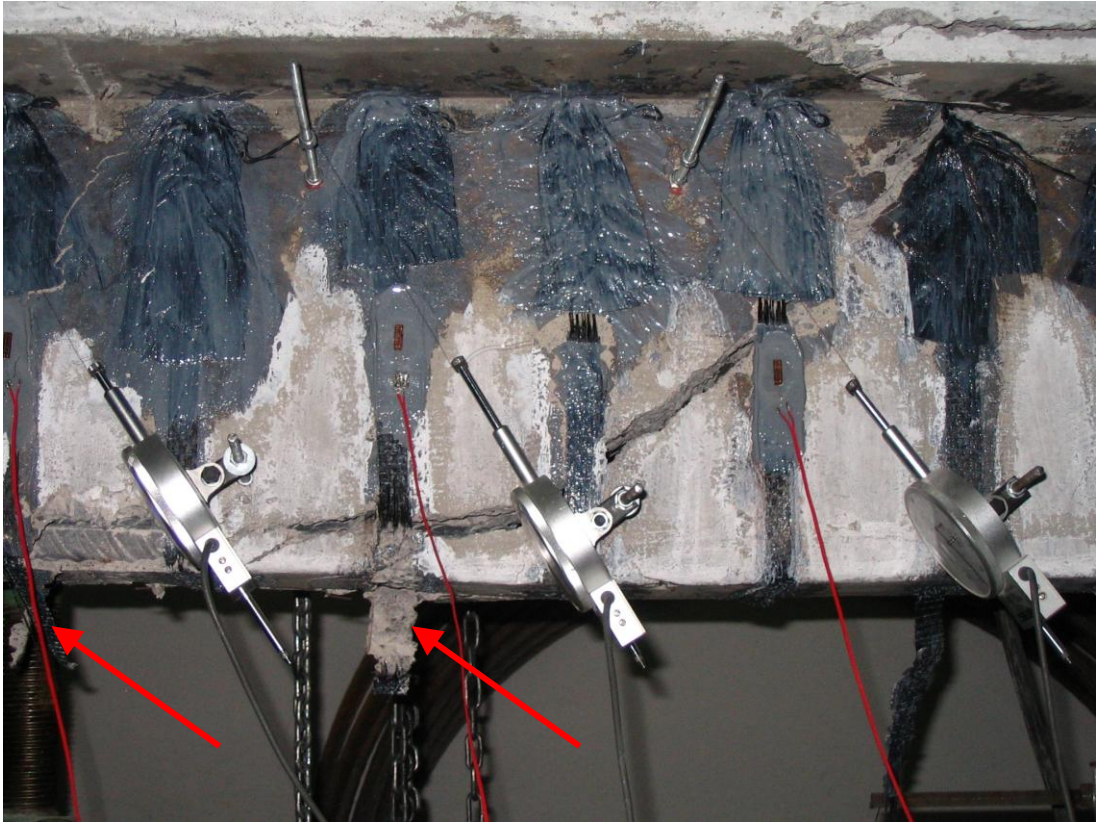
Şekil 5.6: BHU numunesinde Hi-CFRP şeridin beton yüzeyden ayrılması (curling)



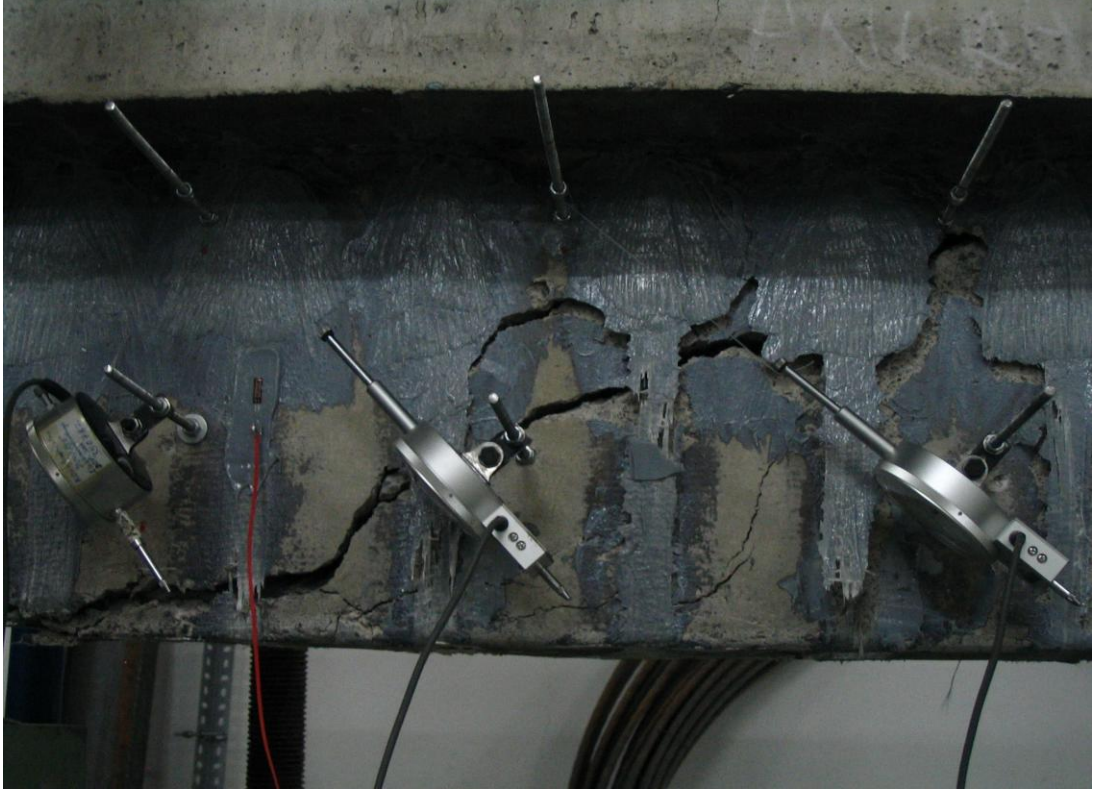
Şekil 5.7: BHU numunesinde Hi-CFRP elyafın kopması

Hi-CFRP elyafla güçlendirilen BHU ve BHA numunelerin her ikisinde de şeritlerde çekmeden dolayı kopmalar meydana gelmiştir. Şeritlerde kopma görülmesinde kullanılan epoksi cinsi ve Hi-CFRP elyafın gevrekliği etkili olmuştur. Hi-CFRP liflerin kirişlere yapıştırılmasında kullanılan Sikadur 300 epoksi yapıştırıcısının çok yüksek çekme dayanımı ve betona iyi yapışması sebebiyle, betonda açılan kesme çatlaklarını kesen Hi-CFRP lifler çatlak ağzının sol ve sağ taraflarında betondan ayrılmamış ve serbest (yapışmamış) boylarını uzatamamışlardır. Bu durumda çok kısa bir uzunlukta çatlağın açılmaya devam etmesi Hi-CFRP liflerde ani ve çok yüksek birim deformasyonların oluşmasına sebep olmuştur. Kopma uzaması çok düşük olan bu lif tipi için bahis konusu birim deformasyon artışı kopma türü göçmenin gözlenmesine neden olmuştur. Ayrıca Hi-CFRP elyafın çok gevrek yapısı nedeniyle kesme güçlendirmesi uygulaması için U şeklinde form verilirken bile çok zorluklarla karşılaşılmış, birçok şeridin uygulama öncesi her ne kadar kiriş köşeleri $d = 2$ cm çapında pahlanmış olsalar da yapıştırma esnasında liflerinin kopması neticesinde yapıştırılmadan atılmıştır. Bununla birlikte Hi-CFRP elyafları kiriş yüzeylerine yapıştırmada kullanılan Sikadur 300 epoksi yapıştırıcısının sıvı halde

olması nedeniyle BHA numunesinde ankraj çivilerinin döşeme altından ekilmesi esnasında kullanılamamıştır. Ankraj çivilerinin döşeme içine ekilmesi esnasında CFRP ve GFRP liflerden oluşan ankraj çivilerinin ekilmesinde kullanılan Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. BHA numunesinde ayrıca U formu şeritler gibi ankraj çivilerinin oluşturulmasında büyük sıkıntılarla karşılaşılmış birçok ankraj çivisindeki liflerde büküm esnasında kopmalar oluşması nedeniyle kullanılamaz hale gelmiştir.



Şekil 5.8: BCA numunesinde CFRP şeritlerin kopması



Şekil 5.9: BGA numunesinde GFRP şeritlerin ve ankraj çivilerinin kopması



Şekil 5.10: BHA numunesinde Hi-CFRP şeritlerin kopması



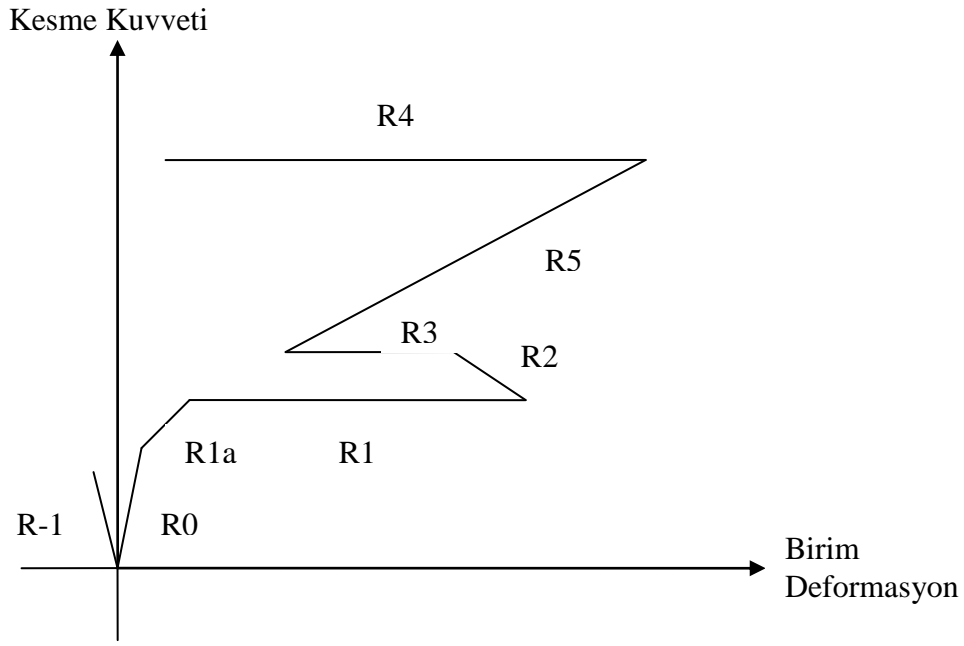
Şekil 5.11: BHA numunesinde ankraj çivilerinin kopması

5.2. Deneylelerden Elde Edilen Grafiklerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Bölüm 4.2' de elde edilmiş olan grafiklerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

5.2.1. Numunelerin kesme kuvveti – birim deformasyon grafiklerinin incelenmesi

Bölüm 4.2' de verilen tüm deney numunelerinde kesme göçmesinin gerçekleştiği ana çatlakın bulunduğu kesme açıklığındaki birim deformasyon ölçerlerden alınan verilerle oluşturulan kesme kuvveti – birim deformasyon grafikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Grafiklerde eğriler Şekil 5.12' deki gibi bölgelere ayrılmış ve bu bölgelerdeki davranış modelleri Tablo 5.1' de verilmiştir.

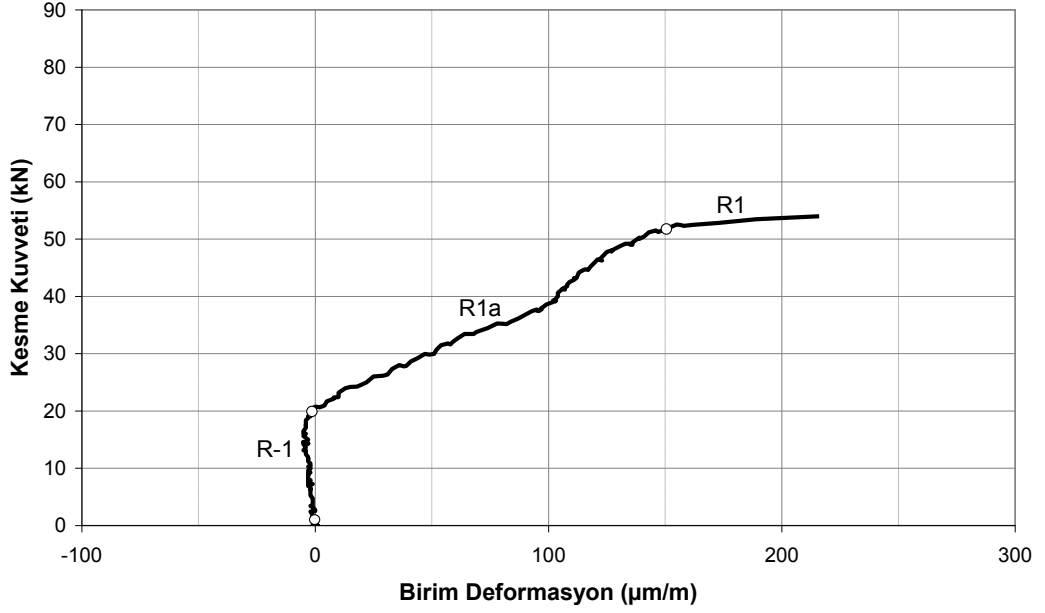


Şekil 5.12: Temsili kesme kuvveti - birim deformasyon grafiği

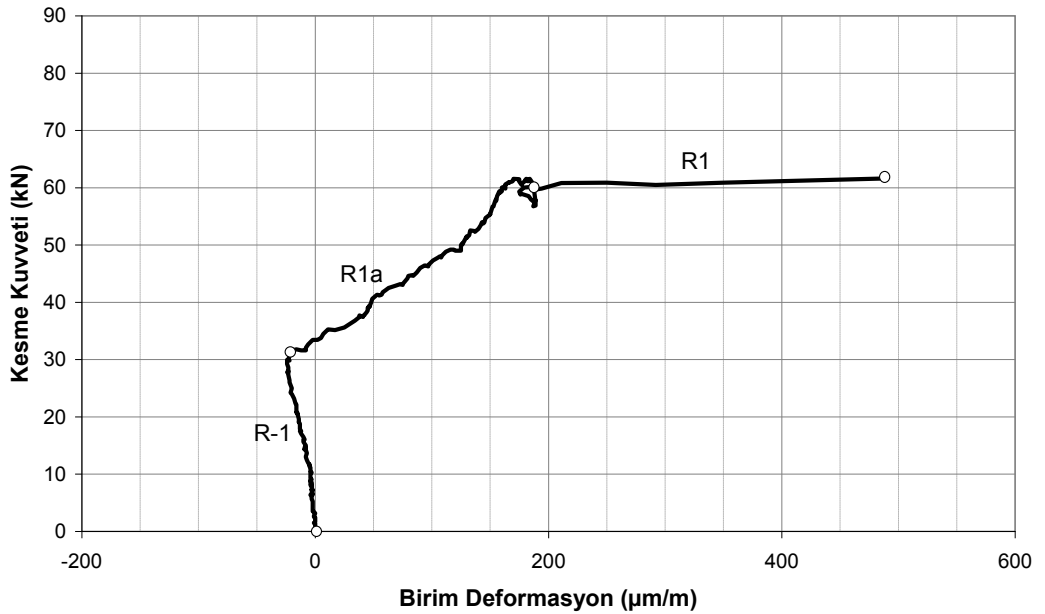
Tablo 5.1: Kesme Kuvveti – Birim Deformasyon Grafiklerinde Adlandırılan Bölgelerin Açıklamaları

BÖLGE ADI	AÇIKLAMASI
R-1	BDÖ, mesnetle yükün uygulandığı nokta arasında oluşan basınç çubuğu bölgesi içinde bulunuyor ve bu bölgede oluşan basınç gerilmesinin düşey bileşenini okuyor. Bu nedenle birim deformasyon azalıyor. Beton yüzeyle FRP elyaf birbirine tam yapışık ve gerilme aktarımı mevcut.
R0	Beton yüzeyle FRP elyaf birbirine tam yapışık ve çekme yönlü gerilme aktarımı mevcut.
R1	Çatlak açılıyor veya çatlak genişliğinde ani artış var.
R1a	Çatlak yavaş yavaş açılıyor.
R2	FRP elyaf beton yüzeyden yavaş yavaş ayrılıyor ve yapışma bozuluyor. (Gradual Debonding)
R3	Ani olarak FRP elyaf beton yüzeyden ayrıldı. (Sudden Debonding)
R4	Beton yüzeyden sıyrılan ankrajlanmamış veya kopma noktasının sonrasındaki FRP şerit giriş yüzünden dışarı doğru ayrıldı. (Peeling off)
R5	Yüzeyden sıyrılmaya kısmen mevcut ancak hala gerilme aktarabiliyor.

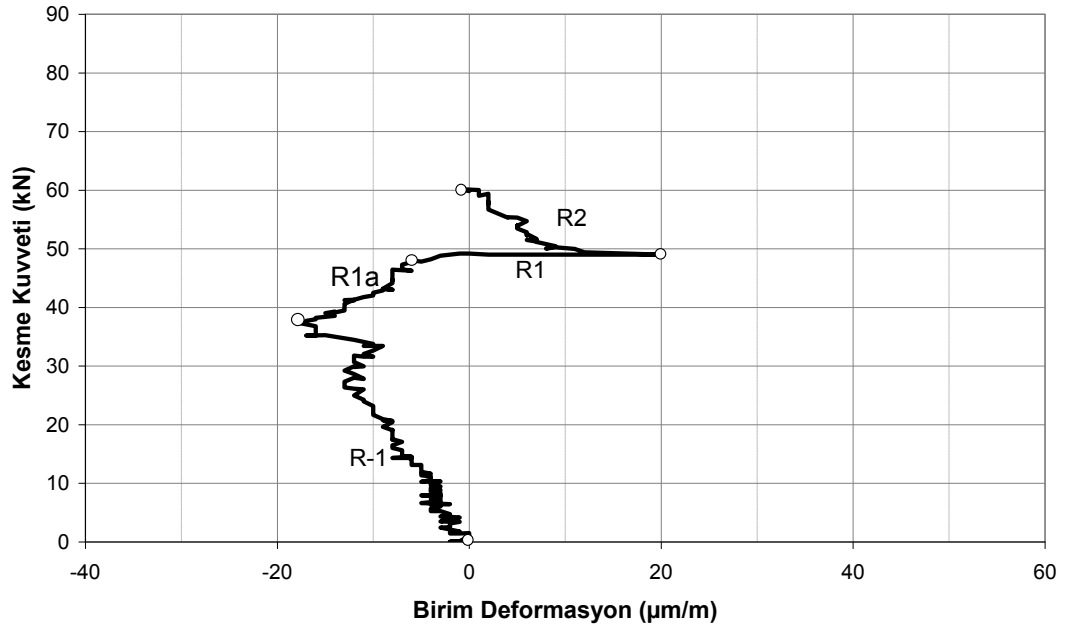
5.2.1.1 BCU numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



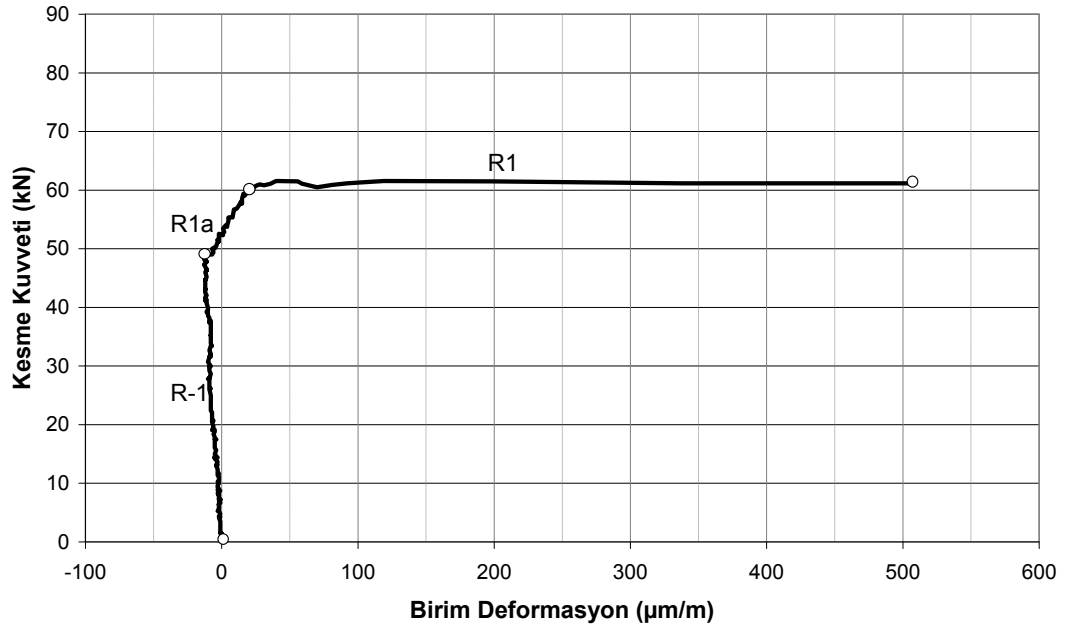
Şekil 5.13: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi



Şekil 5.14: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

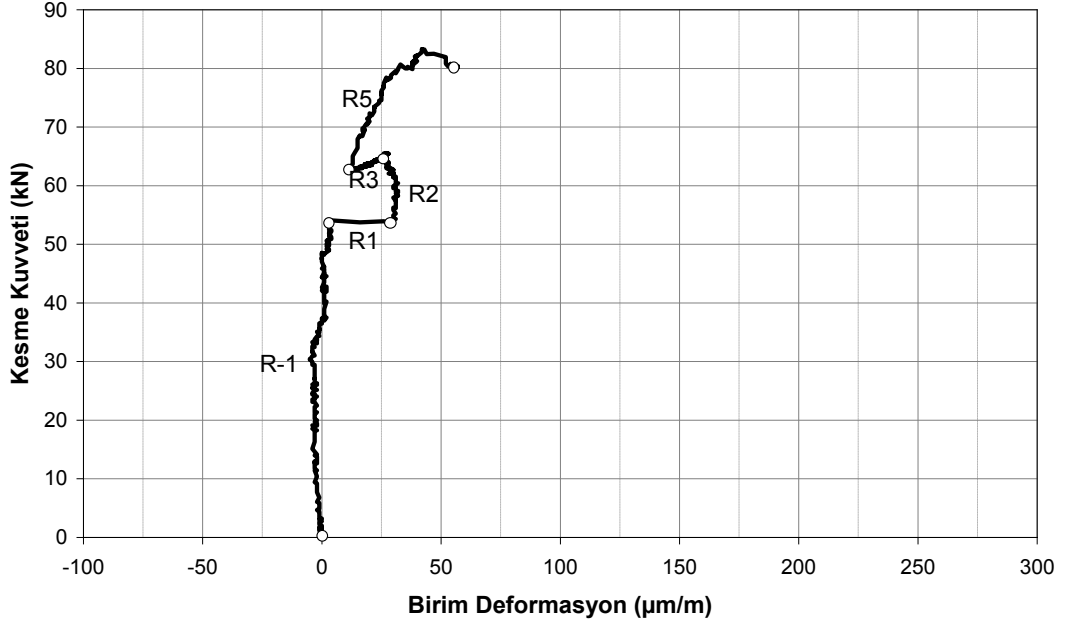


Şekil 5.15: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

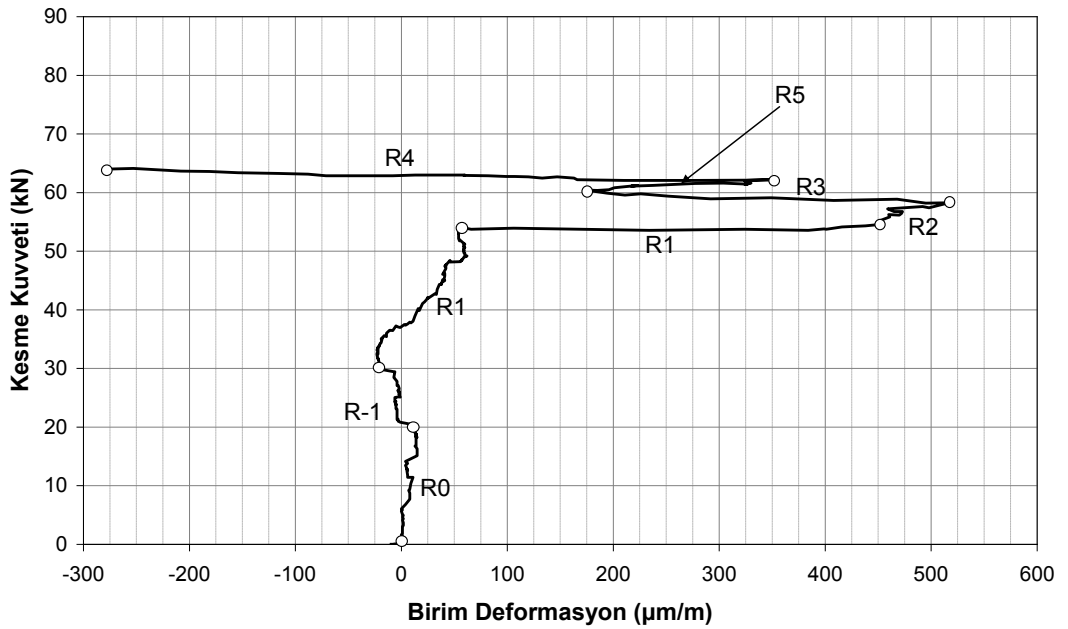


Şekil 5.16: BCU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

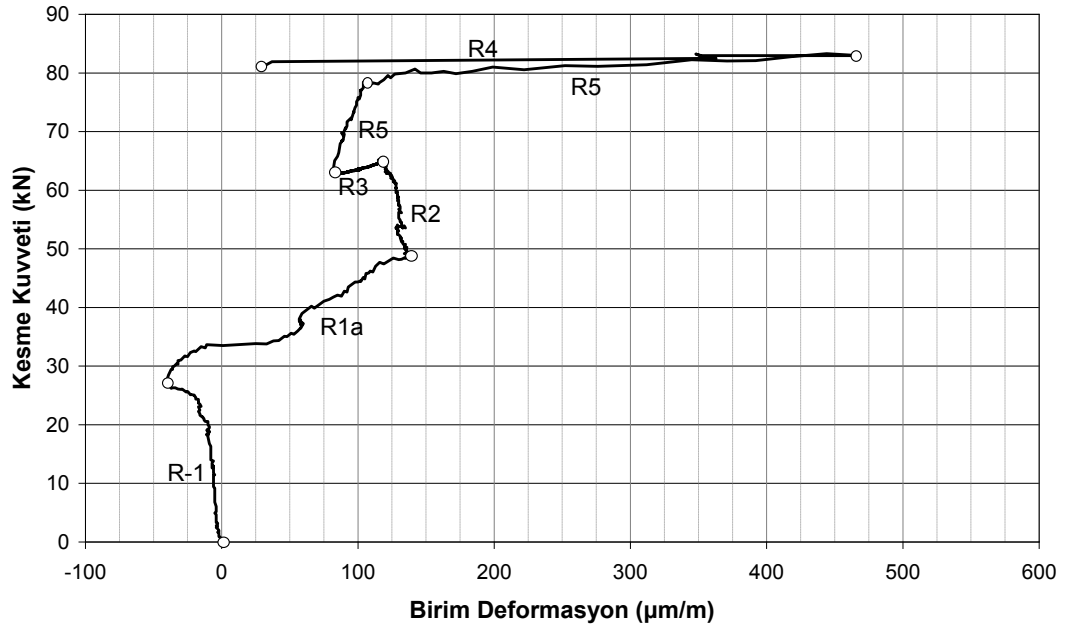
5.2.1.2 BCA numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



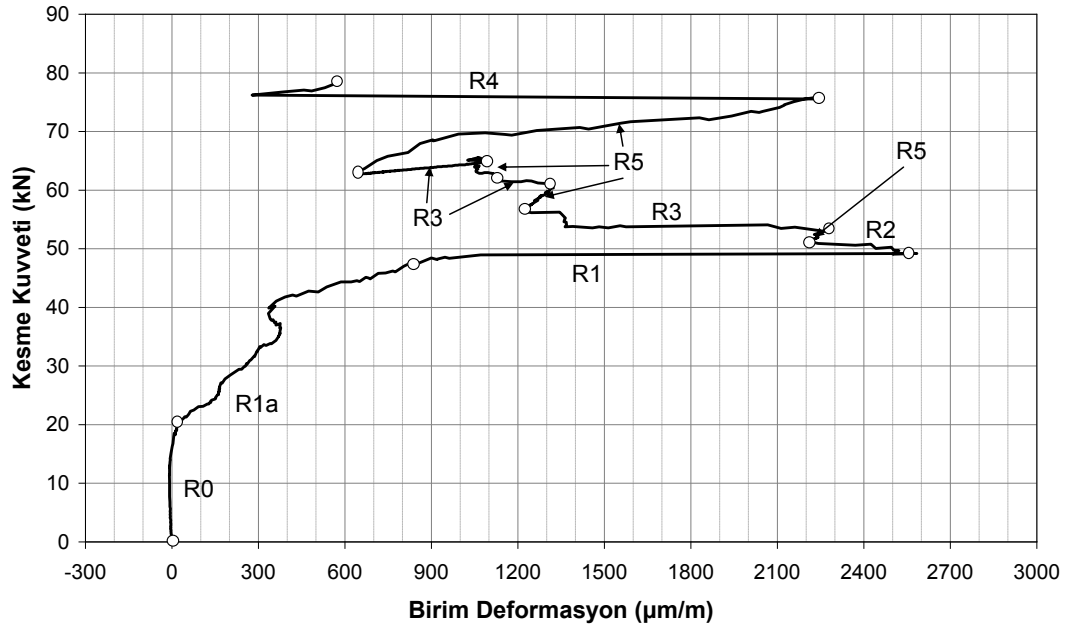
Şekil 5.17: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.18: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

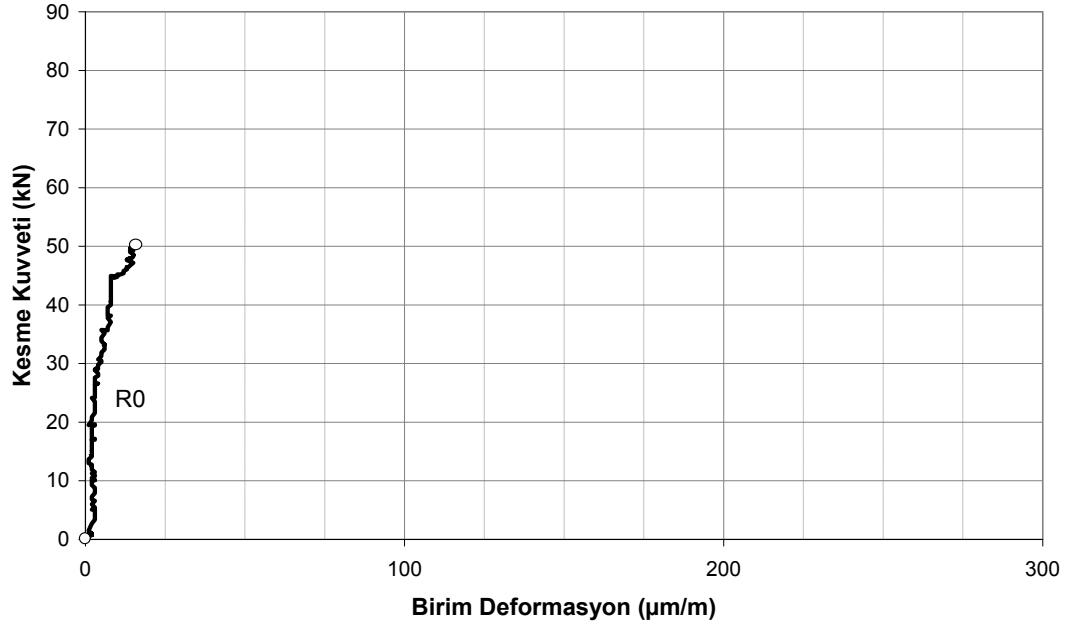


Şekil 5.19: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

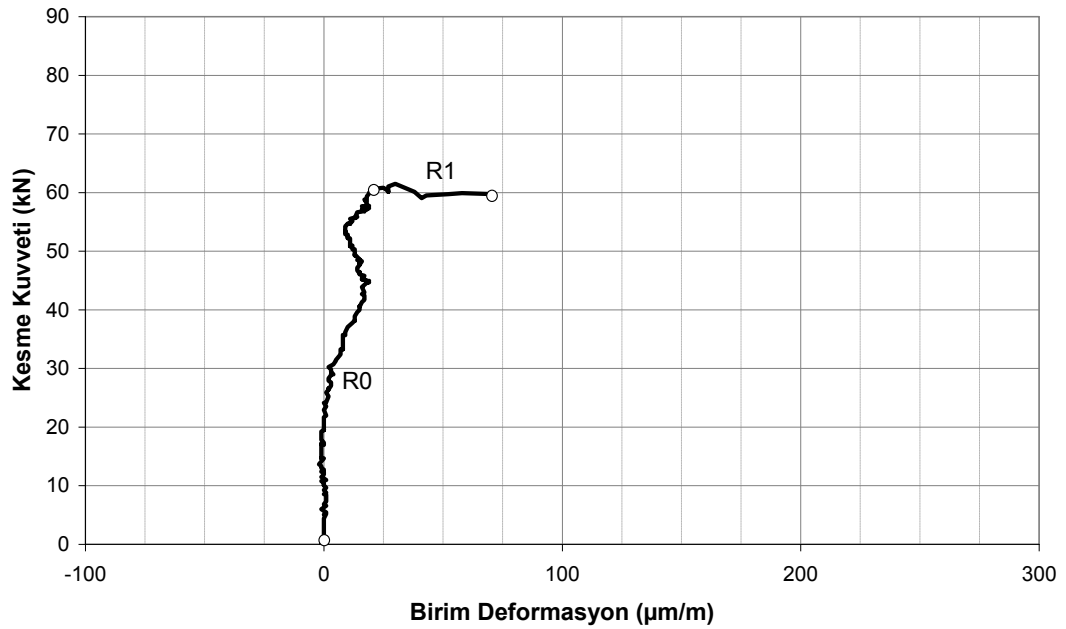


Şekil 5.20: BCA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

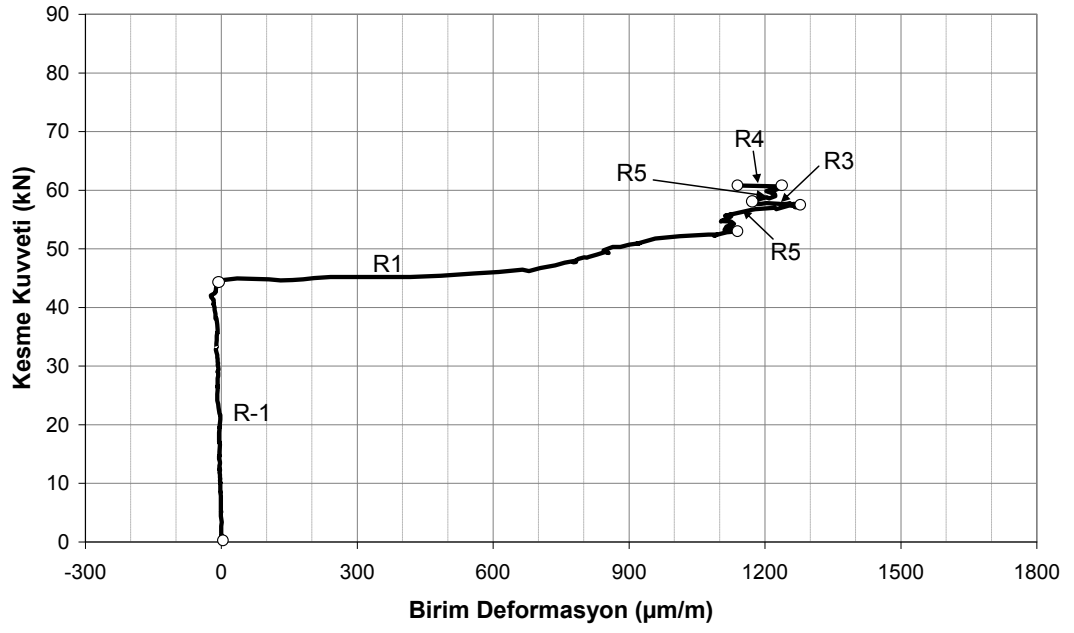
5.2.1.3 BGU numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



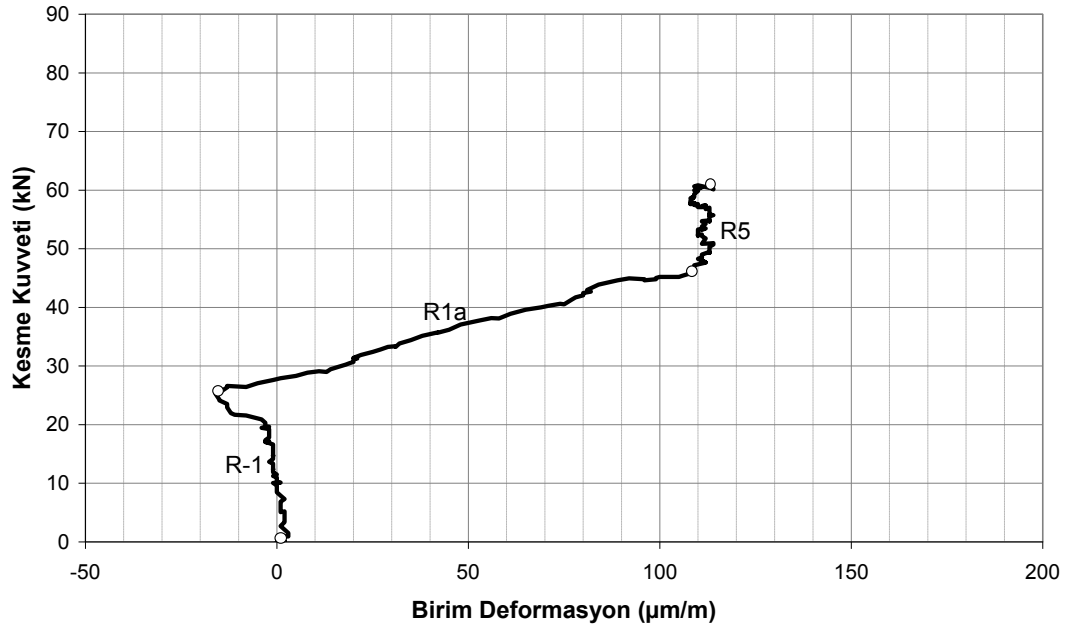
Şekil 5.21: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.22: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

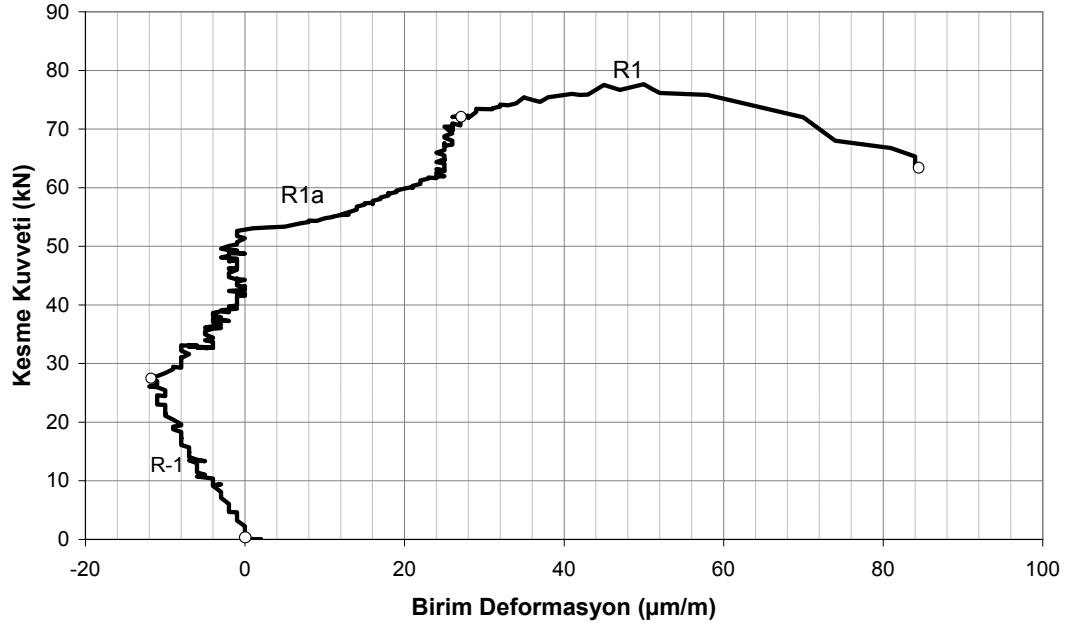


Şekil 5.23: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

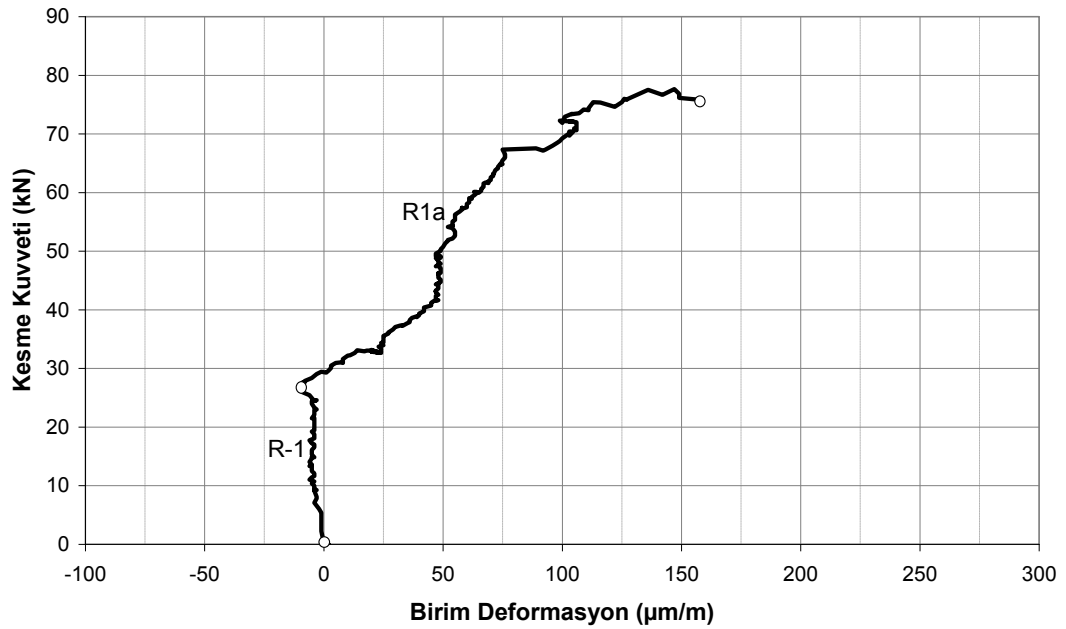


Şekil 5.24: BGU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

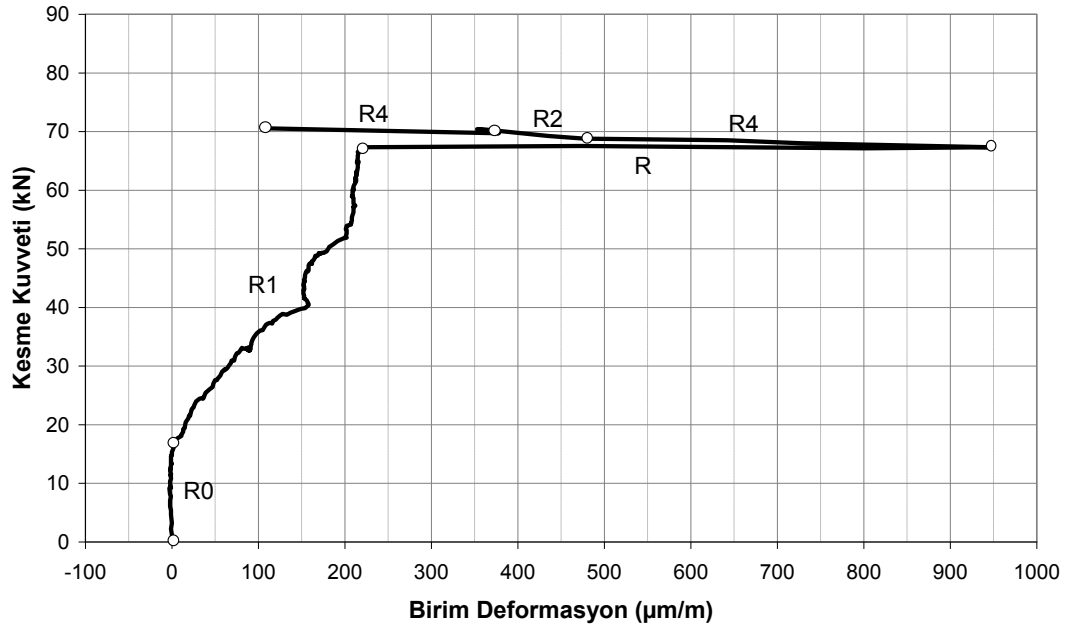
5.2.1.4 BGA numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



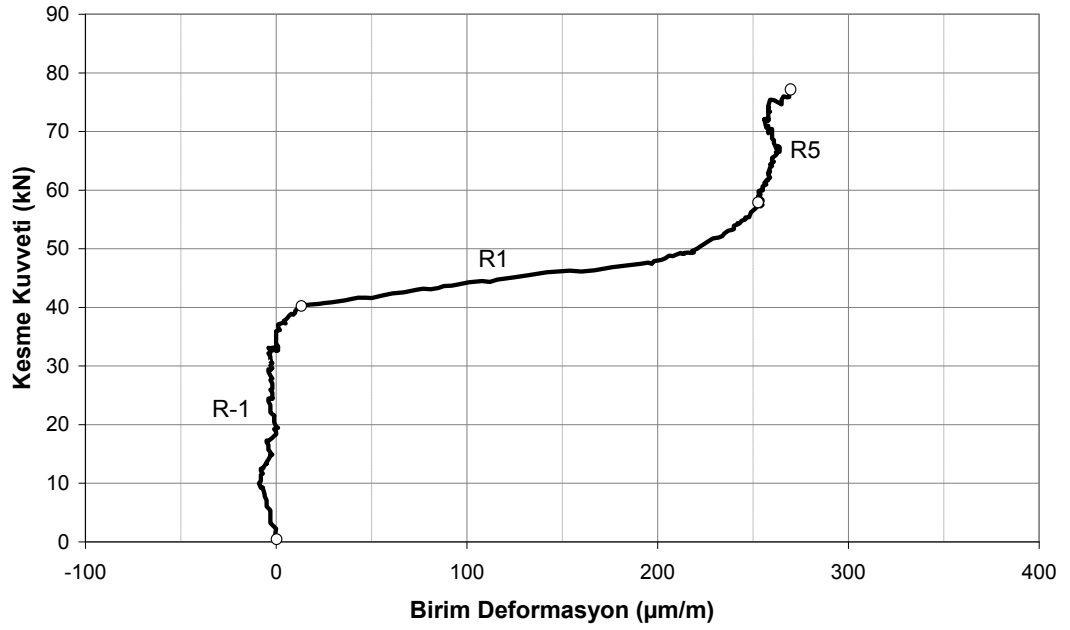
Şekil 5.25: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.26: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

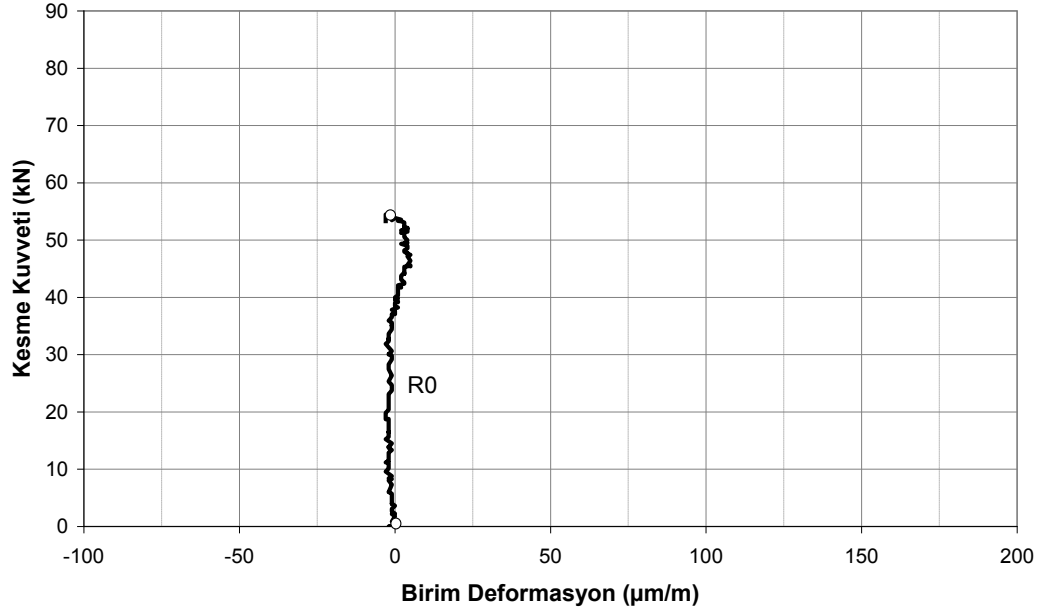


Şekil 5.27: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

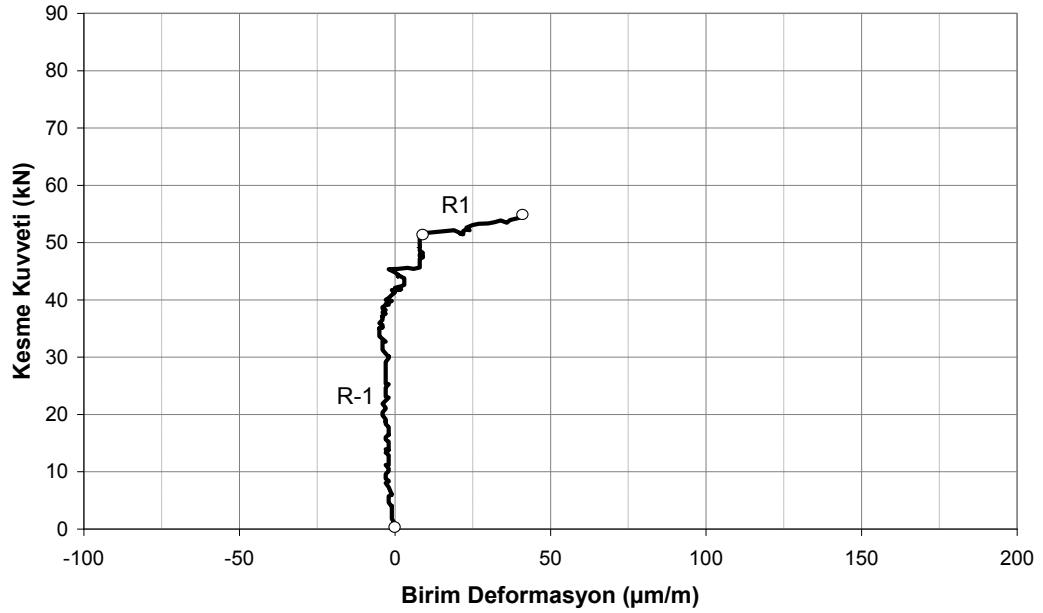


Şekil 5.28: BGA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

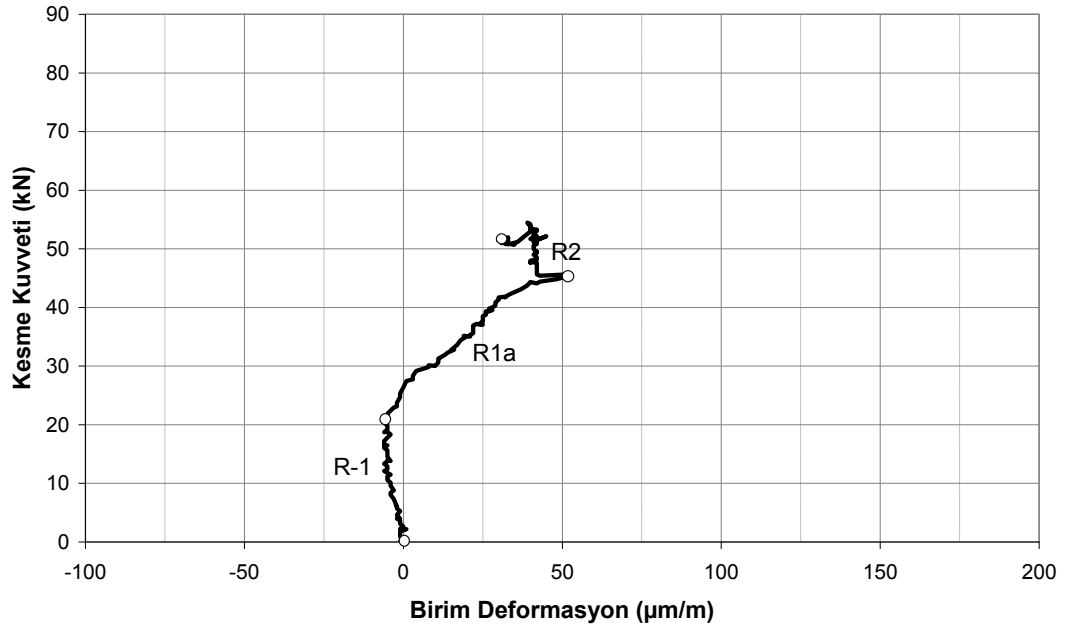
5.2.1.5 BHU numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



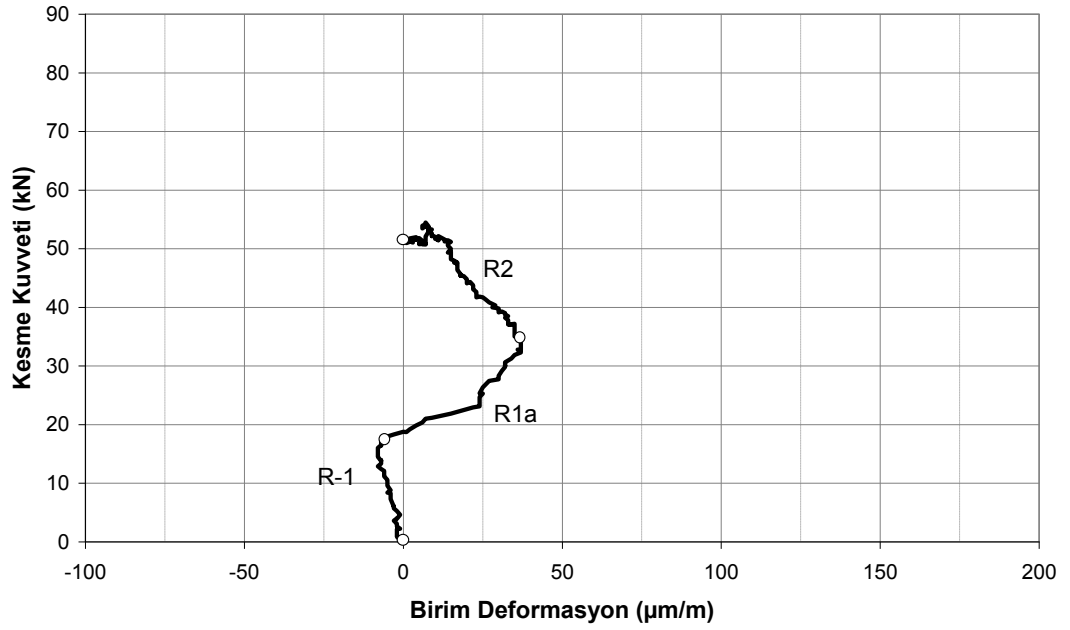
Şekil 5.29: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 24' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.30: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 23' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

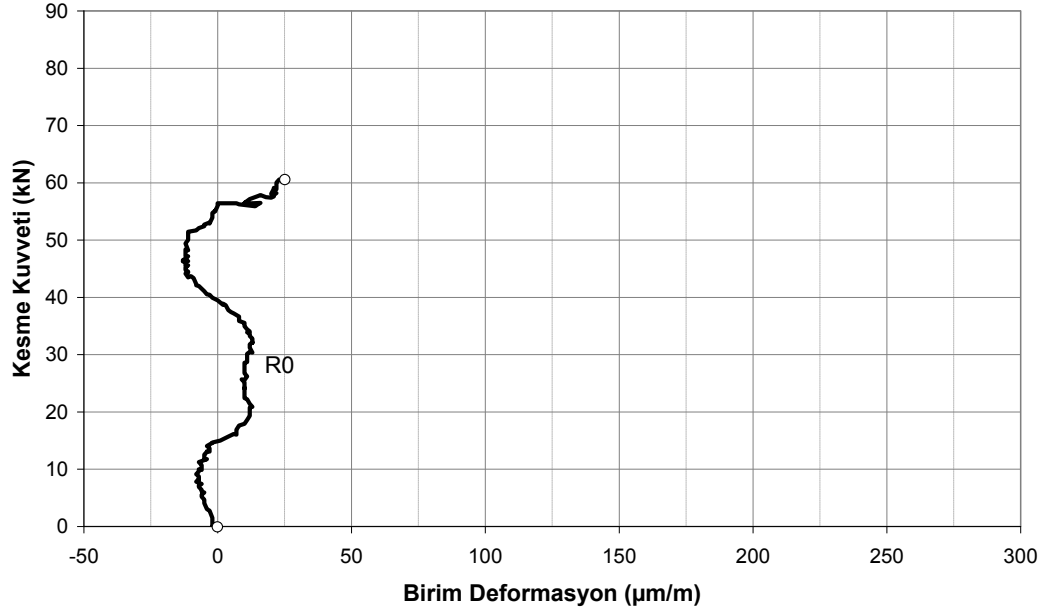


Şekil 5.31: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 22' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi

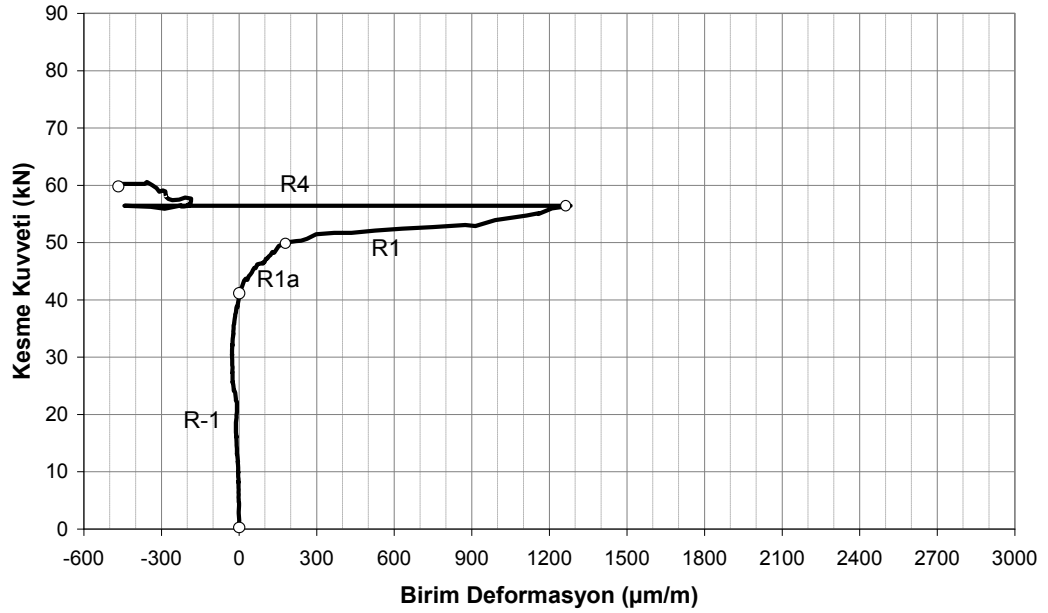


Şekil 5.32: BHU numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 21' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirmesi

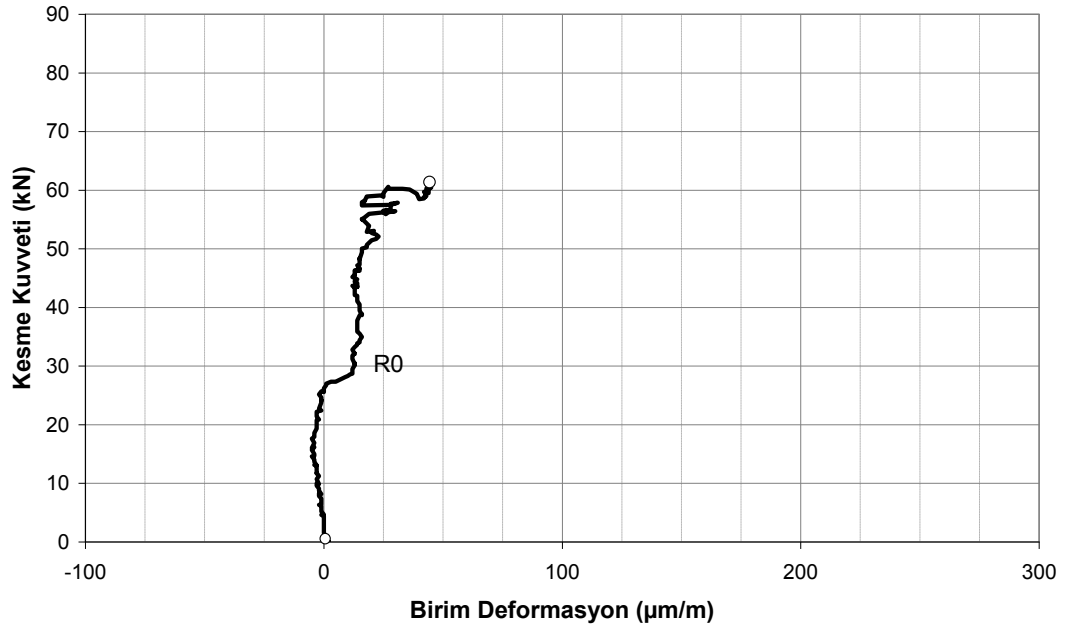
5.2.1.6 BHA numunesi kesme kuvveti - birim deformasyon grafiklerinin değerlendirilmesi



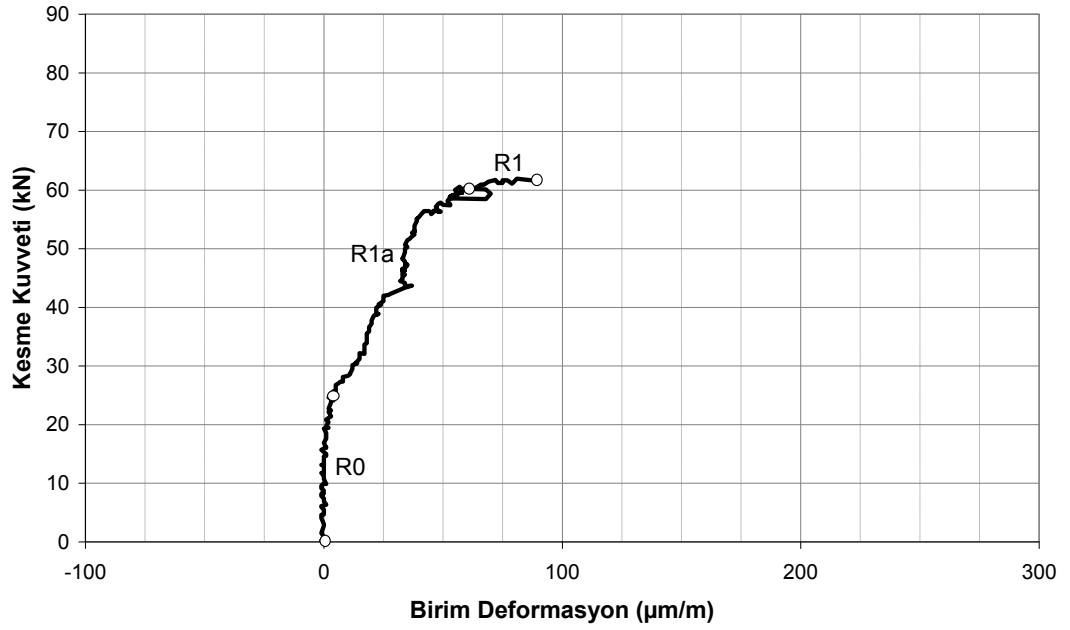
Şekil 5.33: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 20' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.34: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 19' dan okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.35: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 18' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi



Şekil 5.36: BHA numunesinde FRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden CH 17' den okunan kesme kuvveti – birim deformasyon grafiğinin değerlendirilmesi

5.2.2. Güçlendirilmiş numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması

Yetersiz kesme donatısına sahip betonarme yapı elemanlarının lifli polimerlerle kesme dayanımlarının artırılmasına yönelik hesap yöntemlerinin tanımlandığı TS 500 ve DBYBHY 2007, ACI 318 ve ACI 440, EC2 ve FIB yönetmelikleri ve ilgili kuralları Bölüm 2.3' de verilmişti. Bu bölümde ise yönetmeliklerde verilen kurallara göre yapılan hesapların ve deneylerden çıkan sonuçların karşılaştırması yapılacaktır.

Tablo 5.2' de verilen deneysel çalışmaların ve yönetmeliklere göre yapılan hesaplamaların karşılaştırılmasında, yönetmeliklere göre yapılan hesaplamalarla bulunan FRP birim deformasyonları ile deneylerden elde edilen birim deformasyonlar karşılaştırıldığında, CFRP şeritlerin U şeklinde yapıştırıldığı durumlar için en iyi tahmini ACI 440 yapmaktadır. Bununla birlikte CFRP şeritlerin ankrajlı uygulamaları için en iyi tahmini ABYBHY 2007 ve ACI 440 yapmaktadır. GFRP şeritlerde, şeritlerin U şeklinde yapıştırıldığı durumlar için en iyi tahmini ACI 440, ankrajlı uygulamaları için ise en iyi tahmini ABYBHY 2007 ve ACI 440 vermektedir. Hi-CFRP malzemesinin U şeklinde yapıştırıldığı durum için en iyi tahmini FIB yapmaktadır. Ayrıca Hi-CFRP şeritlerin ankrajlı olarak uygulandığı durum için de en iyi tahmini FIB yönetmeliği yapmaktadır.

Yönetmeliklerin öngördüğü birim deformasyonlar kullanılarak, yönetmeliklerde tanımlı olan V_f hesabı yapılarak kirişlerin toplam kesme kapasiteleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar ile deneylerde kirişlerin göçmeye götüren kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda tüm numunelerde deneysel sonuçlara en yakın hesaplamalar ABYBHY 2007' ye göre yapılan hesaplamalardır. Daha sonra deneylerden çıkan sonuçlara en yakın tahmini yapan yönetmelik ACI 440 olmuştur. FIB yönetmeliğine göre yapılan hesaplar ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçlar arasında iki kata varan oranlar bulunmaktadır.

Deneylerde şahit numunenin göçtüğü yüke göre diğer güçlendirilen kirişlerin göçtüğü yüklerin farkı alınmış ve bu farka şahit numuneye göre kesme kuvvetinde artış tanımı yapılmıştır. Tablo 5.2' de değerlendirilen bir diğer parametre de bu kesme kuvvetindeki artış ile yönetmeliklerin tahmin ettiği birim deformasyonlar ile

hesaplanan güçlendirme ve deneylerde elde edilen birim deformasyonlar ile hesaplanan güçlendirme miktarının karşılaştırılmasıdır. Şahit numuneye göre kirişlerin kesme kapasitelerindeki artışla yönetmeliklerin müsaade ettiği birim deformasyonlara göre yapılan V_f hesabının oranları karşılaştırıldığında en yakın tahmini FIB yönetmeliği yapmaktadır. Ayrıca şahit numuneye göre kirişlerin kesme kapasitelerindeki artışla deneylerden elde edilen birim deformasyonlara göre yapılan V_f hesabının oranları karşılaştırıldığında en yakın tahmini ABYBHY 2007 yönetmeliği yapmaktadır.

Tablo 5.2: Deney sonuçları ile yönetmeliklere göre yapılan hesapların karşılaştırılması

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Numune Adı	Göçme Anındaki Kesme Kuvveti	Şahit Numuneye Göre Kesme Kuvvetindeki Artış	İlgili yönetmelikteki FRP hesap birim deformasyonu	FRP Şeritler Üzerinde Ölçülen Maksimum Birim Deformasyon	Yönetmelikteki FRP Birim Deformasyonu ile Hesaplanan Vf	Deneyden Ölçülen FRP Birim Deformasyonu ile Hesaplanan Vf	Beton Kesme Dayanımı Vc	Kesme Donatısı Dayanımı Vs	Yönetmelik Vc+Vs+Vf	Ölçülen FRP Birim Deformasyonu ile Hesap Vc+Vs+Vf	(2/10) Deneysel / Teorik	(2/11) Deneysel / Teorik	(3/6) Deneysel / Teorik	(3/7) Deneysel / Teorik
	kN	kN	µm/m	µm/m	kN	kN	kN	kN	kN	kN				
TS 500 ve DBYBHY 2007' ye göre yapılan güçlendirme hesabı ile deney sonuçlarının karşılaştırılması														
BV	54.54						26.11	14.08	40.18	40.18	1.36	1.36		
BCU	62.05	7.50	4000	507	14.13	1.79	26.11	14.08	54.32	41.98	1.14	1.48	0.53	4.19
BCA	82.65	28.11	4000	2584	14.13	9.13	26.11	14.08	54.32	49.32	1.52	1.68	1.99	3.08
BGU	61.31	6.77	4000	1873	5.20	2.43	26.11	14.08	45.38	42.62	1.35	1.44	1.30	2.78
BGA	77.50	22.96	4000	4260	5.20	5.53	26.11	14.08	45.38	45.72	1.71	1.70	4.42	4.15
BHU	55.03	0.49	2000	382	20.31	3.88	26.11	14.08	60.49	44.06	0.91	1.25	0.02	0.13
BHA	61.80	7.26	2000	1282	20.31	13.02	26.11	14.08	60.49	53.20	1.02	1.16	0.36	0.56
ACI 318 ve ACI 440' a göre yapılan güçlendirme hesabı ile deney sonuçlarının karşılaştırılması														
BV	54.54						23.91	14.08	37.99	37.99	1.44	1.44		
BCU	62.05	7.50	2217	507	7.83	1.79	23.91	14.08	45.82	39.78	1.35	1.56	0.96	4.19
BCA	82.65	28.11	4000	2584	14.13	9.13	23.91	14.08	52.12	47.12	1.59	1.75	1.99	3.08
BGU	61.31	6.77	3042	1873	3.88	2.03	23.91	14.08	41.86	40.02	1.46	1.53	1.75	3.33
BGA	77.50	22.96	4000	4260	5.10	4.62	23.91	14.08	43.08	42.60	1.80	1.82	4.50	4.97
BHU	55.03	0.49	1366	382	13.87	3.63	23.91	14.08	51.86	41.61	1.06	1.32	0.04	0.14
BHA	61.80	7.26	3045	1282	30.92	12.18	23.91	14.08	68.91	50.17	0.90	1.23	0.23	0.60
EC2 ve FIB' ye göre yapılan güçlendirme hesabı ile deney sonuçlarının karşılaştırılması														
BV	54.54						16.36	14.08	30.44	30.44	1.79	1.79		
BCU	62.05	7.50	5232	507	11.76	1.14	16.36	14.08	42.20	31.58	1.47	1.96	0.64	6.58
BCA	82.65	28.11	8432	2584	18.96	5.81	16.36	14.08	49.40	36.25	1.67	2.28	1.48	4.84
BGU	61.31	6.77	9263	1873	7.51	1.29	16.36	14.08	37.95	31.73	1.62	1.93	0.90	5.24
BGA	77.50	22.96	29646	4260	24.03	2.94	16.36	14.08	54.47	33.38	1.42	2.32	0.96	7.81
BHU	55.03	0.49	1386	382	8.95	2.31	16.36	14.08	39.39	32.75	1.40	1.68	0.05	0.21
BHA	61.80	7.26	1386	1282	8.95	7.75	16.36	14.08	39.39	38.19	1.57	1.62	0.81	0.94

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Sınırlı sayıda numunenin test edilmesi ile elde edilen bu sonuçların, daha güvenilir olabilmesi için çok daha fazla sayıda numunenin deney sonuçları ile desteklenmesi gerekliliği göz ardı edilmemelidir.

- Kirişlere FRP şeritlerin yapıştırılması ile yapılan güçlendirilme yönteminde, bu şeritlerin ankraj çivileri yardımıyla döşemeye monte edilmesi ile yapılan uygulama, tek başına U şeklinde yapıştırılan FRP şeritlere göre güçlendirmede çok daha etkindir. Bu nedenle betonarme kirişlere FRP şeritlerin yapıştırılması ile yapılan güçlendirmelerde, FRP şeritlerin döşemeye ankraj çivileri yardımıyla montajı önerilmektedir.
- Mekanik özellikleri nedeniyle çok gevrek bir malzeme olan Hi-CFRP liflerin U şeklinde bükülmesi ve kirişlerin yüzeyine, köşeleri eğrileştirilmiş olmasına rağmen, yapıştırılması esnasında çok sıkça kopması nedeniyle kesme güçlendirmesinde Hi-CFRP liflerin kullanılması önerilmemektedir.
- Cam Elyaf ve normal elastisite modüllü Karbon Elyaf ile güçlendirilen elemanlarda FRP şerit altında oluşan çatlakların zamanla genişledikleri ve bu genişleyen çatlakları geçen FRP şeritlerin ilerleyen deformasyon seviyelerinde koparak kirişlerde güç tükenmesine ulaşıldığı gözlenmiştir. Diğer taraftan yüksek elastisite modüllü Karbon Elyaf (Hi-CFRP) ile güçlendirilen numunelerde FRP şeridinin altında oluşan ilk kılçak çatlağın Hi-CFRP liflerin kopmasına sebep olduğu ve Hi-CFRP ile güçlendirilen numunelerin ankraj detayından bağımsız olmak kaydıyla şahit numune kapasitesinden daha yukarı çıkamadığı gözlenmiştir.

- FRP güçlendirme şeritlerinin kesme dayanımına ulaşıldığı andaki birim deformasyon değeri için, hesaplanan ve ölçülen birim deformasyonların birbirine en yakın olduğu yönetmelik DBYBHY 2007' dir.
- Hesaplanan ve ölçülen dayanım artışlarını en iyi tahmin eden yönetmelik DBYBHY 2007' dir.
- Kesit kapasiteleri için hazırlanan deneysel/hesap kapasiteleri arasındaki oranlar bu çalışmada kullanılan bütün yönetmelikler için belirli seviyede hata içermekte olup bu hatanın kaynağı FRP şerit üzerindeki birim deformasyonun yönetmelikler tarafından hatalı öngörülmesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda; bu çalışmada kullanılan FRP liflerin farklı aralık ve katman sayısı ile kullanılmasıyla, farklı ankraj yöntemleri ve yapıştırma şeklinin uygulanmasıyla, güçlendirme yapılmadan önce hasar görmüş olan kirişlere güçlendirme yaparak tekrar testlere tabi tutulmasıyla kesme güçlendirmesi hakkında bilinmeyenlerinin azaltılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004. “Betonarme”, Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı, *Evrım Yayınevi, İstanbul*, 459-473, (2004).
2. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007”, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara*, (2007).
3. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) 2000 TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, (2000).
4. ACI Committe 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318-95), *American Concrete Institute, Detroit*, (1999).
5. ACI Committe 440. State of The Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *American Concrete Institute, Detroit, Michigan*, (1996).
6. Commission of The European Communities, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings. prEN 1992-1-1 Draft, *Commission of The European Communities*, (July 2002).
7. FIB Bulletin No 14: Externally Bonded FRP Requirement for RC Structures Technical Report, *Fédération International du Béton, Switzerland, No. 14*, (2001).
8. Taljsten B. and Elfgen L. 2000, “Strengthening Concrete Beams for Shear Using CFRP Materials; Evaluation of Different Application Methods”, *Elsevier Composites Part B: Engineering*, Part B 31, 87-96, (2000).
9. Al-Almery Riyadh, Al-Mahaidi Riyadh 2005, “Coupled Flexural – Shear Retrofitting of RC Beams Using CFRP Straps”, *Composite Structures*, No. 75, 457-464, (2005).
10. Jayaprakash J., Samad A.A.A., Abbasovich, A.A., Abang A., Abang A. 2007, “Shear Capacity of Precracked and Non-precracked Reinforced Concrete Shear Beams With Externally Bonded Bi-directional CFRP Strips”, *Construction and Building Materials*, Malaysia, 365-377, (2007).
11. Francesca C., Marisa P., Stjin M., Luc T., “Debonding Strength and Anchorage Devices for Reinforced Concrete Elements Strengthened With FRP Sheets”, *Science Direct*, (2008).

12. Chajes M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson Jr., T.A. and Finch Jr., W.W., "Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics", *ACI Structural Journal*, Title No: 92-S28, 295-303, (1995).
13. Sinan Altın, Tuğrul Tankut, Özgür Anıl ve Yusuf Demirel, "Response of reinforced concrete beams with clamps applied externally: an experimental study", *Engineering Structures*, No 25, 1217-1229, (2003).
14. Sinan Altın, Özgür Anıl ve Yeliz Gökten, "Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Bir Kelepçe Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 19, No 4, Sayfa 415-422, Ankara, (2004).
15. Sinan Altın, Özgür Anıl, M. Emin Kara, "Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates", *Engineering Structures*, No 27, 781-791, (2005).
16. ACI – ASCE Committe 426: The Shear Strenght of Reinforced Concrete Members, *ACI – ASCE Committe*, ASCE 1973; 99 (6) : 1091-187, (1999).
17. Özgür Anıl, "Improving Shear Capacity of Reinforced Concrete T-Beams Using CFRP Composites Subjected To Cyclic Load", *Cement & Concrete Composites*, 638-646, (2006).
18. Khalifa A. And Nanni A., "Improving Shear Capacity of Existing Reinforced Concrete T-Section Beams Using CFRP Composites", *Elsevier Cement & Concrete Composites*, No 22, 165-174, (2000).
19. Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., and Abdel Aziz, M.I., "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members" *ASCE-Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No 4, 195- 203, (1998).
20. Bimal Babu Adhikary and Hiroshi Mutsuyoshi, "Shear Strengthening of Reinforced Cpncrete Beams Using Various Techniques", *Construction and Building Metarials*, No 20, 366-373, (2006).
21. Sika Shear Strengthening Techniquial Brochures, *Sika, Switzerland*, No 08.01, (2001).

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında İstanbul’ da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul’ da tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 yılı Kasım ayında Polisan Holding bünyesinde çalışmaya başlayan Yılmaz Zafer Vulaş, halen aynı kurumda görev yapmaktadır.