

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME KİRİŞLERİN KESMEYE KARŞI
FARKLI SARIM YÖNTEMİ KULLANARAK
BFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bassel ABODAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERİN KESMEYE KARŞI
FARKLI SARIM YÖNTEMİ KULLANARAK
BFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

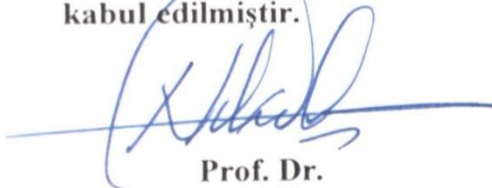
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bassel ABODAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 28/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi
Ali SARIBIYIK
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Yusuf SÜMER
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Bassel ABODAN

28.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK’a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatın getirdiği bütün zorluklar karşısında dik duruşlarıyla her zaman bana örnek olan ve daima yardımına koşan çok değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca beni hiç yalnız bırakmayan, büyük fedakarlıklarla yardımlarını esirgemeyen dostum Abdullah AL-SHEGHRİ’ye, çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan çok değerli yüksek lisans arkadaşlarım Hasan Hüseyin AKBALIK ve Muhammed Eymen KADİ’ye ve SUBÜ Teknoloji Fakültesi laboratuvar teknikleri Sayın Sami GÜRSES’e çok teşekkür ederim.

Bu çalışmada yürütülen tüm proje, BABK tarafından desteklenen “Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Bazalt Elyaf Kumaşlar ile Onarım ve Güçlendirilmesi” başlıklı ve 2017-50-01-064 nolu proje kapsamında gerçekleşmiştir. BAPK’a vermiş olduğu destek için teşekkürlerimi sunarım.

Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına verdikleri destekler için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER... ..	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
1.2. Tezin İçeriği.....	5
BÖLÜM 2.	
BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI VE LİTERATÜR	
ÇALIŞMASI.....	6
2.1. Betonarme Kirişlerinde Kesme Kuvvetinin Oluşum Mekanizması	6
2.2. Betonarme Elemanların Kesme Davranışları	8
2.3. FRP ile Kesmeye Karşı Güçlendirme Yöntemleri.....	10
2.4. FRP ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kesme Dayanım Hesabı	12
2.4.1. ACI 440.2R.....	14
2.4.2. Fib-TG 9.3	16
2.4.3. Chen ve Teng model	18
2.4.4. Khalifa ve Nanni modeli	20
2.5. Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Çalışmalar.....	22
BÖLÜM 3.	
MALZEME VE YÖNTEM.....	35

3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri	35
3.1.1. Kiriş betonu	35
3.1.2. Çelik donatı	36
3.1.3. Bazalt elyaf	37
3.1.4. Epoksi	38
3.2. Deneysel Çalışma	40
3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri	40
3.2.2. Kiriş numunelerinin BFRP kompozit ile güçlendirme yöntemi ..	41
3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması	45
3.3.1. Kiriş numunelerin üretimi	45
3.3.2. Kiriş numunelerin BFRP kompozit ile güçlendirilmesi	48
3.4. Kiriş Deney Düzenegi	52
3.4.1. Yükleme ve ölçüm düzenegi	52
3.4.2. Çatlak açıklığı hesaplama yöntemi	54
 BÖLÜM 4.	
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ.....	56
4.1. Kontrol Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları	56
4.2. US45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları.....	58
4.3. BUS45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları	61
4.4. FS45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları	64
4.5. SBS90/0 Kiriş Numunesinin Eğilme Deney Sonuçları	66
4.6. FSW90 Kiriş Numunesinin Eğilme Deney Sonuçları	69
4.7. Kirişlerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	71
4.8. Deneysel Sonuçların Analitik Tahminlerle Karşılaştırılması	76
 BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
 KAYNAKLAR.....	
KAYNAKLAR.....	82
EKLER.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	89

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ACI	: Amerikan beton enstitüsü
BFRP	: Bazalt elyaf takviyeli polimer
FRP	: Fiber elyaf takviyeli polimer
A_{fv}	: FRP kesme takviye alanı, mm ²
b_w	: Kiriş genişliği veya dairesel bölümün çapı, mm
d	: kirişin etkin derinliği, mm
d_f	: FRP fleksural (eğilme) takviyesinin etkili derinliği, mm
d_{fv}	: FRP kesme takviyesinin etkili derinliği, mm
E_c	: Betonun elastisite modülü, MPa
E_f	: FRP'nin elastisite modülü, MPa
f'_c	: Betonun belirtilen basınç dayanımı, MPa
f_{fe}	: FRP'nin tabakasinda oluşan çekme gerinmesi, MPa
h	: Toplam kalınlık veya elemanın yüksekliği, mm
k_1	: Beton mukavemetini modifikasyon faktörü
k_2	: Sarım şemasını modifikasyon faktörü
L_e	: FRP Aktif aderans boyu, mm
n	: FRP'nin katman sayısı
n_f	: FRP ve beton arasındaki elastikiyet modülünün oranı = E_f / E_c
S_f	: FRP şeritlerin eksenlerinin arasındaki mesafe, mm
t_f	: FRP kompozitin bir katmanının nominal kalınlığı, mm
V_c	: beton tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti, N
V_f	: FRP şeritleri tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti, N
V_n	: Nominal kesme mukavemeti, N
V_s	: Çelik etriyeleri tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti, N
W_f	: FRP şeritlerin genişliği, mm

- ε_{fe} : FRP'nin etkin birim uzama sınırı, mm/mm
 ε_{fu} : FRP takviyesinin dizayn kopma birim uzaması, mm/mm
 Φ : Mukavemet azaltma faktörü
 α : Elemanın boyuna eksenine göre uygulanan FRP elyafın açısı
 κ_v : Kesmede etkin-bağı katsayısı
 Ψ_f : FRP mukavemet azaltma faktörü



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Basit kesme altında asal gerilmeler	6
Şekil 2.2. Asal gerilmelerin yönü.....	7
Şekil 2.3. (a)-(d) değişik a/d oranlarına bağlı olarak kesme kırılması	9
Şekil 2.4. FRP kompozitler kullanılarak kesme güçlendirmesi için tipik sarım yöntemleri	10
Şekil 2.5. Kirişlerin sarımında kullanılan FRP biçimleri.....	11
Şekil 2.6. elyaf yönlendirme türleri	11
Şekil 2.7. FRP kompozitler ile kesme güçlendirmesinde kullanılan boyutsal değişkenler	15
Şekil 2.8. Chen ve Teng tarafından genel kesme güçlendirme şemasının gösterimi.....	19
Şekil 2.9. FRP'nin etkin genişliği: (a) U mantolama durumlarda; (b) yan sarım durumlarda	22
Şekil 3.1. Silindir beton numuneleri	36
Şekil 3.2. Kiriş donatıları	36
Şekil 3.3. Bazalt Elyaf.....	38
Şekil 3.4. Epoksi reçine.....	39
Şekil 3.5. Deney kirişlerin geometrisi ve donatı yerleşim planı	40
Şekil 3.6. US45 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri	42
Şekil 3.7. FS45 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri	42
Şekil 3.8. BUS45 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.....	43
Şekil 3.9. SBS90/0 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri	44
Şekil 3.10. FSW90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri	44
Şekil 3.11.Kiriş numuneleri için üretilen kalıp sistemi.....	45
Şekil 3.12. Beton dökümünden önce kalıp ve donatı görünümü	46
Şekil 3.13. Beton dökümü işlemi	47
Şekil 3.14. Beton yerleştirme işlemi	47

Şekil 3.15. Beton yüzeyi tesviye işlemi	48
Şekil 3.16. Şeritlerin yeri belirtilmesi	49
Şekil 3.17. U ve tam sarım şerit yönteminde kullanılan bazalt elyaf şeritleri	50
Şekil 3.18. Epoksi karıştırma işlemi	50
Şekil 3.19. Beton yüzeyine epoksi uygulanması.....	51
Şekil 3.20. BFRP şeritlerin yapıştırılması.....	52
Şekil 3.21. Yükleme düzeneği	53
Şekil 3.22. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği	54
Şekil 3.23. Çatlak açıklıklarının tespit edilmesi için yapılan kiriş modellemesi ve hesaplama yöntemi.....	55
Şekil 4.1. Kontrol kirişin eğilme deneyi	56
Şekil 4.2. Kontrol kirişin yükleme sonrası deformasyon şekli	57
Şekil 4.3. Kontrol kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği	57
Şekil 4.4. Kontrol kirişlerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	58
Şekil 4.5. 45US kiriş numunelerinin eğilme deneyi	59
Şekil 4.6. US45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri	59
Şekil 4.7. US45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	60
Şekil 4.8. US45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği	61
Şekil 4.9. BUS45 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.....	61
Şekil 4.10. BUS45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri ..	62
Şekil 4.11. BUS45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	63
Şekil 4.12. BUS45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği	63
Şekil 4.13. FS45 kiriş numunelerinin eğilme deneyi	64
Şekil 4.14. FS45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.....	65
Şekil 4.15. FS45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği	65
Şekil 4.16. FS45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	66
Şekil 4.17. SBS90/0 kiriş numunesinin eğilme deneyi	66
Şekil 4.18. SBS90/0 kiriş numunesinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri...	67
Şekil 4.19. SBS90/0 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği	68
Şekil 4.20. SBS90/0 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	68
Şekil 4.21. FSW90 kiriş numunesinin eğilme deneyi	69
Şekil 4.22. FSW90 kiriş numunesinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.....	70

Şekil 4.23. FSW90 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği	70
Şekil 4.24. FSW90 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	71
Şekil 4.25. Kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri	73
Şekil 4.26. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri.....	74
Şekil 4.27. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-deplasman grafikleri.....	75
Şekil 4.28. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-çatlak açıklığı grafikleri.....	75



TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Silindir beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı	35
Tablo 3.2. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin sonuçları.....	37
Tablo 3.3. Bazalt elyaflara ait teknik özellikler	38
Tablo 3.4. Sikadur 330 epoksi özellikleri	39
Tablo 3.5. Tasarlanan BFRP şeritler ve kumaşın durumu	41
Tablo 4.1. Kontrol kirişlere ait kesme kuvvetine göre yük, sehim ve çatlak açıklığı değerleri.....	56
Tablo 4.2. US45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri.....	58
Tablo 4.3. BUS45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri.....	61
Tablo 4.4. FS45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri.....	64
Tablo 4.5. SBS90/0 kiriş numunesine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri.....	67
Tablo 4.6. FSW90 kiriş numunesine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri.....	69
Tablo 4.7. Kiriş numunelerin ortalama deneylerin sonuçları ve göçme şekilleri .	71
Tablo 4.8. Deney sonuçları ve analitik sonuçlar	77

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kiriş güçlendirme, kesme davranışı, BFRP, bazalt elyaf, kesme güçlendirmesi, betonarme kiriş

Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (BFRP) kompozit kullanılarak açılı şerit yöntemi ile güçlendirmesi üzerine deneysel çalışma ve sonuçların mevcut hesap yöntemleri ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

Dikdörtgen kesitli kirişler 150×250 mm kesitinde ve 2000 mm boyunda laboratuvar ortamında üretilmiştir. Kirişlerde C16 kalitesinde beton ve S420 sınıfında çelik donatı kullanılmıştır. Üretilen betonarme kirişlerde; eğilme taşıma yükü bakımından yeterli kapasitede olacak şekilde olup kirişin bir tarafı kesme taşıma gücü yetersiz diğer tarafı kesme taşıma gücü yeterli olarak tasarlanmıştır. BFRP kompozit şeritler kirişlerin kesme taşıma gücü yetersiz olan tarafına 45° açıyla U şerit, 45° açıyla U şerit ile iki yatay başlık şerit, 45° açıyla tam sarım şerit, tam sarım ve yan sarım güçlendirme şekillerinde mantolanıp epoksi reçine ile yapıştırma işlemi yapılmıştır. Güçlendirilen kiriş numuneleri ve kontrol kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme ile dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Kiriş numunelerin ortalama kesme dayanımları, sehim kapasiteleri, kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ve kesme deformasyonları incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları Chen-Teng modeli, Khalifa-Nanni modeli, ACI 440.2R ve Fib-TG 9.3 yönetmeliklerindeki mevcut FRP ile kesme dayanımının hesap yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, dıştan yapıştırılmış BFRP kompozitlerin, betonarme kirişlerin kesme güçlendirmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, incelenen çeşitli sarım yöntemleri arasında en verimli sonuçlar, tam sarım kumaş ve 45° açıyla tam sarım şerit yöntemleri ile elde edilmiştir. BFRP kompozitler ile güçlendirilen kiriş numunelerin kontrol kirişlerine kıyasla kesme kapasitelerinde %61 ila %113 arasında iyileşme olmuştur. BFRP kompozitin, betonarme kirişlerin kesme kapasitesine ek kesme katkısını hesaplamak için literatürde bulunan dört tahmin modeli deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve Fib-TG 9.3 yöntemi ile daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

SHEAR STRENGTHENING OF RC BEAMS WITH BFRP BY USING DIFFERENT WINDING METHODS

SUMMARY

Keywords: Beam strengthening, Shear behavior, BFRP, Basalt fibers, Shear strengthening, RC beam

In this study, the experimental study and comparative analysis were performed on the results of the deficient shear strength RC beams strengthened with basalt fiber reinforced polymer composites by using strip winding method with different orientation angle.

150×250 mm rectangular cross section RC beams with 2000 mm long were produced in laboratory environment. S420 reinforcement steel and C16 concrete class were used in the RC beams. RC beams were Designed to have one side of the beam with a deficient shear capacity and the other side were designed to have sufficient capacity, also, all beams were designed to have sufficient capacity in terms of bending load capacity. BFRP were used for strengthening the insufficient shear capacity side of RC beams by using epoxy resin in various bonding reinforcement schemes such as 45° U strips, 45° U strips along with two horizontal strips, 45° completely warped stirrups, 90° completely warped continuous sheets and side bonding continuous sheets. BFRP strengthened RC beams and the control beam specimens were tested in the laboratory by 4-point bending experiment with constant rate of loading. The average shear capacities, shear deformation, deflection capacities and shear crack width values on the beam surface of all beam specimens were examined. In addition, the experimental shear strengthening results were compared with Chen and Teng model, Khalifa and Nanni model, ACI 440.2 R and FIB-TG 9.3 guidelines.

Tests showed that the externally adhesive bonded flexible BFRP composites are effective in strengthening RC beams in shear. In addition, the most efficient results among the various strengthening techniques examined were obtained with completely wrapped sheets and 45° completely wrapped strips. Also, there was an improvement in shear capacity between 61% to 113% in all RC beam samples reinforced with BFRP composites when they were compared to the control beams. Four prediction models available in literature for predicting the shear contribution of BFRP composites to the shear capacity of BFRP strengthened beams were used to compare it with the experimental results and it showed that close results were obtained with Fib-TG 9.3 model.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Betonarme yapıların hasarı günümüzde inşaat sektörünün en önemli sorunlarından biridir. Ayrıca, geçmişte dünyanın farklı yerlerinde eski tasarım yönetmelikleri kullanılarak yapılan çok sayıda yapı yeni yönetmeliğine göre yapısal açıdan güvensizdir. Bu gibi hasar olan veya yapısal olarak eksik yapıların değiştirilmesi büyük miktarda kamu parası ve zaman alacak olduğundan, betonarme güçlendirmesi, yapıların yük taşıma kapasitelerini arttırması ve hizmet ömürlerini uzatmasından dolayı kabul edilebilir yöntem haline gelmiştir. Betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi yeni bir konu değildir ve son otuz yılda tüm dünyada çeşitli onarım ve güçlendirme projeleri gerçekleştirilmiştir.

Betonarme yapı tasarımında düşey taşıyıcı elemanlar yatay taşıyıcı elemanlara göre daha güçlü tasarlanmaktadır. Deprem sırasında betonarme yapılarda ilk hasar alması gereken elemanlar tasarım gereği kirişlerdir. Betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde farklı yöntemler ile kullanılmaktadır. Kirişlerin betonarme mantolama yöntemi ile onarım ve güçlendirilebilmesi bu yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak zor ve zahmetli olan bu yöntemin, bina ağırlığını önemli ölçüde artırması, yapı temel sisteminde ilave düzenlemeleri gerektirmesi, güçlendirme sırasında yapının kullanımına müsaade etmemesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, eğilme veya kesmede yetersiz olarak betonarme kirişlerin onarımı ve güçlendirilmesinde harici olarak bağlanmış çelik plakalar veya etriye donatıları kullanılabilir [1],[2]. Ancak, harici olarak bağlanmış bu malzemelerin güçlendirme elemanı olarak kullanılması durumunda ayrıca korozyon problemi ortaya çıkabilmektedir.

Son zamanlarda, yapı sektörü FRP kompozitleri genellikle ahşap, çelik ve beton gibi diğer inşaat malzemeleri ile birlikte güçlendirme malzemesi olarak kullanmaya

başlanmıştır. FRP kompozitler, paslanmayan, manyetik alan oluşturmayan, çeşitli kimyasallara karşı oldukça dirençli olan, düşük ağırlık/mukavemet oranlara sahip olan, yüksek yorulma dayanımı ve uygulama kolaylığı gibi çeşitli çekici özellikler göstermektedir. Ayrıca, mevcut betonarme yapıların harici olarak güçlendirmesinde giderek önemi artmaktadır. FRP kompozitlerin, kolonlar, kirişler, döşemeler ve duvarlar gibi birçok betonarme yapı eleman yüzeylerine epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilmesi uygulanabilir etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir [3].

FRP kompozitler yüksek mukavemetli karbon, aramid veya cam elyaflardan ve polimer malzemesinden oluşmaktadır. FRP kompozitlerde esas yükü elyaflar taşırken polimer ise lifleri bir arada tutan lifler arası yük aktarımını sağlayan matris elemanıdır. Birçok seçenek arasında, bu kompozitler laminat veya kumaş şeklinde olabilmektedir. Laminatlar sert plakalar şeklinde üretilmekte ve termoset reçine ile beton yüzeye yapıştırılarak monte edilmektedir. FRP kumaş ise ya kuru ya da ıslak yöntem ile önceden emprenye edilmiş beton yüzeye kurulumdan sonra kurlanmaktadır. Bu kurulum tekniği elle yatırma yöntemi olarak bilinmektedir. Harici olarak bağlanmış FRP kompozitler ile güçlendirme yöntemlerinin birçok yapısal eleman türleri için geçerli olduğu bilinmektedir. FRP kompozitler, ek eğilme dayanımı sağlamak için yapısal elemanların (örneğin, döşemeler veya kirişler) gerilme oluşan bölgelerine yapıştırılabilmektedir. Kesme dayanımını artırmak içinse FRP kompozitler kiriş gövdesinin kesme bölgesine, tam sarım, U sarım ve yan sarım yöntemleri kullanılarak şeritler veya sürekli levhalar şeklinde yapıştırılabilmektedir.

Betonarme kirişlerin kesme kuvvetine karşı FRP kumaş veya plakalar ile onarım ve güçlendirilmesi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [29-57]. Drimoussis ve Cheng tarafından yapılan araştırmada [4], FRP kompozitler ile kesmede zayıf betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde çok verimli olduğu gösterilmiştir. Khalifa ve Nanni (2002), kesmede yetersiz olarak betonarme kirişlerin CFRP kompozit ile güçlendirilmesinin, kirişlerin kesme kapasitesini %40 ila %138 arasında arttırdığı sonucuna varmışlardır [5]. Baggio ve ark. (2014), GFRP kompozit ile farklı sarım yöntemleri kullanarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesinin, kirişlerin kesme kapasitesini %36 ila %52 arasında arttırdığı sonucuna varmışlardır [6].

Araştırmacılar güçlendirmede karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin yüksek dayanım ve dayanıklılığını da dikkate alarak CFRP kompozitler üzerine yoğun ilgi göstermişlerdir [5], [7-10]. CFRP kompozitler günümüzde kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak karbon fiberin maliyetinin yüksek olması nedeni ile cam, aramid, bazalt gibi fiberlerin karbon fibere alternatif olma durumu da araştırmacılar tarafından incelenmektedir [6], [11-15].

Bazalt elyafın E-cam elyaftan daha iyi çekme dayanımına sahip olduğu, karbon liflerinden daha büyük birim deformasyona sahip olduğu ve kimyasal etkilerine ve yangına karşı dayanıklı olduğu bilinmektedir [16]. Bu avantajlar, bazalt elyafın umut verici bir yapısal güçlendirme malzemesi olarak uygulanabilirliğini göstermektedir. Brik tarafından yapılan çalışmada, BFRP kompozitlerin, betonarme yapılarda donatı olarak kullanılması ve özellikleri araştırılmıştır [17],[18]. Sim ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada, harici takviye olarak yapıştırılmış bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin (BFRP) eğilmeye karşı betonarme kirişlerde etkinliği gösterilmiştir [11]. Esnek tabiatı, kolay uygulaması, yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastisite modülüne sahip olduğundan, BFRP kompozitler ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Betonarme yapı elemanların iyileştirme, onarım ve güçlendirilmesinde FRP kompozitlerin kullanımı etkili teknik olarak gösterildiğinden, uygulama alanı sürekli olarak artmaktadır ve bunun sonucu olarak da, FRP güçlendirme sistemlerinin tasarım, detaylandırma ve kurulumlarının analitik modelleri, yönetmeliklere ve tasarım kodlarına uygulanmıştır (örneğin, ACI 440 [19] ve Fib-TG 9.3 [20]). Betonarme elemanların FRP ile kesmeye karşı güçlendirme hesabında kullanılan analitik modeller aslında tamamen çözülmemiş bir araştırma tartışmasıdır ve halen araştırılmaktadır [21] [22]. Mevcut kesme dayanımı hesaplanmasında modeller, bazen aşırı güvenli ve güvenli olmayan sonuçlar vermekte ve yeterli sayıda deneysel test ile doğrulanması gerekmektedir. Genel olarak en meşhur kodlar ve modeller, beton, çelik ve FRP'nin katkılarının basit bir toplamı ile nominal kesme mukavemetinin hesaplanmasıdır. Bu tür yaklaşımlar çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiş ve FRP varken iç çelik donatıda etkili gerilmeyi etkileyebileceğini gözlemleyerek bazen güvenli olmayan

sonuçlara yol açabileceği sonuca varmışlardır [23] [24]. Bu nedenle, bu yöntemle ilgili deneysel bir araştırmanın yapılması, dayanım ve davranışın net bir şekilde incelenmesi ve izlenecek hesaplama yöntemlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Kesme dayanımı yetersiz olan betonarme kirişlerin kesme dayanımının artırılması için yaygın olarak kullanılan takviye yöntemi, epoksi ve Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kumaş ve şeritlerin dıştan (harici olarak) kirişlere yapıştırılmasıdır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak diğer FRP kompozitlere göre bazı avantajları dikkate alınarak Bazalt elyaf kumaşlarla açılı şerit yöntemi kullanılarak dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Türkiye’de üretilmeye başlanan yüksek çekme mukavemeti, yüksek elastisite modülü ve çevre dostu özelliklerine sahip BFRP kompozitler ile betonarme kirişlerin kesmeye karşı farklı sarım yöntemleri ile güçlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla BFRP kompozitler kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan yöntemler:

- 1- 45° açıyla U şerit,
- 2- 45° açıyla U şerit ile yatay başlık şeritler,
- 3- 45° açıyla tam sarım şerit,
- 4- 90° açı ile tam sarım sürekli levhalar,
- 5- Kiriş yan yüzeylerine çift doğrultulu (90°/0°) sürekli levhalar sarım şeklindedir.

Deneysel çalışmada, beton dayanımı düşük ve etriye donatısı yetersiz kirişlerin BFRP kompozitler ile açılı şerit yöntemi ile güçlendirmesini kapsamaktadır. Ayrıca beş farklı sarım yöntemi ile güçlendirilen kirişlerden elde edilen deney sonuçları hem kontrol kirişleri ile hem de kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, kullanılan sarım yöntemlerinin, kesme dayanımının üzerindeki etkisi incelenmiş ve deneysel çalışmadan elde edilen kesme dayanımı sonuçları literatürde yaygın olarak bilinen Chen-Teng modeli (2003), Khalifa-Nanni modeli (1998), ACI 440.2R (2008)

ve Fib-TG 9.3 (2001) yönetmeliklerindeki mevcut FRP ile kesme dayanımının hesap yöntemi ile karşılaştırılması kapsamaktadır.

1.2. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır: Birinci bölümde; giriş ve çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde; betonarme kirişlerde kesme kuvvetinin oluşum mekanizması, kesme davranışı, FRP ile kiriş güçlendirme yöntemleri, mevcut hesap yöntemleri formülleri açıklamalı bir şekilde ve tez konusu ile daha önce yapılmış çalışmalar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde; deneysel çalışmada kullanılan kiriş numunelerin kesit özellikleri, kiriş üretilmesinde kullanılan yapı malzemelerin özellikleri, kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan BFRP kompozit özellikleri, BFRP kompozit ile güçlendirme yöntemleri, kiriş numunelerin üretilmesi ve güçlendirilmesinin etapları ve deney düzeneği sunulmuştur.

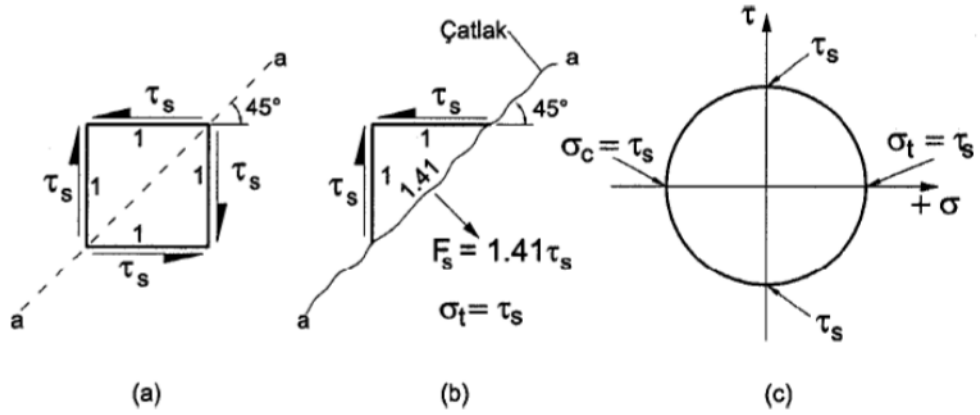
Dördüncü bölümde; deneysel programda kontrol ve güçlendirilen betonarme kirişlerin yapılan eğilme deneyi sırasında yük, deplasman ve çatlak açıklıkları tablolar ve grafiklerle açıklamalı şekilde sunulmuş olup kirişlerin deney sonuçlarının hem kendi aralarında hem de analitik tahminlerle karşılaştırılması bu bölümde sunulmuştur.

Beşinci bölümde; deneysel çalışmasında elde edilen verilerin analizi yapıp ulaşılan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Betonarme Kirişlerinde Kesme Kuvvetinin Oluşum Mekanizması

Betonun kesme ve basınç mukavemeti, basit kesme koşullarında bile, çekme mukavemetinden daha yüksek olduğundan kırılma şekli, asal çekme gerilmelerine dik olarak gelişen eğimli çatlaklar boyunca gelişen gevrek kırılma şeklinde olacaktır (Şekil 2.1.).

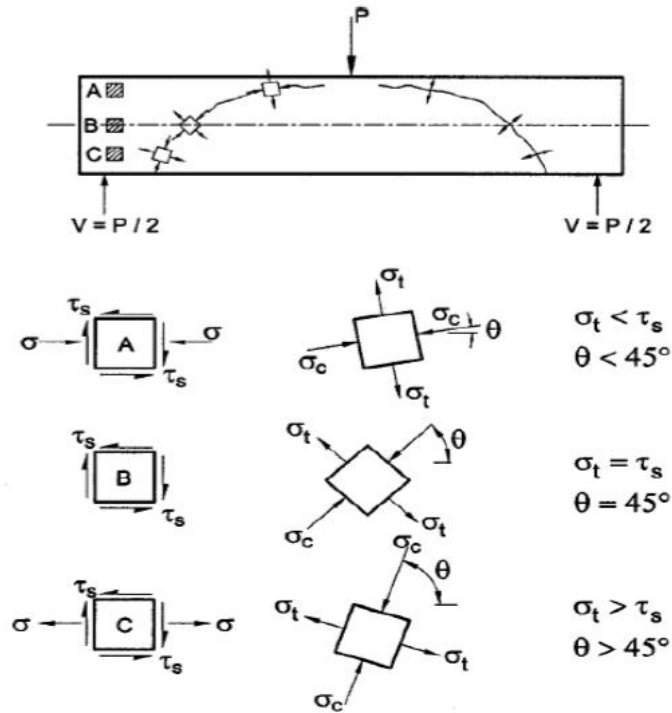


Şekil 2.1. Basit kesme altında asal gerilmeler [25]

Şekil 2.1.'de gösterilen τ_s : kesme gerilmeleri, F_s : eğik çekme kuvveti, σ_t : asal çekme gerilmeleri. Basit kesme durumlarında, en düşük çekme mukavemeti nedeniyle kırılma meydana gelmektedir. Bunun sebebi olarak; asal çekme ve asal basınç gerilmelerinin kesme gerilmesine eşit olması gösterilebilir. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilmelerinin yüzeyine 45° açıyla bir düzlemde etki edeceğinden, kırılma, asal çekme gerilmelerine dikey yönde oluşturulmuş eğik çatlak tarafından oluşacaktır (Şekil 2.1. b). Asal çekme gerilmelerinden dolayı ortaya çıkan bu tip çatlaklara "eğik çekme

çatlakları" denmekte ve buna sebep olan asal gerilmelere "eğik çekme gerilmeleri" denmektedir.

Asal çekme gerilmelerinin neden olduğu bu eğimli çatlaklar, gevrek ve ani kırılmalara neden oldukları için son derece tehlikeli çatlaklardır. Normal gerilmelerin kesmeden etkilendiği durumlarda, eğimli çatlağın eğimi, asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır. Şekil 2.2.'de simetrik yükleme ile betonarme kirişi göstermektedir. Tarafsız eksen, tarafsız eksenin üstü ve altında kalan ve A, B, C olarak işaretlenmiş üç eleman gerilmelerden etkilenmekte ve bu gerilmelerin oluşturduğu asal gerilmeler Şekil 2.2.'de ayrı ayrı olarak gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, tarafsız eksen seviyesindeki normal gerilmeler sıfırdır, bu nedenle çatlama kiriş eksenine 45° 'lik bir açıda meydana gelmektedir. Normal gerilmelerin varlığı, asal çekme gerilmelerinin gerek büyüklüğünü gerekse eğikliğini etkilemektedir. Çatlama, asal çekme gerilmelerine dik bir doğrultuda gerçekleştiğinden, kirişin alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru uzanan eğimli çatlak eğikliği, Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi azalmaktadır. Deneysel veriler, çatlak eğimi konusunda yapılan teorik çalışmayı doğrulamaktadır [25].



Şekil 2.2. Asal gerilmelerin yönü [25]

Yukarıdaki bulgular ışığında, betonarme yapılarda gevrek kırıklara ve büyük sorunlara neden olan eğimli çatlakların, kesme gerilmelerinden değil, asal çekme gerilmelerinden kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle literatürde “kesme sorunu” olarak adlandırılan bu sorun aslında asal çekme problemidir. Ancak, asal çekme gerilmelerini ölçmek için kesme kuvveti bir ölçü olarak kullanılabilir. Alınacak tedbirler kesme gerilmeleri için değil, asal çekme gerilmeleri için olmalıdır [25].

2.2. Betonarme Elemanların Kesme Davranışları

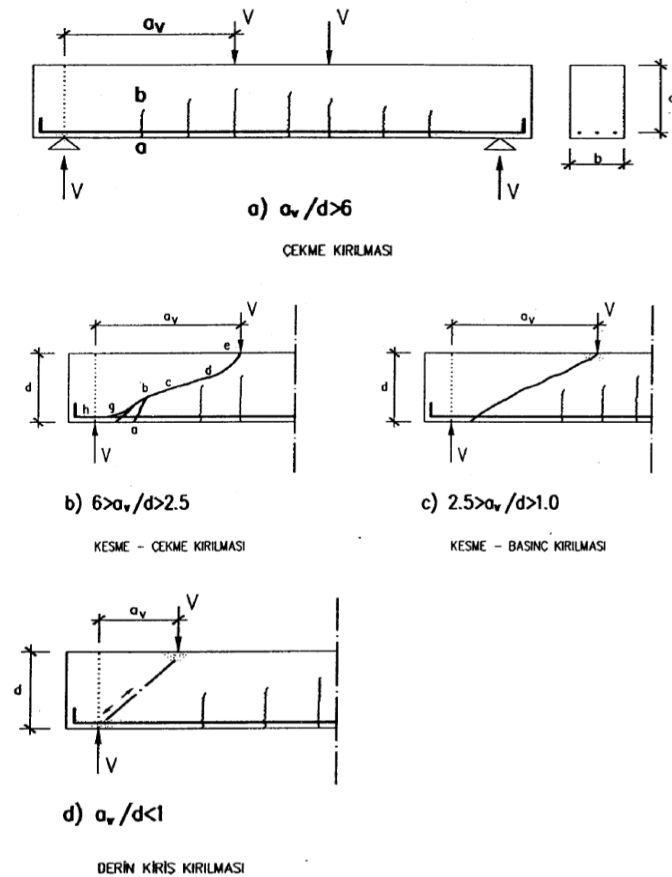
Son zamanlarda yapılan kapsamlı deneysel çalışmalar, kirişlerin kesme dayanımı hakkındaki klasik teorileri büyük ölçüde değiştirmiştir. Amerika’da ACI (Amerika Beton Enstitüsü) ’ün ve İngiltere’de ISE’nin çalışma gruplarının betonarme kesitlerin kesme dayanımı üzerine yaptığı araştırmalar sonucunda, kesme davranışına etkili olan en önemli faktörün “kesme açıklığı/etkili derinlik” (a_y/d) olduğu anlaşılmaktadır [26]. Çalışma ve deneyler simetrik iki tekil yük etkisinde basit kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kiriş deney numunelerinin sadece eğilme donatısı vardır. Tekil yük ile yakın mesnet arasındaki mesafeye “kesme açıklığı” denmektedir. Şekil 2.3.’te a_y/d oranına bağlı olarak, gücün tükenmesinin yükün artmasıyla nasıl gerçekleştiği açıklanmaktadır.

1. $a_y/d > 6$ ise kiriş eğilme momenti taşıma gücüne ulaşmaktadır (Şekil 2.3.a.).
2. $6 > a_y/d > 2.5$ ise eğik çekme kırılması oluşmaktadır (Şekil 2.3.b.). Başlangıçtaki eğilme çatlakları a-b, eğikleşerek a-b-c durumuna gelmekte, a_y/d üst sınıra (6’ya) yakınsa (e) noktasına hızla ilerleyerek kirişin ani olarak kırılmasına yol açmaktadır. a_y/d alt sınıra (2,5’a) yakınsa, tekil yükten gelen basınç gerilmeleri çatlakların yukarı gelişmesini önlemektedir. Kırılma mesnet üzerinde (h) aderansın kaybolması ile olmaktadır. Çatlamanın başlaması ile, kırılma anındaki kesme kuvveti arasında pek az fark vardır.
3. $2,5 > a_y/d > 1$ ise yük etrafındaki basınç gerilmeleri çatlakların ilerlemesini önlemektedir. Kırılma yük altındaki betonun ezilmesi ile oluşmaktadır; bu yüzden “kesme-basınç kırılması” olarak adlandırılmaktadır. Ancak kiriş uzun

süre dengesini koruduğundan kırılma yükü, çatlama yükünün iki katına kadar çıkabilmektedir (Şekil 2.3.c.).

4. $a_v/d < 1$ ise derin kiriş kırılması oluşur; yük artık eğilme ile değildir, beton basınç çubuğu aracılığı ile mesnede aktarılmaktadır. Beton bir gergili kemer, çekme donatısı ise gergi konumuna girmektedir. Bu tür kırılma donatının da akması bunu göstermektedir. Kırılma ya betonun ezilmesi ya da donatı aderansının kaybolması ile ortaya çıkmaktadır. Kırılma yükü, çatlama yükünün birkaç katı olabilmektedir (Şekil 2.3.d.).

Yukarıda açıklananlar ışığında, a_v/d oranının önemli olduğu anlaşılmaktadır. (a_v/d) oranı yalnızca tekil yükün etkisindeki olan kirişler için geçerli olduğundan, bu değişken yaylı yük ile yüklü kirişlerin durumunu kapsayan bir biçimde, $M/(V \cdot d)$ oranına göre değiştirmek daha uygun olacaktır [25].

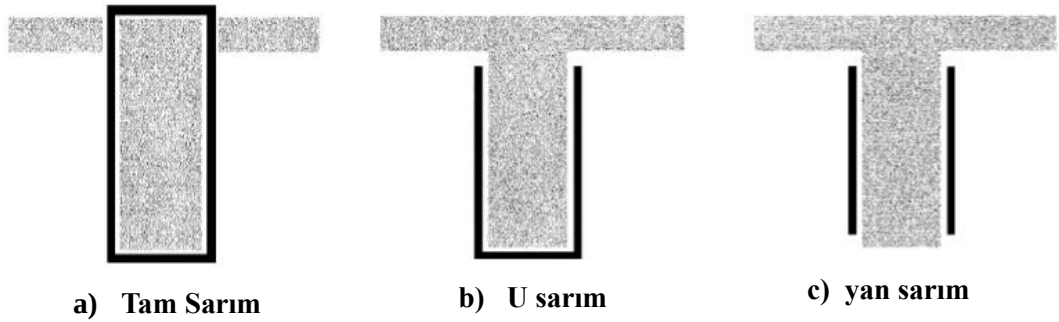


Şekil 2.3. (a)-(d) değişik a/d oranlarına bağlı olarak kesme kırılması

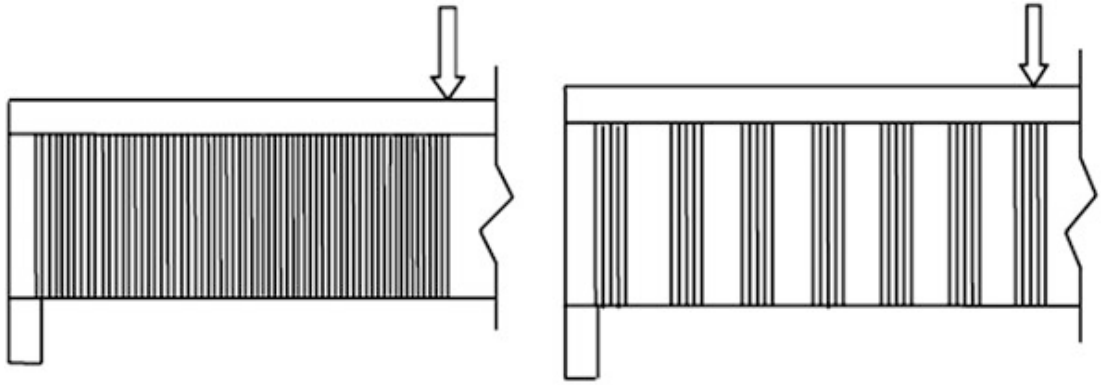
2.3. FRP ile Kesmeye Karşı Güçlendirme Yöntemleri

Dikdörtgen kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için kullanılan üç tip FRP sarım yöntemi Şekil 2.4.'te gösterilmektedir. FRP kompozitleri ile elemanın etrafına tamamen sarması en verimli sarım yöntemidir (Şekil 2.4.a.). Kolonun dört tarafına erişim genellikle kolay olduğundan, kolon uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemdir. Kiriş uygulamalarında, eğer döşeme kirişin tamamen sarılmasını imkansız kılıyorsa, FRP kompozitler ile kesitin üç yüzeyine (Şekil 2.4.b.) sararak ya da kesit gövdesinin iki karşıt tarafına yapıştırarak (Şekil 2.4.c.) kesme dayanımı artırılabilir [19].

Her üç sarım tekniğinin elemanın kesme dayanımını arttırdığı bilinmesine rağmen, kesitin tamamen sarılması en verimli olanı, ardından üç taraflı (U sarım), sonra da kirişin iki karşıt tarafına yapıştırılması en az etkili olan yöntemdir. Tüm sarım yöntemlerinde, FRP sistemi elemanın açıklığı boyunca kesintisiz olarak monte edilebilmekte veya ayrı şeritler halinde yerleştirilebilmektedir (Şekil 2.5.).



Şekil 2.4. FRP kompozitler kullanılarak kesme güçlendirmesi için tipik sarım yöntemleri [19]

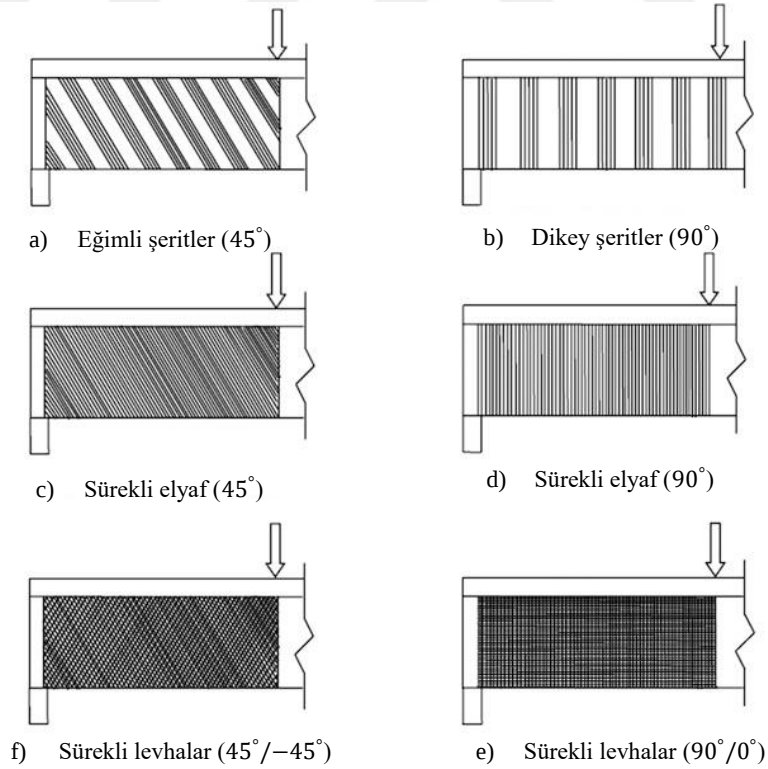


a) Sürekli levhalar

b) Şerit halinde

Şekil 2.5. Kirişlerin sarımında kullanılan FRP biçimleri [27]

FRP kompozitteki lifler tek yönlü olabilmekte, FRP yönelimi dikey şeklinde (kirişin boylamasına eksenine 90° olarak) veya beklenen kesme çatlağına dikey şeklinde yerleştirebilmektedir (kirişin boylamasına eksenine 45° olarak). Ayrıca, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, FRP elyafı çeşitli yönlerde yönlendirilebilmektedir [27].

a) Eğimli şeritler (45°)b) Dikey şeritler (90°)c) Sürekli elyaf (45°)d) Sürekli elyaf (90°)f) Sürekli levhalar ($45^\circ/-45^\circ$)e) Sürekli levhalar ($90^\circ/0^\circ$)

Şekil 2.6. elyaf yönlendirme türleri [27]

2.4. FRP ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kesme Dayanım Hesabı

Dünyanın en çok kullanılan tasarım kodları ve önerileri, betonun, enine kesme donatısının ve FRP'nin katkılarının basit toplamını kullanarak nominal kesme dayanımı belirlemektedir (Denklem 2.1):

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (2.1)$$

Burada V_n : nominal kesme mukavemeti, V_c : betonun nominal kesme mukavemeti, V_s : çelik etriyelerin nominal kesme mukavemeti ve V_f : FRP şeritlerin nominal kesme mukavemetidir. Denklem 2.1'de verilen denklem bileşenlerinin birbirinden bağımsız oldukları birçok araştırmacı tarafından sorgulanan varsayımlardan biridir. Chen ve ark. (2010), çelik etriye ve FRP'nin maksimum kesme katkılarına aynı anda erişmeyeceği sonucuna varmışlardır [24]. Böylece, birleşik katkıları, V_f ve V_s 'nin ilgili gerçek maksimum değerlerinin toplamından daha az olabilmektedir. Kesme dayanımının doğru değerlendirilmesi için, çelik enine donatı ve FRP şeritlerinin toplam katkısının maksimum değerinin belirlenmesini önermişlerdir. Bousselham ve Chaallal [23] ve Pellegrino ve Modena [28] [29], çelik kesme donatısının oranının, FRP kompozitler kullanılarak kesme güçlendirmesinin etkinliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Özellikle, iç çelik kesme takviyesi ile dış FRP kesme takviyesi arasındaki eksenel rijitlik oranındaki artışla, FRP güçlendirme tekniğinin verimliliği azalmaktadır.

FRP ile güçlendirilmiş betonarme yapılar için bulunan çeşitli modellerde, FRP kompozitlerinin (V_f) katkısının hesaplanmasında çeşitli denklemler önerilmiştir. Ayrıca, beton (V_c) ve çelik (V_s) katkılarının hesaplaması için betonarme yapıların tasarımında mevcut yönetmelik ve tasarım kodlarının kullanılmasını önermektedir (örneğin, ACI 318 [30] ve TS 500 [31] ve sayrı). V_c ve V_s 'nin kesme katkısını hesaplamak için ACI 318 tarafından önerilen model, Denklem 2.2-2.4'te verilmiştir:

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_c}}{6} b_w d \quad (2.2)$$

$$V_s = A_{sw} f_{yw} k \frac{d}{s} \quad (2.3)$$

$$V_r = V_c + V_s \quad (2.4)$$

FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarının kesme davranışı üzerinde önemli etkiye sahip parametreleri Modifi ve Chaallal [32] tarafından incelenmiştir. Bu parametrelerden biri, V_f 'nin hesaplanmasında uygulanması gerektiği sonucuna varılan kesme çatlağının açısıdır. Lima ve Barros (2011), toplanan çeşitli deneysel araştırma verilerinin aracılığıyla güvenilirlik analizi yapmışlardır [33]. Araştırmanın sonucunda, kritik kesme çatlak açısının, güçlendirilmiş kiriş içindeki mevcut kesme takviyesine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, tasarım kodları tarafından önerilen değerden oldukça farklı olabilmektedir.

Deneysel sonuçlar ile analitik sonuçlar arasındaki karşılaştırma Denklem 2.5-2.7 ile ifade edilmektedir:

$$V_{R,test}^{ref} = V_c + V_s \quad (2.5)$$

$$V_{R,test}^{güç} = V_c + V_s + V_{f,test} \quad (2.6)$$

$$V_{f,test} = V_{R,test}^{güç} - V_{R,test}^{ref} \quad (2.7)$$

Denklem 2.2'de bulunan $V_{R,test}^{ref}$; güçlendirilmemiş referans kontrol kirişinin deneysel kesme dayanımı, $V_{R,test}^{güç}$; FRP ile güçlendirilmiş kirişin deneysel kesme dayanımı ve $V_{f,test}$; FRP'nin toplam kesme dayanımına katkısıdır.

Aşağıdaki bölümlerde, FRP kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesinde kullanılan analitik modeller sunulmuştur. Bu çalışmada Chen-Teng modeli [34] [35], Khalifa-Nanni modeli [36], ACI 440.2R [19] ve Fib-TG 9.3 [20] yönetmelikleri tarafından kesme dayanımının hesaplanmasında önerilen modeller kullanılmıştır.

2.4.1. ACI 440.2R

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) kar amacı gütmeyen bir teknik topluluk ve standartlar geliştiren bir organizasyondur. ACI tarafından betonarme yapı elemanlarını FRP kompozitler ile güçlendirmek için sunulan ACI 440.2R en kapsamlı ve en yaygın yönetmeliklerden biridir [19].

FRP Kompozit ile güçlendirilmiş beton elemanın tasarım kesme dayanımı, gerekli kesme dayanımını geçmelidir (Denklem. 2.8). FRP betonarme elemanın gerekli kesme dayanımı ACI 318-05 [30] tarafından verilen yük faktörleriyle hesaplanmalıdır. Tasarım kesme dayanımı, ACI 318-05'teki belirtilen nominal kesme dayanımını, dayanım azaltma faktörü Φ ile çarparak hesaplanmalıdır (Denklem 2.8).

$$\Phi V_n \geq V_u \quad (2.8)$$

FRP ile güçlendirilmiş bir beton elemanın nominal kesme dayanımı, takviye çeliği (etriye, bağ veya spiraller) ve betondan gelen katkılara, FRP kompozitin katkısı ilave edilerek belirlenebilmektedir (Denklem 2.9). Aynı zamanda FRP sisteminin katkısına azaltma faktörü Ψ_f ilave edilmelidir.

$$\Phi V_n = \Phi (V_c + V_s + \Psi_f V_f) \quad (2.9)$$

Bousselham ve Chaallal (2006) [23] ve Pellegrino ve Modena (2002) [28] çalışmalarından gelen veriler kullanılarak ve yapılan güvenilirlik analizlerine dayanarak, 0.85'lik azaltma faktörü Ψ_f , FRP ile U sarım veya yan sarım (iki karşı taraf) güçlendirme şemaları için önerilmektedir. FRP ile tamamen sarılmış betonarme elemanlar ise 0.95'lik azalma faktörü Ψ_f önerilmektedir.

FRP sisteminin elemanın kesme dayanımına katkısı, fiber oryantasyonuna ve varsayılan çatlak biçimine dayanmaktadır [36]. FRP laminatları ve şeritleri için kesme güçlendirme hesaplamalarında kullanılan boyutsal değişkenleri Şekil 2.7. göstermektedir. FRP takviyesi tarafından sağlanan kesme mukavemeti, varsayılan çatlak boyunca FRP'deki çekme gerilmesinden kaynaklanan kuvvetin hesaplanmasıyla

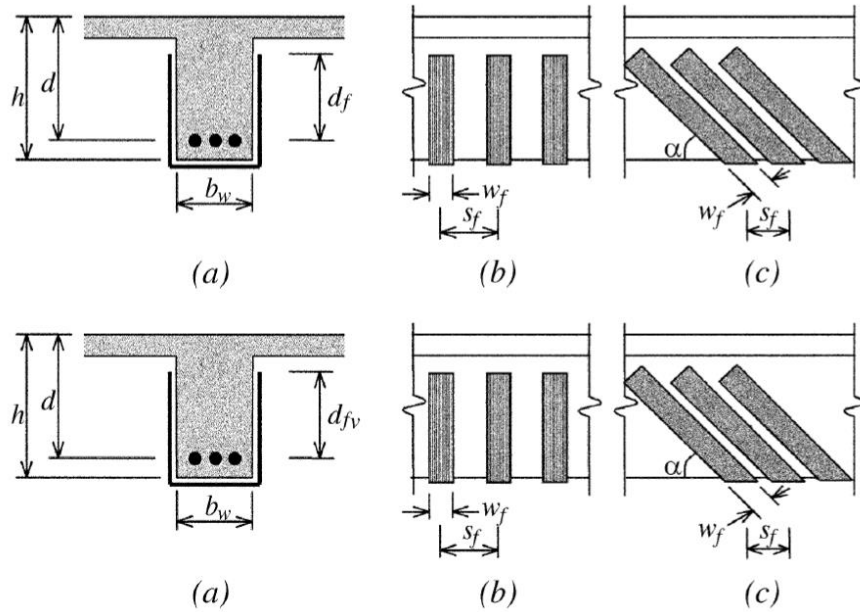
belirlenebilmektedir. FRP kesme takviyesinin kesme katkısı Denklem 2.10'da verilmiştir [19].

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (2.10)$$

Burada V_f : FRP'nin kesme kapasitesine katkısı, f_{fe} : FRP'nin tabakasında oluşan çekme gerinmesi, d_{fv} : FRP kesme takviyesinin etkili derinliği ve s_f : FRP şerit eksenlerinin arasındaki mesafesidir.

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (2.11)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (2.12)$$



Şekil 2.7. FRP kompozitler ile kesme güçlendirmesinde kullanılan boyutsal değişkenler [19]

FRP kompozit etkili gerinme ε_{fe} , FRP sisteminde nominal dayanımda elde edilebilecek en yüksek gerinimdir, aynı zamanda FRP sisteminin ve güçlendirilmiş betonarme elemanın göçme tipi tarafından yönetilmektedir.

FRP ile tamamen sarılmış betonarme kiriş elemanlar ε_{fe} Denklem 2.13-a ile hesaplanmaktadır:

$$a) \quad \varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad (2.13-a)$$

U sarım veya yan sarım durumlarda etkili gerinme, kesme hesaplanmasında aderans azaltma katsayısı K_v kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$b) \quad \varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (2.13-b)$$

Beton yüzeyine FRP'nin aderans katsayısı, Denklemler 2.14-2.17 ile hesaplanabilmektedir.

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.14)$$

$$L_e = \frac{23,300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \quad (2.15)$$

Ayrıca aderans azaltma katsayısı, sırasıyla beton mukavemetini ve kullanılan sargı şema tipini açıklayan k_1 ve k_2 olmak üzere iki modifikasyon faktörüne dayanmaktadır. düzeltme faktörleri için ifadeler, Denklem 2.16-2.17'de verilmiştir.

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} \quad (2.16)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & U \text{ sarım durumlarda} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & Yan \text{ sarım durumlarda} \end{cases} \quad (2.17)$$

2.4.2. Fib-TG 9.3

Avrupa fib Bülteni 14 (fib-TG 9.3 [20]), FRP'nin kesme kapasitesine katkısının hesaplanması için Triantafillou ve Antonopoulos (2000), tarafından önerilen analitik bir modeli kullanan bir yönetmeliktir [37]. Bu yönetmelik, FRP özelliklerini, FRP uygulama yöntemlerini ve farklı malzeme güvenliği faktörlerini dikkate almaktadır.

Fib-TG 9.3 tarafından önerilen FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin hesaplama modeli Denklem 2.18'de verilmiştir [20]:

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (2.18)$$

Burada V_{fd} , FRP'nin kesme kapasitesine katkısı, $\varepsilon_{fd,e}$ FRP kompozitin etkin birim uzama tasarım değeri, θ diyagonal çatlak açısı (45°), α güçlendirilen eleman eksenine göre FRP kompozit uygulama açısıdır. FRP'nin etkin birim uzaması, $\varepsilon_{fd,e}$, Denklem 2.19 - 2.20 ile hesaplanmaktadır:

a) Tam sarım elemanlar durumlarda:

$$\varepsilon_{fd,e} = 0,17 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \quad (2.19)$$

b) Yan veya U sarım durumlarda:

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} ; 0,17 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (2.20)$$

Burada ε_{fu} azami birim uzama değeri, E_{fu} FRP'nin elastisite modülü, ρ_f FRP kompozitin güçlendirme oranıdır. FRP kompozitin güçlendirme oranı (ρ_f) Denklem 2.21 – 2.22 ile hesaplanmaktadır:

a) FRP kumaş ile sürekli sarılmış elemanlar durumlarda:

$$\rho_f = 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \alpha}{b_w} \quad (2.21)$$

b) Şeritler şeklinde sarım durumunda:

$$\rho_f = \left(2 \cdot \frac{t_f}{b_w}\right) \cdot \left(\frac{b_f}{s_f}\right) \quad (2.22)$$

2.4.3. Chen ve Teng model

Chen ve Teng modeli [34] [35] FRP kesme güçlendirilmiş betonarme elemanlar için yaygın olarak kullanılan modellerdendir. Kesme kapasitesi, elyaf kopması ve elyaf sıyrılması iki elyaf göçme türüne göre değerlendirmişlerdir. Yan sarım konfigürasyon durumunda, elyaf sıyrılmaktadır. Tam sarım konfigürasyon durumunda elyaf kopması modu dikkate alınmalıdır. U mantolama ise kesme kapasitesi her iki moda göre değerlendirilmeli ve en küçük değer kullanılmalıdır.

FRP kompozitlerin kesme dayanımına katkısı Denklem 2.23'te verilmiştir:

$$V_f = 2 \cdot f_{frp,e} \cdot t_f \cdot w_f \cdot \frac{h_{frp,e}(\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s_f} \quad (2.23)$$

$$f_{frp,e} = D_{frp} \cdot \sigma_{frp,max} \quad (2.24)$$

Burada $f_{frp,e}$ FRP kompozitin etkin gerinme, θ diyagonal çatlak açısı (45°), α güçlendirilen eleman eksenine göre FRP kompozit uygulama açısı, $\sigma_{frp,max}$, FRP'deki maksimum gerinme ve D_{frp} gerinme dağılım faktörüdür. $\sigma_{frp,max}$ Denklem 2.25 – 2.26 ile hesaplanmaktadır:

a) Elyaf sıyrılması durumlarda:

$$\sigma_{frp,max} = \min \left\{ \begin{array}{c} f_{frp} \\ 0,315 \cdot \beta_w \cdot \beta_L \cdot \sqrt{\frac{E_{frp} \cdot \sqrt{f'_c}}{t_f}} \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

b) Elyaf kopması/yırtılması durumlarda:

$$\sigma_{frp,max} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0.8 f_{frp} & \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \leq \varepsilon_{max} \\ 0.8 f_{frp} E_{frp} & \frac{f_{frp}}{E_{frp}} > \varepsilon_{max} \end{array} \right\} \quad (2.26)$$

$$L_{max} = \min \left\{ \begin{array}{ll} \frac{h_{frp,e}}{\sin \alpha} & \text{U sarım} \\ \frac{h_{frp,e}}{\sin \alpha} & \text{Yan sarım} \end{array} \right\} \quad (2.27)$$

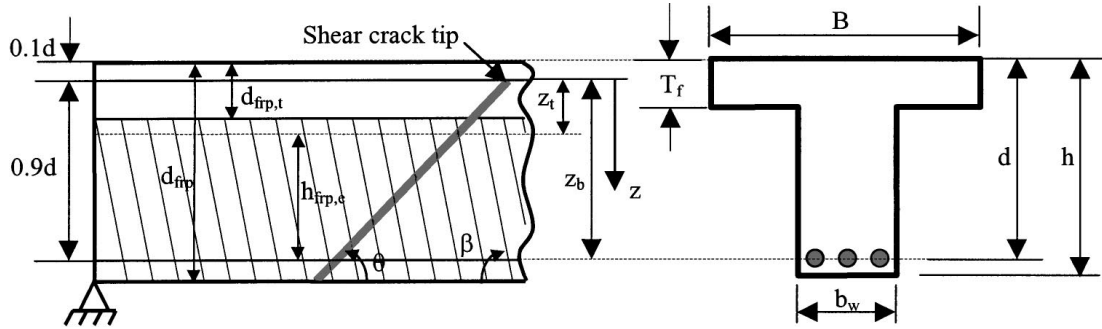
f_{frp} , FRP'nin nominal çekme dayanımı, $h_{frp,e}$, FRP'nin etkin uzunluğudur.

$$h_{frp,e} = Z_b - Z_t \quad (2.28)$$

$$Z_t = d_{frp,t} \quad (2.29)$$

$$Z_b = 0,9 d - (h - d_{frp}) \quad (2.30)$$

Burada Z_t ve Z_b , etkin FRP'nin üst ve alt uçlarının koordinatları, $d_{frp,t}$ basınç yüzeyinden FRP'nin üst ucuna olan mesafedir. h , kirişin derinliği ve d_{frp} , basınç yüzeyinden FRP'nin alt kenarına olan mesafedir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Chen ve Teng tarafından genel kesme güçlendirme şemasının gösterimi [34] [35]

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \lambda \geq 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda}{2} & \lambda < 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e} \quad (2.32)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{frp} t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (2.33)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2-w_f/(s_f \cdot \sin \alpha)}{1+w_f/(s_f \cdot \sin \alpha)}} \quad (2.34)$$

$\varepsilon_{max} = \%1,5$ kullanılması önerilmektedir (diğer özel öneriler mevcut değilse) [34] [35].

2.4.4. Khalifa ve Nanni modeli

Khalifa ve Nanni modeli yapmış oldukları çalışmada FRP'nin kesme katkısını hesaplamak için Denklem 2.35'i önermişlerdir.

$$V_f = \frac{A_f f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (2.35)$$

Khalifa ve ark. (1998), FRP'nin etkin gerinmesini, indirgeme faktörü (R) kullanılarak nihai FRP mukavemetinin fraksiyonu olarak ifade etmişlerdir [36].

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} \quad (2.36)$$

İndirgeme faktörünün değerinin (R) hesaplanması için üç gereksinim sağlanmıştır. FRP etkin gerinim ilk limit durumunu yönetmektedir. Triantafillou tarafından yapılan çalışmada, FRP'nin eksenel rijitliği ile FRP'nin etkin gerinimi arasında bir ilişki sunulmuştur [38]. Khalifa ve ark. (1998), daha fazla test sonucu eklemek için modeli modifiye etmiştir [36]. FRP kumaş kopmasının limiti, aşağıdaki gibi bir polinom denklemi şeklini almaktadır:

$$R = 0.5622(\rho_f E_f)^2 - 1.2188(\rho_f E_f) + 0.778 \quad (2.37)$$

Burada ρ_f FRP'nin kesme takviye oranı ve Denklem 2.38 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_f = \left(2 \frac{t_f}{b_w}\right) \left(\frac{w_f}{s_f}\right) \quad (2.38)$$

İkinci limit, beton yüzeye yapıştırılmış FRP tabakasının bağ mekanizmasından gelmektedir ve Denklem 2.39 ile hesaplanmaktadır:

$$R = \frac{0,0042(F_c')^{2/3} w_{fe}}{(E_f t_f)^{0.58} \varepsilon_{fu} d_f} \quad (2.39)$$

w_{fe} , FRP'nin etkili genişliğidir ve kesme çatlak açısına (45° olduğu varsayılmıştır) ve bağlanmış yüzey konfigürasyonuna bağlıdır (Şekil 2.9.). w_{fe} 'nin değeri Denklem 2.40 ve Denklem 2.41'den hesaplanabilmektedir.

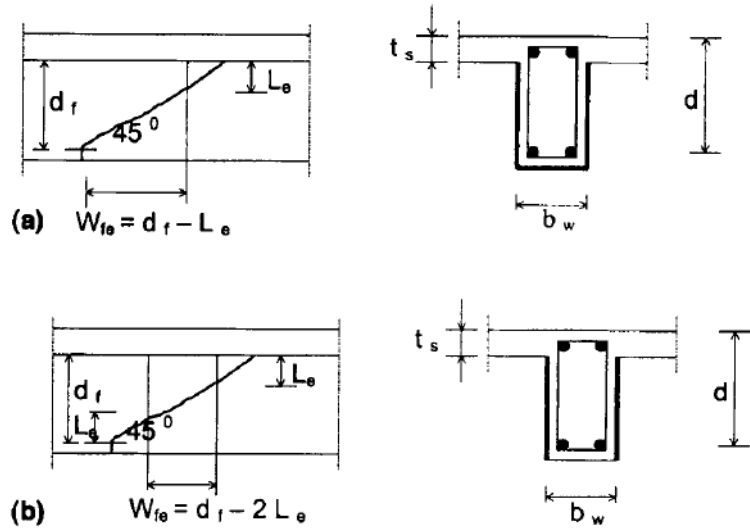
a) U şeklinde mantolama durumlarda:

$$w_{fe} = d_f - L_e \quad (2.40)$$

b) Kiriş gövdesine yan bağlama durumlarda (Yan sarım):

$$w_{fe} = d_f - 2L_e \quad (2.41)$$

Tam sarım durumlara bu yaklaşım uygun değildir ve ihmal edilebilmektedir.



Şekil 2.9. FRP'nin etkin genişliği: (a) U mantolama durumlarda; (b) yan sarım durumlarda

Deneyssel verilere dayanarak, etkin bağ uzunluğunu tahmin etmek için üstel denklem önerilmiştir. FRP'nin etkin bağ uzunluğu (L_e) FRP tabakasının kalınlığının ve FRP'nin elastik modülünün bir fonksiyonu olarak Denklem 2.42'de verilmiştir. FRP tabakanın sertliği arttıkça, etkin bağ uzunluğu azalmaktadır.

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E_f)} \quad (2.42)$$

Üçüncü limit, betonun kesme bütünlüğünü sağlamaktadır. Deneyim ve genel uygulama ile, indirgeme faktörünün üst sınırı $R = 0,5$ olarak alınmıştır. İndirgeme faktörünün (R) değeri, üç limit arasında en düşük değeri olarak alınmalıdır.

2.5. Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Çalışmalar

Konuyla ilgili literatürde bulunan çalışmalarda genelde CFRP kompozitler ve GFRP kompozitler kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Berset (1992), Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde kesmeye karşı cam elyaf kumaş (GFRP) kullanarak 750 mm boyuna sahip ve 114×102 mm kesitli 6 basit mesnetlenmiş kiriş numunelerin üzerine 3 noktalı eğilme deneyi gerçekleştirmiştir. Kiriş

numunelerin 3 tanesini enine donatı (etkiye) ile güçlendirmiş diğerlerinde ise etkiye hiç kullanmamıştır. Kirişlerin kesme bölgelerini yan yüzeylere farklı kalınlığında dik yapıştırılmış GFRP sürekli levha ile kesmeye karşı güçlendirmiştir. Güçlendirilmiş numuneler ile güçlendirilmemiş dikdörtgen kirişleri test etmiş ve GFRP kompozitin kesme kapasitesine katkısı için basit bir analitik model geliştirmiştir. Deney sonuçları, GFRP ile güçlendirilen etriyeli kiriş numunelerin, kontrol numuneye göre kesme kapasitesinde %33 ile %68 arttığı, GFRP ile güçlendirilen etriyesiz kiriş numunelerin, kontrol numuneye göre kesme kapasitesinin ise %20 arttığını gözlemlemiştir [12].

Uji (1992), deney kirişlerinin etrafını tamamen FRP kumaşlar ile sararak kesmeye karşı harici olarak güçlendirilmiş sekiz adet dikdörtgen kesitli kiriş üzerinde deneysel araştırma yapmıştır. Etriye olmayan kirişler FRP ile güçlendirildiğinde kirişlerin kesme kapasitesinde önemli ölçüde artış olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca hem etriyeler hem de FRP ile güçlendirilen iki kirişin, FRP ile güçlendirmemiş kirişlerden daha küçük gerilme değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiş ve testler boyunca etriyeler akma davranışı göstermemiştir [39].

Al-Sulaimani ve ark. (1994), GFRP kumaş ve şeritleri kullanarak U sarım ve yan sarım yöntemleri ile güçlendirilen 16 küçük ölçekli dikdörtgen kiriş üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Testlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, U sarım yönteminin güçlendirmeye %80 etkisinin olduğu sonucuna varmışlardır [13].

Sato ve ark (1996), yan sarım ve U sarım yöntemleri ile CFRP kumaş kullanarak güçlendirilmiş altı dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, CFRP kullanımının kayma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, U Sarım yöntemi ile CFRP kumaş kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişlerin, yan sarım yöntemi ile kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişlerden daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Taerwe ve ark. (1997), sürekli levhalar veya şeritler gibi farklı FRP dağılımlarına sahip U sarım şeklinde FRP levhalar ile güçlendirilmiş beş dikdörtgen kiriş üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deney sonunda dört kirişte kesme göçmesi ve bir

kirişte de eğilme kırılması gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, FRP kompozitlerin kullanılması durumunda, etriyelerin kullanılmasına benzer bir şekilde kirişin kesme kapasitesinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmışlardır [8].

Funakawa ve ark. (1997), harici olarak FRP tabakalar ile tam sarım şeklinde güçlendirilmiş dört adet dikdörtgen kesitli kiriş üzerinde deneysel araştırmalar yapmışlar ve kirişlerin FRP kopması ile göçmüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Testlerde çeşitli kalınlıklarda FRP levhalar kullanılmış ve kesme kapasitesinin artmasının FRP kalınlığının artmasına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kirişin göçtüğü anda FRP elyafların nihai çekme dayanımına ulaşmadığını gözlemlemişlerdir [40].

Araki ve ark. (1997), çelik etriye, farklı elyaf tipleri ve farklı miktarda FRP kullanarak tam sarım yöntemi ile güçlendirilmiş 13 adet dikdörtgen kesitli kiriş üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, göçme şeklinin diyagonal gerilme yenilmesi olduğu sonucuna varmışlardır. Güçlendirilmiş kirişlerde kesme yüküne ulaşıldığında FRP tabakalarının kopması gözlenmemiş, ancak kesme yüküne ulaştıktan sonra kirişlerin çoğunda FRP tabakalarının koptuğu gözlenmiştir [41].

Norries ve ark. (1997), 127×203 mm dikdörtgen kesitine sahip 19 adet betonarme kiriş numuneleri üretmişlerdir. CFRP sürekli levha ile farklı elyaf yönelim uygulanarak hem eğilme yüzeyine hem de yan yüzeylerine yapıştırarak güçlendirilmiş hasar görmüş veya düşük dayanımlı beton özelliklerine sahip kiriş numunelerin davranışlarını hem deneysel hem de analitik olarak incelemişlerdir. Test sonuçlarına dayanarak, CFRP lifleri kirişteki oluşan çatlaklara dik olarak yerleştirildiğinde, mukavemet ve sertlikte büyük artış gözlemlendiği ve göçme şeklinin kırılkan olduğu, lifin kirişteki oluşan çatlaklara eğik olarak yerleştirildiği zaman ise, mukavemet ve sertlikte daha küçük artış gözlemlendiği, ancak göçme şeklininse sünek olduğu sonucuna varmışlardır [9].

Chaallal ve ark. (1998), 1300×150×250 mm (Uzunluk × Yükseklik × Genişlik) boyutlarında 8 adet kiriş numune üretmişlerdir. Harici olarak tek doğrultulu CFRP şeritler kullanarak, 45° ve 90° elyaf yönelim uygulanarak yan yüzeylere yapıştırılmış, kesmeye karşı güçlendirilmiş 6 adet kiriş numune üzerinde hem deneysel hem de analitik çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, kullanılan güçlendirme yönteminin, kesme çatlaklarını önemli ölçüde azaltırken, kesme güçlendirmesinin etkinliğini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, diyagonal yan şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişler, dayanım, sertlik ve çatlak ilerlemesi açısından dikey yan şeritlerle güçlendirilenlerden daha iyi performans göstermişlerdir. Ayrıca, ACI 318-95 [30] formatında FRP kompozitlerin kesme katkısını hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermişlerdir [10].

$$V_f = \phi_f A_f f_f \frac{(\sin \beta + \cos \beta) d}{s_f}$$

Burada f_f : FRP'nin çekme dayanımı, $\phi_f = 0.8$ FRP için malzeme azaltma faktörü, A_f : çift FRP şeridinin kesit alanıdır, β : elyaf oryantasyonunun kiriş yüzeyine açısıdır, d : kirişin etkili derinliği ve s_f : FRP şeritlerin eksenlerinin arasındaki mesafedir.

Triantafillou (1998), FRP kullanarak betonun kesmeye karşı güçlendirilmesine ilişkin veri tabanını arttırmak amacıyla birtakım çalışmalar yapmış ve nihai limit durumuna dayanan bu tür malzemelerin tasarımı için analitik model geliştirmiştir. Deneysel çalışmalar, farklı elyaf konfigürasyonlarda ve çeşitli alan fraksiyonlarında CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmiş 1000×100×70 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli 9 adet kiriş numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda; güçlendirme tekniğinin etkinliğinin, FRP eksenel rijitliği ile doğrusal artış gösterdiğini görmüştür. Analitik çalışmada ise, çelik etriye ile benzer şekilde FRP'nin kesme kapasitesine katkısı için bir model oluşturmuştur [38].

$$V_f = \frac{0,9}{\gamma_f} \rho_f E_f \varepsilon_{fe} b_w d (1 + \cot \beta) \sin \beta$$

Denkleimde kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır.

E_f = FRP'nin elastisite modülü,

$\rho_f = \frac{t_f}{b_w}$; FRP'nin alan fraksiyonudur ve t_f = elyafın kalınlığı ve b_w = betonarme kiriş kesitin genişliğidir.

γ_f = CFRP, AFRP ve GFRP için sırasıyla yaklaşık 1.15, 1.20 ve 1.25 olduğu önerilen FRP'nin çekme dayanımı için kısmi güvenlik faktörüdür (Triantafillou and Fardis 1997). ε_{fe} = kirişin göçme anındaki FRP'nin etkili gerinmesidir.

Khalifa ve ark. (1999), harici olarak bağlanmış CFRP sürekli levhalar ve şerit şeklinde güçlendirilmiş kesmeye karşı yetersiz iki sürekli açıklığa sahip olan 150×305 mm dikdörtgen kesitli 9 adet betonarme kirişlerin davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmada değişken parametreler, enine kesme donatısı miktarı ve CFRP kompozit miktarıdır. Bu doğrultuda kirişler 4 nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Araştırmacılar, harici olarak bağlanmış CFRP'nin, kirişlerin pozitif ve negatif moment bölgelerinde kesme kapasitesini arttırmak için kullanılabileceği, ayrıca kesme mukavemetinde %22 ila %135 arasında bir artış sağlayabileceği sonucuna varmışlardır [42].

Taljsten ve Elfren (2000), CFRP kumaşları ve şeritleri farklı yöntem ve şekillerde uygulayarak tam ölçekli 180×500 mm dikdörtgen kesitli, 4500 mm boyuna sahip olan ve yaklaşık 50 MPa beton basınç dayanımına sahip olan 8 adet betonarme kirişleri 4 noktalı eğilme deneyi ile test etmişlerdir. Deneylerini iki amaca yönelik yapmışlardır: birincisi; kirişlerin kesme kapasitesini hem güçlendirilmeden önce hem de güçlendirildikten sonra incelemişler, ikincisi; kumaşların uygulanmasın da üç farklı yöntemin etkisini (elle yatırma sistemleri, vakum enjeksiyon sistemi ve prepreg sistemi) incelenmiştir. Araştırmacılar, betonarme kirişleri kesmeye karşı CFRP kompozitler ile güçlendirmenin, yaklaşık olarak %300 oranında güçlendirmeye katkısının olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, tamamen kırılmış kirişlerle %100'e ulaşmak bile mümkündür [43].

Li ve ark. (2001), CFRP kumaş ve şeritler kullanarak; stres dağılımı, ilk çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve nihai dayanımı incelemek üzere, farklı sarım yöntemi ile kesmeye karşı güçlendirilmiş 5 adet 1300 mm boyuna sahip ve 130×200 mm dikdörtgen kesitine sahip olan betonarme kirişler üretmişler ve bu numuneleri 4 noktalı eğilme deneyi ile test etmişlerdir. Testlerin sonuçlarına dayanarak, kesme bölgesindeki CFRP şerit veya kumaş alanı arttırıldığında kirişin sertliğinin arttığı ve kirişin tüm yan yüzeylerinin güçlendirilmesinin gerekli olmadığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yan yüzleri CFRP ile güçlendirme, betondaki oluşan ilk çatlakların görünümünü geciktirmiş ve kontrol kirişlere kıyasla nihai dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır [44].

Khalifa ve Nanni (2002), CFRP levhalar ve şeritler ile harici olarak güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz olacak şekilde üretilmiş 3050 mm boyuna sahip olan 150×305 mm dikdörtgen kesitli 12 adet betonarme kirişin kesme davranışlarını ve göçme şekillerini incelemişlerdir. Deney elemanlarını etriyeli ve etriyesiz olmak üzere iki ana gruba ayırmış olup her grubu farklı şekillerde CFRP kompozitler ile güçlendirmişlerdir. Çalışmada incelenen parametreler arasında enine çelik donatı, kesme açıklığı-etkili derinlik oranı (a/d), CFRP kompozitin miktarı ve dağılımı yer almaktadır. Deneysel sonuçlara dayanarak harici olarak bağlanmış CFRP kompozitin katkısının, kesme mukavemetini %40 ila %138 arasında önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varmışlardır [5].

Li ve ark. (2002), kiriş uzunluğunun üçte birinde yükleme noktası olan CFRP kumaşlar ile güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş olan tam ölçekli 130×300 mm dikdörtgen kesitli ve 2700 mm boyuna sahip olan 16 adet betonarme kiriş üzerinde deneysel çalışma yapmışlar ve FRP'nin kesmeye etkisini incelenmiştir. Kiriş gövde donatısı, kiriş uzunluğunun üçte ikisi boyunca 100 mm aralıklı 6 mm çaplı etriyelerden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Kısa kesme açıklığı bölgesindeki etriyelerin arasındaki mesafe 800, 400 ila 100 mm arasında değişmektedir. Deney sonuçlarına dayanarak boyuna çelik çubuk alanları ve etriyelerin aralığı azaldıkça, CFRP kumaşlarının nihai dayanım üzerindeki katkısının azaldığı sonucuna varmışlardır [45].

Pellegrino ve Modena (2002), CFRP kumaş ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme davranışlarının modellenmesini araştırmışlar ve aynı zamanda, enine çelik donatıya sahip olan ve olmayan $2700 \times 300 \times 150$ mm (Uzunluk $\times$ Yükseklik $\times$ Genişlik) ebatlı 11 adet kirişin her iki tarafına da yapıştırılmış farklı miktarda CFRP kompozitin kesme güçlendirmesine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Kiriş numuneler 4 nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Deney sonuçları, CFRP kompozit ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme kapasitesinin genel olarak arttığını göstermiştir [28].

Taljsten (2003), yapmış olduğu çalışmada, CFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımını belirlemek için analitik bir çalışma sunmuş ve bu yöntemi test edilmiş dikdörtgen betonarme kirişlerin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Kirişlerde CFRP kompozitlerinin kesme güçlendirmesine etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada, ilk olarak CFRP şeritler tarafından sağlanan kesme dayanımını hesaplamak için bir model oluşturulmuştur. Analitik yöntem ile test sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Test sonuçlarına dayanarak CFRP kumaş veya laminatların kesme çatlağına dik yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Ayrıca, strengeç sonuçlarına dayanarak kullanılan lif inceldikçe kumaşın daha iyi performans sağladığını görmüştür [46].

Adhikary ve ark. (2004), kesme takviyesi sahip olmayan ancak CFRP kompozit ile sarılarak güçlendirilmiş 2600 mm boyunda, 150×200 mm kesitinde 8 adet kiriş üzerinde deneysel araştırma yapmışlardır. Ayrıca, elyafların sıyrılmasını geciktirmek veya önlemek için kirişin üst yüzeyine elyaf boyunun uzatılmasının etkisini incelenmişlerdir. Test parametreleri elyaf türleri, sarım şemaları ve ankraj uzunluğudur. Deneysel çalışmada, kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme altında dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına dayanarak ankraj ile bağlanmış FRP şeritlerin U sarım yönteminden daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, CFRP kumaşın kiriş eksenine yatay ve dik uygulandığı deney elemanının dayanımı, CFRP kumaşın kiriş eksenine yatay uygulandığı deney elemanından %11 fazladır. U şeklinde sürekli levha uygulanan deney elemanının kesme dayanımı, CFRP kumaşın sadece kirişin yan yüzlerine yapıştırıldığı deney elemanından %17 fazladır. Kesme açıklığı boyunca U şeklinde sürekli levha

yapıştırılan deney elemanın kesme dayanımında kontrol kirişine göre %119 oranında artış izlenmiştir [47].

Zhang ve ark. (2004), CFRP laminat ile harici olarak güçlendirilmiş 915 mm boyunda, 101,6×228,6 mm kesitinde 16 adet kiriş numune üzerinde deneysel araştırma yapmışlardır. Kiriş numuneleri 4 gruba ayrılmış olup her gruptan 1 adet kontrol kiriş ayrılmıştır. Birinci grup, CFRP şeritler ile kiriş eksenine 0°,45° ve 90° olarak güçlendirilmiş 3 adet etriyesiz kiriş sabit hızlı yükleme altında 3 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. İkinci grup, CFRP şeritler ile kiriş eksenine 0°,45° ve 90° olarak güçlendirilmiş 3 adet etriyeli kiriş sabit hızlı yükleme altında 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Üçüncü grup, CFRP sürekli levha ile 2 adet kiriş eksenine 90°, 1 adet kiriş eksenine 90°/0° olarak güçlendirilmiş 3 adet olmak üzere etriyesiz kiriş sabit hızlı yükleme altında 3 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Dördüncü grup, CFRP sürekli levha ile 2 adet kiriş eksenine 90°, 1 adet kiriş eksenine 90°/0° olarak güçlendirilmiş 3 adet olmak üzere etriyesiz kiriş sabit hızlı yükleme altında 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada incelenen parametreler kesme açıklığının etkili derinlik oranına etkisi, kesme davranışı üzerine CFRP türlerinin etkisi, CFRP laminatları ile güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz kirişlerin göçme şekilleridir. Test sonuçlarına göre, (a/d) oranı azaldığında, derin kirişin kesme mukavemetinin CFRP laminatları ile arttığı gözlemlenmiştir [48].

Zhang ve Hsu (2005), kesme donatısı yetersiz 11 adet kirişin her iki tarafını karbon fiber şeritler ve kumaşlarla kiriş eksenine farklı açı ile güçlendirerek deneye tabi tutmuşlardır. 152.4×228.6 mm kesit ebatlarına sahip numunelerden 5 adedi 1220 mm, 6 adedi ise 1830 mm uzunluğa sahiptirler. Kiriş numunelerinden 3 adet kiriş kontrol olarak ayrılmış olup üzerinde hiçbir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Sekiz adet numune kiriş eksenine göre sırasıyla 0°, 45° ve 90° açıyla uygulanan CFRP kompozit şeritler ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, her iki gruptan birer numune her iki yüze 0°/90° açılı elyafa sahip olan CFRP sürekli levha yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak dışarıdan uygulanan epoksi ile yapıştırılmış CFRP sistemlerinin kirişlerin kesme kapasitesini arttırdığı, ayrıca çapraz yan şeritlerin

performansının, kesme çatlağı ilerlemesi ve nihai kesme mukavemeti açısından dikey yan şeritlerden daha iyi olduğunu sonuca varmışlardır [49].

İslam ve ark. (2005), CFRP şeritler, kumaş ve şebeke kullanarak kesmeye karşı güçlendirilmiş 2000 mm boyunda, 120×800 mm kesitinde yapısal olarak yetersiz 6 derin kirişi 4 nokta eğilme deneyi ile test etmişlerdir. Kiriş numunelerden 1 adedi kontrol olarak ayrılmış, 1 adet kesme açıklık bölgesinde tek doğrultulu CFRP kumaş ile U sarım şeklinde güçlendirilmiş, 1 adet kiriş eksenine 45° açı olarak uygulanan GFRP şerit ile güçlendirilmiş ve 3 adet kiriş eksenine 45° açı olarak uygulanan GFRP şebeke ile güçlendirilmiştir. Test sonuçlarından, kesme mukavemetinin artmasının kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %40 olduğunu gözlemlemişlerdir [50].

Cao ve ark. (2005), enine donatıya sahip olan ve olmayan aynı zamanda da GFRP ve CFRP şeritler ile harici olarak kesmeye karşı tam sarım yöntemi ile güçlendirilmiş üç seri halinde 2000×150×250 mm (Uzunluk×Yükseklik×Genişlik) boyutlarında toplam 18 adet betonarme kiriş üzerinde deneysel araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışmada tüm kiriş numuneleri 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Dikkate alınan değişkenler, kesme açıklığı (a) ile etkili derinlik (d) oranı (1.4 ve 3.0 arası) ve dış FRP takviye miktarıdır. Ancak betonun basınç dayanımı tüm seriler için aynıdır. Deneysel çalışmada, kritik kesme çatlağı ile kesişen FRP şeritlerdeki gerinme dağılımı ve elyafların sıyrılmasında etkili olan kesme kapasitesi incelenmiştir. FRP gerinme dağılımının düzensiz olduğu sonucuna varmışlardır. Gerinme dağılım faktörü kullanılarak CFRP'nin sağladığı kesme dayanımını tahmin etmişlerdir [51].

Carolin ve Taljsten (2005), CFRP kumaş ile kesmeye karşı güçlendirilmiş 4,5 m uzunluğundaki etriyesiz 180×500 dikdörtgen kesitli kirişler ve 3,5 m uzunluğundaki etriyeli 180×500 dikdörtgen kesitli kirişler üzerinde deneysel araştırma yapmışlar ve yorgunluk, ankraj etkisi gibi parametreleri incelemişlerdir. Elyaf kopması/yırtılması ve ankraj başarısızlığı gibi farklı göçme şekilleri tanımlanmıştır. Ayrıca, kesme ve eğilmeye maruz kalan kirişlerin kesme açıklıklarındaki gerilme alanını da incelemişlerdir [52].

Guadagnini ve ark. (2006), betonarme kirişlerin kesme davranışını deneysel olarak incelemek üzere 6 adet 150×250 mm dikdörtgen kesitli betonarme kiriş iki ardışık test aşamasına tabi tutulmuştur (toplam 12 test). Kirişlerin yarısının eğilme bölgesi çelik çubuk donatı ile takviye edilmiş, diğer yarısı cam elyaf çubuklarla takviye edilmiştir. Farklı kesme göçmesinin türleri ve 1,1 ile 3,3 arasında değişen farklı kesme açıklığı ile etkili derinlik (a/d) oranlarıyla karakterize edilen kirişlerin kesme davranışlarındaki değişimi araştırılmıştır. Birinci aşamada kesme donatısı bulunmazken, ikinci aşamada kesme çökmesini sağlamak için harici olarak yapıştırılmış Cam ve Karbon FRP kompozit sağlanmıştır. Kiriş numuneler 4 nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Testlerin sonuçları ACI ve Yapısal Mühendisler Enstitüsü (U.K) tarafından önerilen kesme tasarım yaklaşımlarının tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, kullanılan iki yaklaşımın, betonun ve kesme donatılarının, FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin toplam kesme kapasitesine katkısını hafife aldığını göstermiştir [21].

Mosallam ve Banerjee (2007), elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitler ile dışardan güçlendirilmiş 3620×150×250 mm boyutlarında betonarme kirişlerin kesme dayanımının artırılması konusunda deneysel araştırma yapmışlardır. Deney programında güçlendirilmemiş, onarılmış ve güçlendirilmiş olarak üç farklı sınıftan oluşan toplam dokuz kiriş numunesi dört nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir. Güçlendirme ve onarım değerlendirmesinde karbon/epoksi elle ıslak yatırma (wet layup), E-cam/epoksi elle ıslak yatırma (wet layup) ve karbon/epoksi precured şeritler olmak üzere üç farklı kompozit sistem kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, kompozit sistemlerin, onarılmış ve güçlendirilmiş kirişlerin nihai dayanımında, önceden çatlamış ve güçlendirilmemiş kiriş numunelerine kıyasla önemli bir artış sağladığını göstermiştir [53].

Leung ve ark. (2007), deneysel olarak 950×180×75 mm, 1900×360×150 mm ve 3800×720×300 mm (Uzunluk×Yükseklik×Genişlik) Üç farklı boyutlarında geometrik olarak benzer 15 adet kiriş numuneler üzerinde U-sarım ve tam sarım yöntemleri kullanarak CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirmişlerdir. Kiriş numuneleri 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, U sarım şeklinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişler için eleman büyüklüğü ile güçlendirme etkinliğinin

önemli ölçüde azalabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, CFRP şeritler ile tam sarım şeklinde güçlendirilmiş kirişler için güçlendirme etkinliğinin eleman büyüklüğünden bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır [54].

Sundarraja ve Rajamohan (2009), GFRP şeritlerin genişliği, aralığı, çelik etriyelerin aralığı ve GFRP şeritlerine bağlı ek kesme kapasitesi açısından 100×150 mm kesitinde 1000 mm uzunluğuna sahip olan ve 20 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılarak 13 adet betonarme kirişlerin etkinliğini incelemişlerdir. Kirişlerden biri kesme dayanımı yüksek olarak üretilmiş, diğer 12 kiriş ise kesme donatısı yetersiz veya boyuna donatısı yetersiz olarak üretilmiştir. Kirişler U-sarım şeklinde veya kirişin yan yüzeylerine (yan sarım) kesme açısına dik olacak şekilde GFRP şeritler ile güçlendirilerek dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Çalışılan parametreler, kirişin kesme bölgesinde eğimli GFRP şeritler ile harici olarak güçlendirilmiş kirişlerin kesme güçlendirmesine etkisi, göçme şekilleri ve yük-eğilme davranışdır. Deney sonuçlarına göre, GFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuş ve GFRP kompozitlerin kesme güçlendirmede çok etkin olduğu sonucuna varılmıştır [14].

Baggio ve ark. (2014), yapmış oldukları deneysel çalışmada 150×350 mm kesitinde, 2440 mm uzunluğuna sahip ve kesmeye karşı yetersiz olarak toplam dokuz adet betonarme kiriş üretmişlerdir. Test programı, bir adet kontrol (güçlendirilmemiş) kiriş ve sekiz adet FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişten oluşmuştur. İki adet kiriş, ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritleri ile güçlendirilmiş, iki adet kiriş ankrajlı ve ankrajsız çimento esaslı elyaf takviyeli kompozit (FRCM) şebekeleri ile güçlendirilmiş ve dört adet kiriş, ankrajlı ve ankrajsız GFRP şeritlerle tamamen veya kısmen sarılmıştır. Çalışılan parametreler, üç farklı FRP kompozitin kullanımı (CFRP, GFRP ve FRCM), kullanılan FRP ankrajın türü ve FRP ile güçlendirme yöntemidir (tam derinlik U sarım - kısmi derinlik U sarım). Betonarme kirişleri 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar, FRP kompozitlerin kumaş veya şerit şeklinde uygulanmasının, toplam kesme kapasitesini arttırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, tam U şeklinde sarılı FRP tabakalar, kısmi U şeklinde sarılı FRP tabakalara kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte FRP ankrajlarının

kullanılması, kesme kapasitesini ve göçme sünekliğini daha da geliştirmiştir. Ayrıca FRP kompozitler ile güçlendirmenin, göçme şeklini kesmeden eğilme göçmesine değiştirebildiğini görmüşlerdir [6].

Sarıbıyık ve Çağlar (2016), düşük dayanımlı beton kullanılarak 150×250 mm kesitinde ve 2000 mm uzunluğunda eğilme ve kesmeye karşı yetersiz olarak toplam 21 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. Kirişlerin GFRP ve CFRP kompozitler ile onarımı ve güçlendirmesi yapmışlardır. Çalışmada CFRP yerine GFRP'nin kullanım kabiliyeti araştırmışlardır. Yapılan onarım ve güçlendirmede kirişlerin yük taşıma kapasitesi 1.5-2 kat arasında arttığı tespit edilmiştir. Eğilme ve kesme dayanımı açısından bir kat CFRP yerine iki kat GFRP kullanılması durumunda benzer dayanımlar, kiriş sünekliği ve enerji yutma kapasiteleri açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. CFRP ile yapılan güçlendirmede kirişte gevreklik sorunu ortaya çıkarken GFRP de bu sorun daha sınırlıdır. Yapılan çalışmada FRP'nin kiriş yüzeyinden betonu kopararak ayrıldığı tespit edilmiştir. Bunu önlemek için ankrajlı birleşim önermişlerdir [55].

Li and Leung (2017), CFRP şeritler ile 1,0 ila 3,5 arasında değişen (a/d) oranına sahip kesmeye karşı güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş 180×350 mm dikdörtgen kesitli toplam 12 adet kiriş üzerinde deney yapmışlardır. Kirişlerden altısı kontrol olarak alınmış, diğer 6 kiriş ise U sarım yöntemi uygulanarak CFRP şerit ile güçlendirilmiştir. Deney kirişleri 4 nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçları, FRP kesme katkısının başlangıçta (a/d) oranının 2'ye kadar yükselmesiyle arttığını, ardından a/d'nin 2'nin üzerinde olduğunda hafifçe azaldığını ortaya koymuştur [56].

Qureshi ve Saleem. (2018), epoksi ve betonun bağlanma ara yüzünde, polimer kompozitlerin (FRP) eğilme ve kesme gerilmesinin değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu amaç ile kapsamlı bir deneysel çalışma planlanmışlar ve yapısal yapıştırıcılar yardımıyla beton yüzeye karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit uygulanmışlardır. 1200×200×100 mm (Uzunluk×Yükseklik×Genişlik) boyutlarında sekiz adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üzerine harici olarak monte edilmiş, eğilme ve kesme takviyesi olarak farklı takviye oranları ile CFRP kompozit kullanılmıştır. Eğilme ve kesme gerilmeleri altında hem CFRP hem de betonun

gerilmesini değerlendirmek için beton ve CFRP şeritlerinin yüzeyine strene uygulamışlardır. Betona ve FRP kompozitlere aktarılan gerilme değerlerinin, betonun yüzeydeki gerilme özelliklerine ve yapıştırıcının bağlanma mukavemetine bağlı olduğu bulunmuştur. Test sonuçları, eğilme elemanlarındaki mukavemet artışının CFRP'nin gerilme değerlerine son derece bağlı olduğunu açıkça göstermiştir [57].



BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmada dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesmeye karşı BFRP kompozitler ile açılı şerit sarım yöntemleri ile güçlendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan beton ve güçlendirme malzemeleri, güçlendirme yöntemleri, deney cihazı ve aparatları ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri

3.1.1. Kiriş betonu

Betonarme kiriş numunelerin üretimin de kullanılmak üzere C16 beton kalitesinde beton ilimizde bulunan hazır beton firmasından temin edilmiştir. Kiriş betonunun basınç dayanımını tayin etmek için silindir numuneler alınmıştır. Numuneler, üretilen kirişler ile dayanımlarını kazanması için aynı şartalar altında bekletilmiştir. Numuneler 28 günlük dayanım kazanma sürecini tamamladıktan sonra numuneler üzerine grafit tozu ve kükürt ile başlık yapılarak basınç deneyi ile basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 3.1.). Betonların ortalama basınç dayanımı 16,9 MPa olarak bulunmuştur (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Silindir beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı

Numune No	28 Günlük Beton Basınç Dayanımı F_c (MPa)
1	14,3
2	17,5
3	18,9
Ortalama	16,9



Şekil 3.1. Silindir beton numuneleri

3.1.2. Çelik donatı

Betonarme kirişlerde S420 sınıfı $\Phi 8$, $\Phi 16$ ve $\Phi 18$ çaplarında nervürlü çelik donatılar kullanılmıştır (Şekil 3.2.). Çelik numuneler üzerinde çekme deneyi yapılarak akma ve çekme dayanımları tespit edilmiştir. Çelik donatılardan dörder adet numune alınarak çekme testine tabi tutulmuş ve donatı anma çapı kullanılarak ortalama dayanımlar bulunmuştur. $\Phi 8$ 'lik numunenin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 363,3 ve 498,2 MPa, $\Phi 16$ 'lık numunenin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 509,8 ve 652,8 MPa, $\Phi 18$ 'lik numunenin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 591,7 ve 725,8 MPa olarak bulunmuştur. Çekme deneyinin sonuçları Tablo 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kiriş donatıları

Tablo 3.2. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin sonuçları

Donatı türü	Akma dayanımı f_{yk} (MPa)	Çekme dayanımı f_{su} (MPa)
Ø8	345,4	490,2
	366,3	508,1
	370	494,5
	371,5	499,78
Ortalama	363,3	498,2
Ø16	507,1	650,7
	521,1	660,4
	506,5	651,5
	504,4	648,8
Ortalama	509,8	652,8
Ø18	591,7	729,7
	589,5	728,7
	590,6	722,3
	595	722,6
Ortalama	591,7	725,8

3.1.3. Bazalt elyaf

Betonarme kiriş numunelerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde, rolü halinde üretilen tek doğrultulu bazalt elyaf kumaş kullanılmıştır. Kumaş rolü genişliği 500 mm'dir (Şekil 3.3.). Bazalt kumaşın mekanik ve teknik özelliklerinin bir kısmı üretici firma tarafından alınmış, çekme dayanımı ve dokuma kalınlığı bazalt elyaf üzerinde yapılan testler ile bulunarak Tablo 3.3.'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Bazalt elyaflara ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Filament çapı (Mikron)	13-20
Dokuma kalınlığı (mm)	0.14
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,80
Nem (%)	0,2 - 12
Çekme dayanımı (MPa)	3115
Elastisite modülü (MPa)	89
Kopma uzaması (%)	3,5
Renk	Altın kahverengi



Şekil 3.3. Bazalt Elyaf

3.1.4.Epoksi

Deneysel çalışmasında, kullanılan bazalt elyaf şeritler ve kumaşın giriş yüzeyine harici olarak yapıştırılmasında Sikadur 330 epoksi esaslı doyurma reçinesi kullanılmıştır

(Şekil 3.4.). Epoksi reçine, iki bileşenli, suya dayanıklı, epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcıdır.



Şekil 3.4. Epoksi reçine

Epoksi reçine, iki bileşenden (A:B) oluşmaktadır. A bileşeni: beyaz renkli macunu (reçine), B bileşeni ise: gri renkli macunudur (sertleştirici), A + B karışımında açık gri macun elde edilmektedir. Üretici firma tarafından tavsiye edilen karıştırma oranı ağırlıkça A:B = 4:1'dir. Üretici tarafından epoksi reçineye ait bazı önemli mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.4.'de verilmektedir.

Tablo 3.4. Sikadur 330 epoksi özellikleri

Sikadur®-330 Malzeme Özellikleri	Değerler
Yoğunluk	1,30 ± 0,1 kg/L (A+B bileşeni) (+23 °C'de)
Karışım oranı	A bileşeni : B bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça
Uygulama sıcaklığı	+10 °C min. / +35 °C max.
Çekme dayanımı	30 MPa (7 gün sonra, +23°C'de)
Eğilmede elastisite modülü	3 800 MPa (7 gün sonra, +23 °C'de)
Çekmede elastisite modülü	4500 MPa (7 gün sonra, +23 °C'de)
Kopma uzaması	%0,9 (7 gün sonra, +23 °C'de)
Yapışma dayanımı	Kumlanmış yüzeyde beton kırılması: > 1 gün
Kimyasal dayanım	Ürün kimyasal dayanım amaçlı değildir

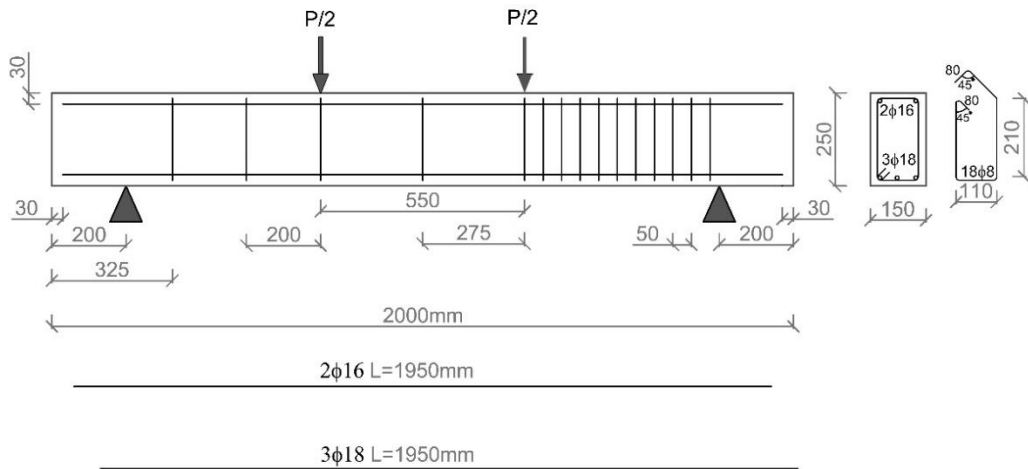
3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi laboratuvarında, mevcut yükleme sistemi ve ölçüm aletlerinin kapasiteleri dikkate alınarak deneye tabi tutulacak kiriş elemanlarının geometrik ebatları planlanıp tasarlanmıştır.

Deneyisel çalışmasında, kiriş numuneleri $\frac{1}{2}$ ölçekli, kesme dayanımı zayıf eğilme dayanımı güçlü olarak 2000 mm boyunda ve 150×250 mm kesitinde dikdörtgen kesitli kiriş tasarlanmıştır. Kiriş numunelerinin kesme bölgelerinin biri kesme dayanımı açısından güçlü diğeri zayıf olarak tasarlanmıştır. Kesme bölgesi boyu 525 mm uzunluğundadır. Ø8 çapında etriye kullanılarak üretilen kiriş numunelerde etriye adım mesafesi kesme dayanımı güçlü ve zayıf olan bölgede sırasıyla 50 mm ve 200 mm'dir. 25 mm paspayı aparatları boyuna donatılara takılacak şekilde kullanılmıştır.

Kiriş alt ve üst kesitinde sırasıyla 3Ø18 ve 2Ø16 çapında çelik boyuna donatı kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan çekme donatısının oranı $\rho = 0.023$, basınç donatısı ise $\rho = 0.0122$ 'dir. Tasarlanan kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Deney kirişlerin geometrisi ve donatı yerleşim planı

Deney çalışmasında eğik kesme-basınç kırılmasının olabilmesi için a_v/d oranı 1'den büyük 2,5'dan küçük olması sağlanmıştır, mesnet ile yükleme noktası arasındaki mesafe 525 mm sağlanmış olup kirişin faydalı yüksekliği 215 mm olduğundan a_v/d oranı 2,4 olarak belirlenmiştir.

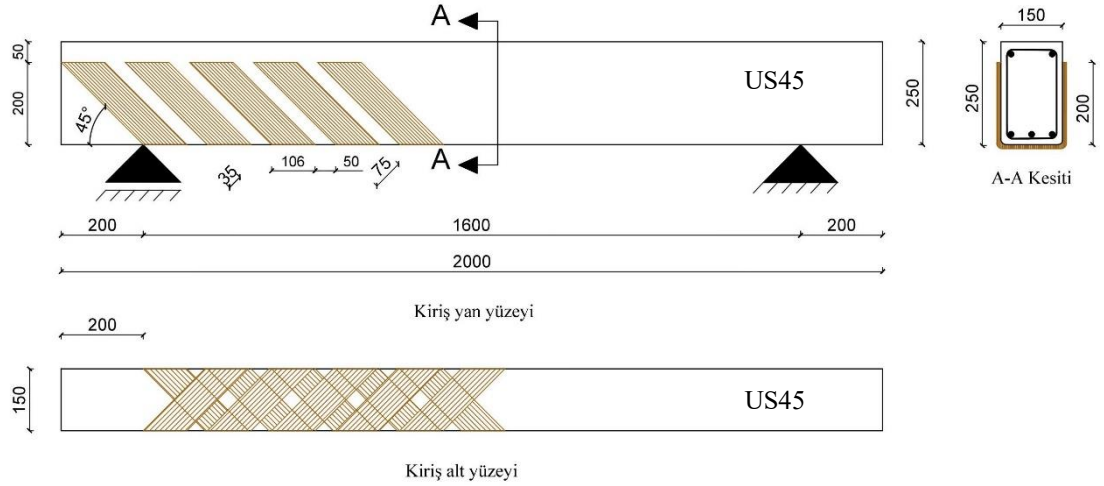
3.2.2. Kiriş numunelerinin BFRP kompozit ile güçlendirme yöntemi

Güçlendirme çalışmalarında, 2 adet kiriş kontrol olarak ve 8 adet kiriş BFRP kompozit ile kesmeye karşı güçlendirmek için toplamda 10 adet kiriş üretilmiştir. Kontrol elemanlarında BFRP kompozit ile herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Sekiz adet kirişler üzerinde kesmeye karşı bazalt elyaf ile farklı sarım yöntemi ile güçlendirme çalışması yapılmıştır. Bazalt elyaf şeritler ve kumaşın yapıştırılmasında epoksi reçine kullanılmıştır. Kirişlerin bazalt elyaf ile güçlendirilmesinde, 45° 'lik açılı tam sarım şeritler, 45° 'lik açılı U şerit sarım ve 45° 'lik açılı U şerit ile iki 0° (başlık) devamlı şerit şeklinde sarım, tam sarım ve yan sarım şeklinde yöntemler kullanılmıştır. Deney kirişlerin BFRP şerit ve kumaş durumu Tablo 3.5.'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Tasarlanan BFRP şeritler ve kumaşın durumu

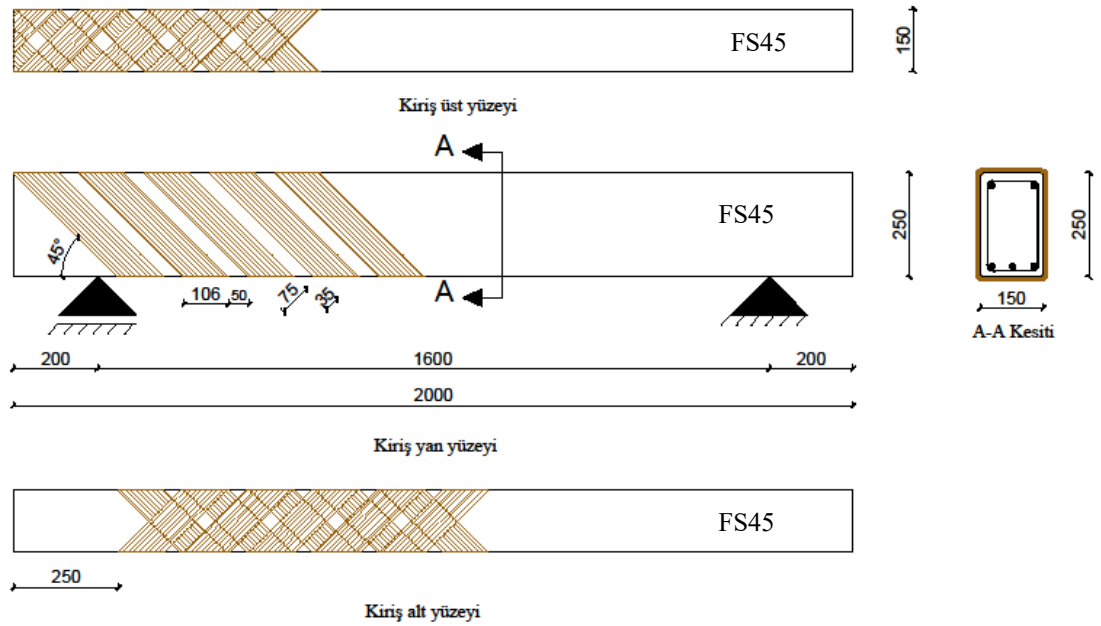
Kiriş Adı	BFRP Kompozit		Şerit Aralığı (mm)	Elyaf Doğrultu açısı	Güçlendirme Yöntemi
	Boy (mm)	Genişlik (mm)			
Kontrol	-	-	-	-	Güçlendirilmemiştir
FS45	850	75	50	45°	45° Tam sarım
US45	570	75	50	45°	45° U sarım
BUS45	570	75	50	$45^\circ/0^\circ$	$45^\circ/0^\circ$ U sarım /Yatay başlık
FSW90	800 +150	500	-	90°	Kiriş çevresi + Bindirme, 90° Tam Sarım
SBS90/0	200	500 800	-	$90^\circ/0^\circ$	$90^\circ/0^\circ$ Yan Sarım

45° açılı U şerit sarım yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt ve yan yüzeyleri 45° U şeritler olacak şekilde güçlendirilmiştir. Şeritlerdeki elyaf doğrultusu kirişin yüzeyine $\alpha = 45^\circ$ olacak şekilde, şeritlerin genişliği $w_f=75$ mm, uzunluğu 570 mm ve U şeritler eksenlerinin arası mesafe $S_f=156$ mm olarak tasarlanmıştır. U sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişlere US45-1 ve US45-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.6.).

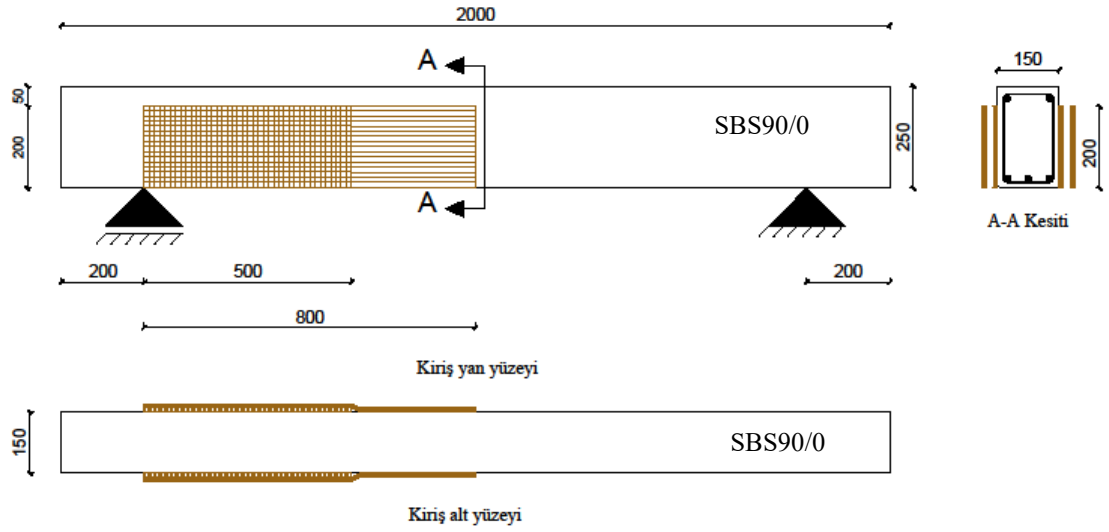


Şekil 3.6. US45 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri

45° açılı tam sarım şeritler yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt, üst ve yan yüzeyleri karşılıklı olacak şekilde güçlendirilmiştir. Şeritlerdeki elyaf doğrultusu kirişin yüzeyine $\alpha = 45^\circ$ olacak şekilde, şeritlerin genişliği $w_f=75$ mm, uzunluğu 850 mm ve şeritler eksenlerinin arası mesafe $S_f=156$ mm olarak tasarlanmıştır. Tam sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişlere FS45-1 ve FS45-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.7.).

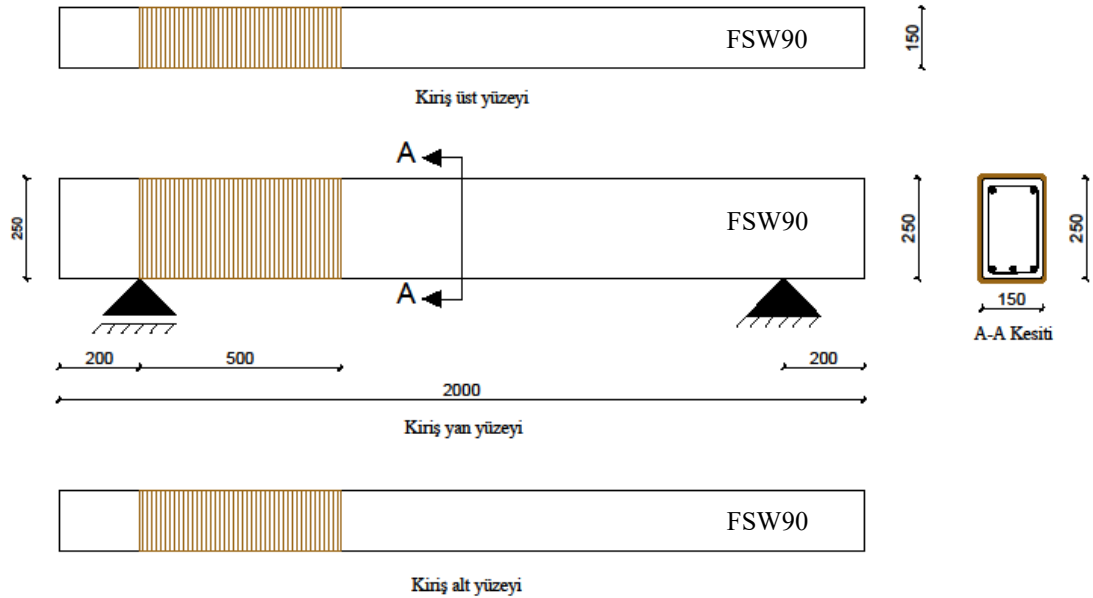


Şekil 3.7. FS45 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri



Şekil 3.9. SBS90/0 kiriş numunelerinin kesit ve görüntüşleri

Bazalt elyaf kumaş ile tam sarım yönteminde, kirişin yetersiz kesme dayanımı bölgesinde belirli adım mesafesi ile tam sarım şeklinde güçlendirilmiştir. Elyaf doğrultusu kirişin yüzeyine $\alpha = 90^\circ$ olacak şekilde ve kumaş genişliği $w_f=500$ mm olarak tasarlanmıştır. Bazalt elyaf kumaş kullanılarak tam sarım yöntemi ile bir adet kiriş güçlendirilmiştir ve kirişe FSW90 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. FSW90 kiriş numunelerinin kesit ve görüntüşleri

3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması

3.3.1. Kiriş numunelerin üretimi

Kirişlerin üretilmesinde kullanılmak üzere 10 adet kiriş numunelerin ebadına göre dikdörtgen kesitli kiriş kalıpları hazırlanmıştır. Kiriş numuneleri temiz ve pürüzsüz halinde kalıplarından çıkartması amacı ile kiriş kalıpların üretilmesinde Plywood panel kullanılmıştır. Üretilen kiriş kalıpları Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11.Kiriş numuneleri için üretilen kalıp sistemi

Kiriş kalıplar üretildikten sonra, kirişlerin çelik donatısı bağlanmış ve 25mm paspayı aparatları boyuna donatına takılmıştır. Pürüzsüz yüzey sağlamak amacıyla kiriş kalıpların iç yüzeyleri yağlandırılmıştır, ardından hazırlanan donatı kalıplara yerleştirilmiş ve beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Kiriş kalıplarına donatı yerleşimi Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Beton dökümünden önce kalıp ve donatı görünümü

Kiriş etriyeleri boyuna donatıya bağlanarak kalıplara yerleştirilmiştir. C16 beton kalitesinde beton Sakarya ilinde bulunan bir hazır beton firmasından temin edilerek kiriş betonu dökülmüştür. Beton dökümü işlemi sonrasında kalıpların içerisindeki beton homojenliği sağlanması ve beton içindeki oluşan boşlukların en aza indirilmesi amacı ile dalıcı el vibratörü kullanılmıştır. Vibrasyon işleminin ardından betonun üst yüzeyi tesviye edilmiştir. Beton dökümü, vibrasyon işlemi ve mala ile düzeltilme işlemleri Şekil 3.13. - 3.15.'te verilmiştir. Doğal şartlarda kalıplarda bekletilen kiriş numuneleri 28 gün süresince kür işlemine tabi tutulmuş ve yeterli sertliğe geldikten sonra kalıplardan sökülüp çıkartılmıştır.



Şekil 3.13. Beton dökümü işlemi



Şekil 3.14. Beton yerleştirme işlemi



Şekil 3.15. Beton yüzeyi tesviye işlemi

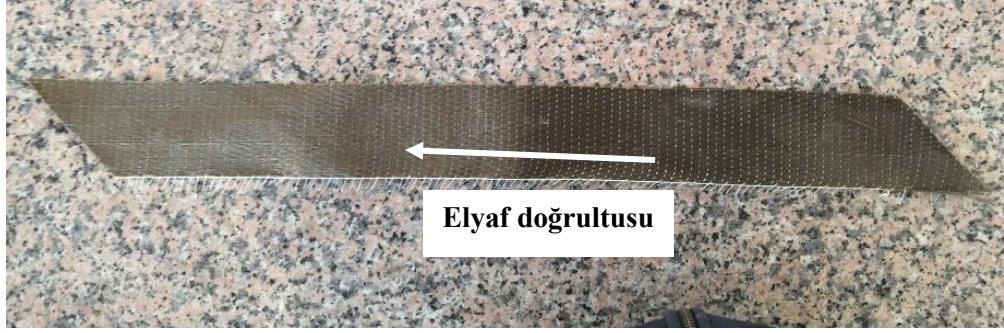
3.3.2. Kiriş numunelerin BFRP kompozit ile güçlendirilmesi

Deney kirişleri kalıplarından çıkarılarak kurumaya bırakılmıştır. Kirişler yeterli kuruluğa sahip olduktan sonra BFRP kompozit ile güçlendirilmesinin işlemine geçilmiştir. İki kiriş kontrol eleman olarak ayrılmıştır, Kalan sekiz numunede bazalt elyaf ile güçlendirme öncesi yüzey hazırlığına alınmıştır. Keskin yüzeylerin BFRP kompozit ile güçlendirmesi üzerindeki olumsuz etkisi göz önüne alındığında, deneysel çalışması üzere üretilen kiriş numunelerinin tamamının alt köşeleri boydan 20 mm yarıçapı olacak şekilde yuvarlatılmış ve bazalt elyaf kumaş ile tam sarım güçlendirilecek kirişlerin üst köşeleri de boydan 20 mm yarıçapı olacak şekilde çanak taşlama motoru kullanılarak yuvarlatılmıştır. Yuvarlatma işlemi bittikten sonra kirişlerin yüzeyi taşlama yöntemi ile hazırlanmış ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Yuvarlatma ve taşlama işlemlerinden sonra beton yüzeylerinde oluşan toz, basınçlı hava tabancası ile püskürtülerek temizlenmiş ve temiz bez ile silinmiştir. Böylece kirişlerde uygun yapıştırma yüzeylerinin oluşması sağlanmıştır.

Kiriş numunelerin yüzeyleri yapışma işlemine hazır olduğunda laboratuvar içerisine yerleştirilmiş ardından kirişlere sırayla isimler verilmiştir. Kontrol numunelerin üzerinde hiçbir güçlendirme işlemi uygulanmamıştır, Kalan sekiz kiriş numune yetersiz etriye bölgeleri üzerinde güçlendirme işlemi yapılmıştır. Yetersiz etriye bölgelerinin güçlendirilmesi bazalt elyaf kullanarak beş sarım yöntemi ile ve 3 farklı açıda yapılmıştır. Güçlendirme işlemine tabi tutulan kirişlerin yüzeylerinin üzerinde her sarım yönteminden önce kumaşların kiriş yüzeyine rahat bir şekilde yapıştırılabilmesi için kumaşın kiriş yüzeyine yapıştırılacak yeri kalem ile çizilerek belirlenmiştir (Şekil 3.16.). Maket bıçağı kullanılarak temiz ahşap tahta üzerinde bazalt kumaş her sarım yöntemine göre kesilip hazırlanmıştır. Bütün BFRP şeritleri paralelkenar şeklinde kesilmiştir ve kirişin iki karşıt tarafına aynı yönde yapıştırılarak ve kirişin alt yüzeyinde her iki karşıt şeritin ucu üst üste bağlanarak U şekli oluşturulmuştur (Şekil 3.17.). Tam sarım şeritler ise kirişin iki karşıt tarafına aynı yönde yapıştırılarak ve kirişin hem alt hem de üst yüzeyinde her iki karşıt şeritin ucu üst üste bağlanarak tam sarım şeritler oluşturulmuştur. Kumaş ile yan sarım ve tam sarım yöntemlerinde, elyaf dikdörtgen şeklinde kesilmiştir.



Şekil 3.16. Şeritlerin yeri belirtilmesi



Şekil 3.17. U ve tam sarım şerit yönteminde kullanılan bazalt elyaf şeritleri

Kirişlerin yüzeyleri hazır olup güçlendirme olacak yerleri belirtildikten sonra kirişler yapışma işlemine hazır hale gelmiştir. Ayarlanan bazalt elyaf kumaş ve şeritler yapıştırılmasında, her kiriş için 4 birim A bileşen ile 1 birim B bileşeni elektrikli karıştırıcı aparat ile karıştırarak epoksi hazırlanmıştır (Şekil 3.18.).



Şekil 3.18. Epoksi karıştırma işlemi

Kirişin işaretli bölgelerine yapıştırılma işlemi öncesi yaklaşık 1 mm kalınlığında rulo kullanarak epoksi sürülmüştür. Ayrıca, kesilen kumaş parçaların kiriş yüzeyine yapıştırılmasından önce parçaların arka yüzeylerine rulo kullanılarak epoksi iyice yedirilmiştir. BFRP kumaşların düzgün bir biçimde yapıştırılmasına büyük önem

verilmiştir. Yetersiz kesme bölgelerinin güçlendirilmesinde kullanılan bazalt elyaflar gerginleştirilmiş ve kumaş altında hava kalmayacak şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırılan kumaşların üstüne 1 mm kalınlığında epoksi rulo kullanarak sürülmüştür (Şekil 3.19. – 3.20.). Epoksinin dayanımı kazanmasını sağlamak için kirişler 14 gün boyunca laboratuvar ortamında uygun koşullarda bekletilmiştir.



Şekil 3.19. Beton yüzeyine epoksi uygulanması



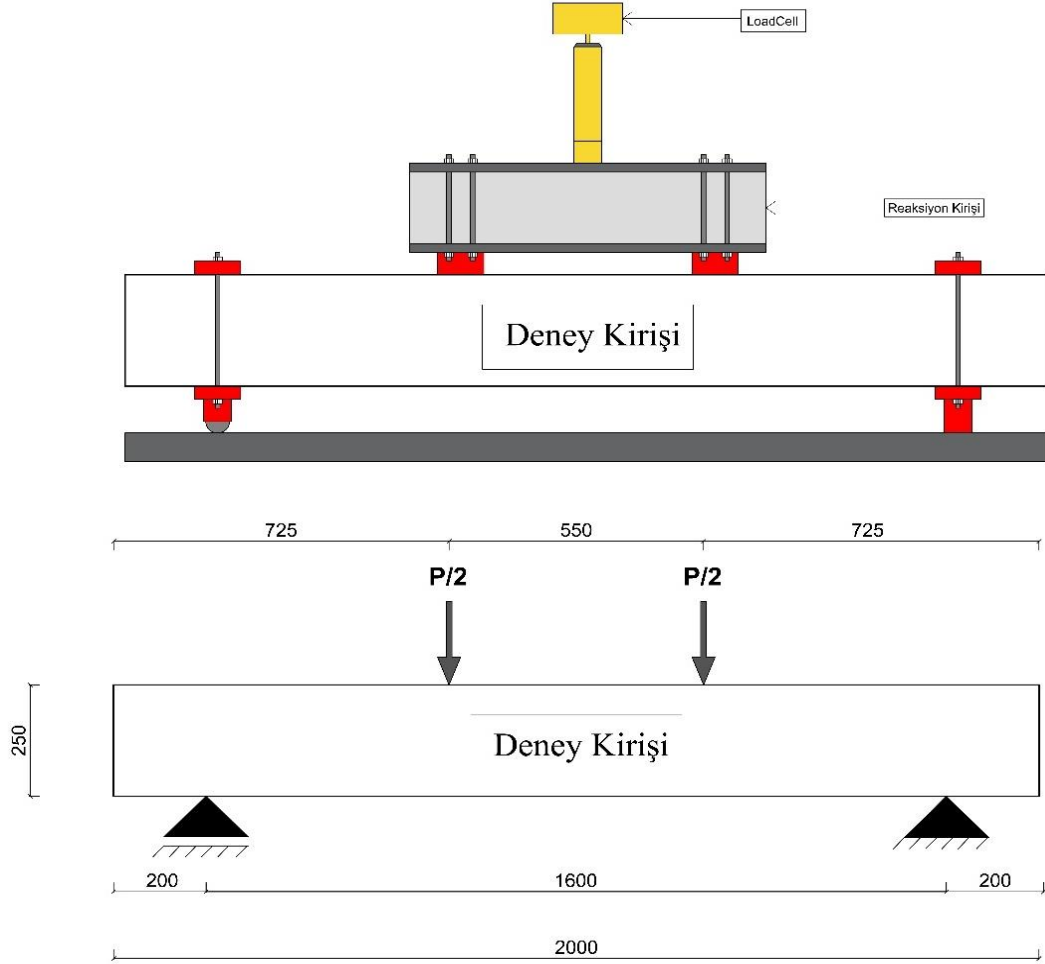
Şekil 3.20. BFRP şeritlerin yapıştırılması

3.4. Kiriş Deney Düzenegi

3.4.1. Yükleme ve ölçüm düzenegi

Deneysel çalışmalar için BFRP kompozit ile güçlendirilen kiriş numuneler ve 300 kN kapasiteli yükleme çerçeve cihazı ile eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Cihazda bulunan iki mesnetten biri sabit biri hareketli ve mesnetler arasındaki açıklık mesafesi 1600 mm olarak ayarlanmıştır. Deneysel çalışmada, kirişler dört noktalı yükleme sistemine tabi tutulmuştur. 300 kN kapasiteli hidrolik silindir pompa seti ile reaksiyon kirişi ortasına yükleme yapılmıştır. Kirişlerin üst yüzeyinin üzerine 550 mm aralıkla iki basit mesnede sahip olan reaksiyon kirişi yerleştirilmiştir. Hidrolik silindir pompasından reaksiyon kirişine aktarılan P tekli yük, $P/2$ eşit iki tekli yük olarak deney kirişlerine aktarılmıştır. Reaksiyon kirişinin 2 mesnet noktaları altına 2 mm kalınlığında kare şeklinde kauçuk parçalar yerleştirilmiştir. Yükleme sıfırdan başlamış ve kirişlerinde göçme oluşmasına kadar yüklemeye devam edilmiş olup göçme oluşuktan sonra yük boşaltılmıştır. Yük verilerinin değişmesinin okumasında elektronik yük hücresi (Load cell) kullanılmıştır. Yapılan yükleme düzeneginde kesme

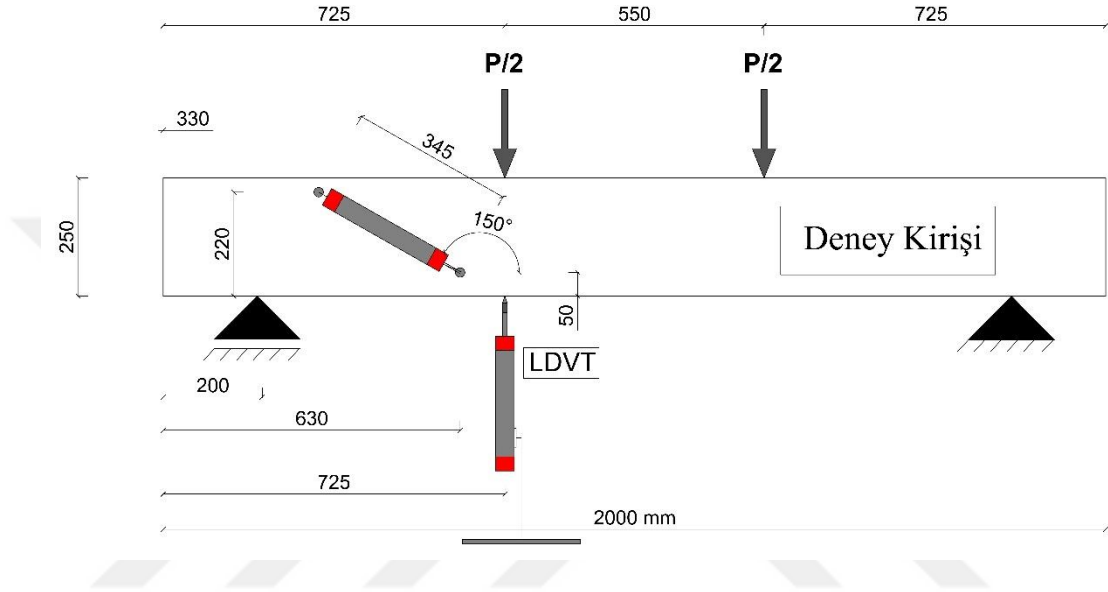
açıklığı 525 mm'dir. Yük hücresi tarafından okunan veriler veri kaydedici aracı ile kaydedilmiştir. Yükleme düzeneği Şekil 3.21.'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Yükleme düzeneği

Yetersiz kesme dayanımı bölgesindeki uygulanacak $P/2$ yükün altındaki oluşacak deplasman ölçmek için, 0.01 mm hassasiyetli olan elektronik deplasman ölçer LVDT cihazı (doğrusal potansiyometre) yükün aynı noktasında kirişin altına yerleştirilmiştir. Kirişlerin güçlendirilen bölgesinde oluşacak kesme çatlağının genişliği belirlemek için kirişin yan yüzeyine 30° 'lik açı ile sökülüp takılabilen elektronik LVDT potansiyometre yerleştirilmiştir. Yükleme sistemine bağlı olarak veri toplama sistemi (Datalogger) vasıtası ile, veriler toplam 3 kanaldan her saniye ile kaydedilmiş olup veri toplama sistemine bağlı olarak bilgisayar ortamında depolanmıştır. Böylece veri

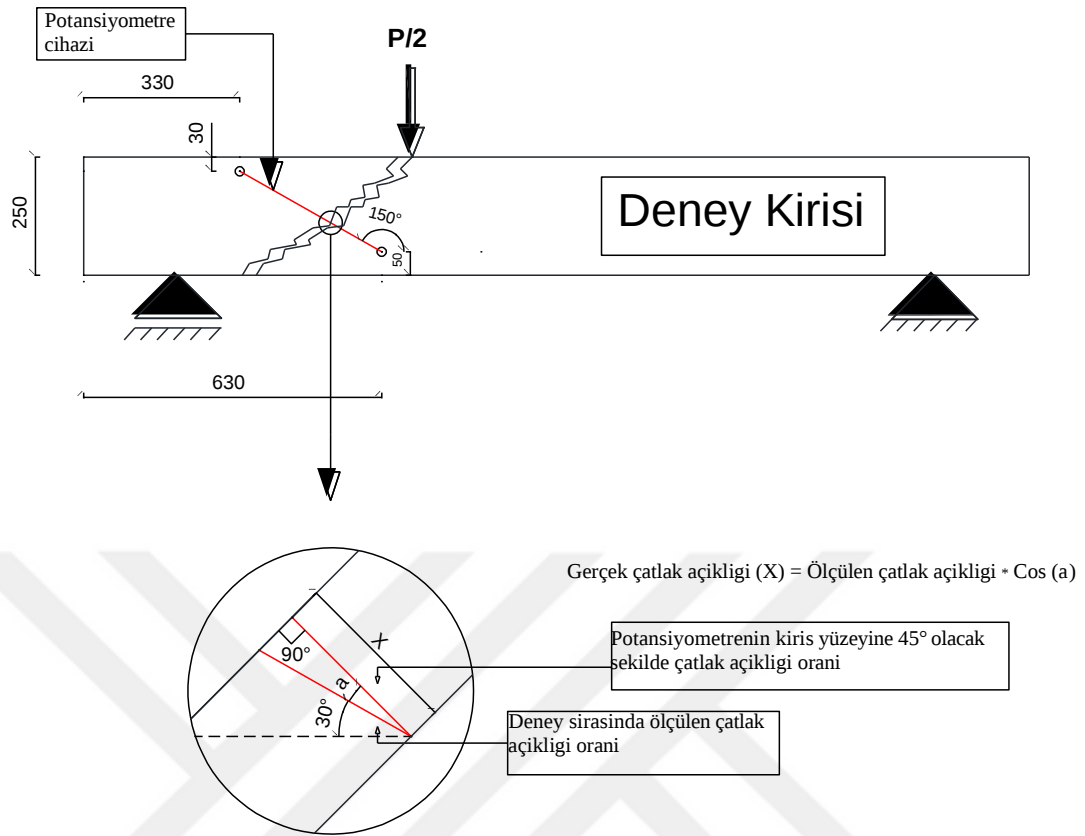
toplama sisteminde 1 adet yük, 1 adet yükleme altı deplasman ve 1 adet çatlak genişliği verileri kaydedilmiştir. Kayıt süresince veri toplama sisteminin dijital ekranından izlenmiştir. Ayrıca, her bir yeni kayıttan önce, tüm kanallardaki başlangıç verileri sıfırlanıp deney başlatılmıştır. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği Şekil 3.22.'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği

3.4.2. Çatlak açıklığı hesaplama yöntemi

Kiriş deneylerindeki çatlak açıklıklarını ölçebilmek için, potansiyometre aparatı ve kiriş yüksekliğinin imkan verdiği ölçüde potansiyometre kesme çatlağına dik gelecek şekilde yerleştirilmeye çalışılmıştır. Kiriş numunelerin derinliği 25 cm olduğundan, potansiyometre kiriş yüzeyine 30 derecelik bir açıyla yerleştirilebilmiştir. Kirişlerde oluşan çatlak açıları ölçülerek çatlak açıklığı Şekil 3.23.'te verilen çizim ve hesap bağıntısı ile düzeltilmiştir.



Şekil 3.23. Çatlak açıklıklarının tespit edilmesi için yapılan kiriş modellemesi ve hesaplama yöntemi

Burada X: gerçek çatlak açıklığı, α : çatlak ölçerin kiriş yüzeyine yerleştirildiği açı ile 45 dereceye kalan açı miktarı. Yüke karşılık gelen gerçek çatlak açıklıkları Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$X = \text{ölçülmüş olan çatlak açıklık değeri} \times \cos (\alpha) \quad (3.1)$$

Kiriş yüzeylerinde potansiyometre cihazı ile ölçülmüş olan çatlak açıklıkları Şekil 3.23.'teki hesaplanan X değeri (düzeltme oranı) ile çarparak gerçek çatlak açıklıklarının doğru şekilde hesaplanmıştır.

BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

4.1. Kontrol Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

İki adet kontrol kiriş numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.1.). Yükleme sıfırdan başlamış ve kontrol numunelerde göçme oluşuncaya kadar yüklemeye devam edilmiş olup göçme oluşuktan sonra yük boşaltılmıştır. Yük-deplasman ve yük-çatlak açıklığı verileri yükleme sistemine bağlı olarak bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 4.1.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kontrol kirişin eğilme deneyi

Tablo 4.1. Kontrol kirişlere ait kesme kuvvetine göre yük, sehim ve çatlak açıklığı değerleri

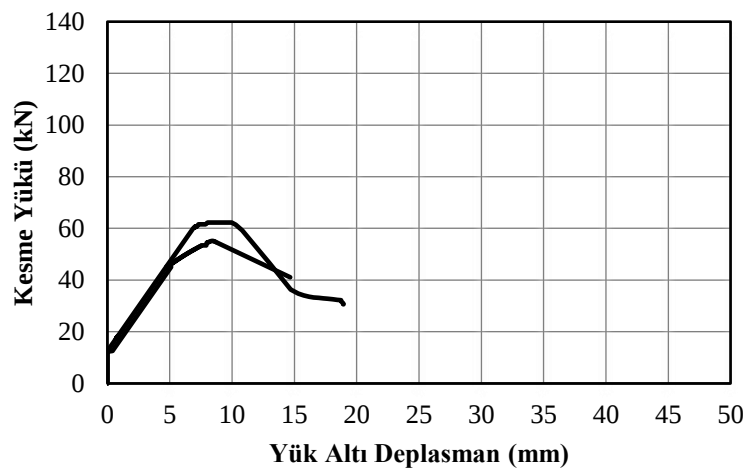
Kiriş numuneleri	Kesme yükü (V) (kN)	Yükleme altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
Kontrol 1	55,11	8,52	-
Kontrol 2	62,27	9,97	3,40
Ortalama	58,69	9,25	3,40

Kontrol kirişlerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 58,69 kN, 9,25 mm ve 3,40 mm olarak bulunmuştur. Deney sırasında, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Kontrol kirişlerde kirişin zayıf bölgesinde 45° açılı kesme çatlakları oluşmuştur (Şekil 4.2.). Ayrıca, numunelerin bir tanesinde alt bölgede beton örtüsü dökülmüş ve çekme donatısında da aderans kaybı ile birlikte düşey ana çatlak oluştuğu görülmüştür.



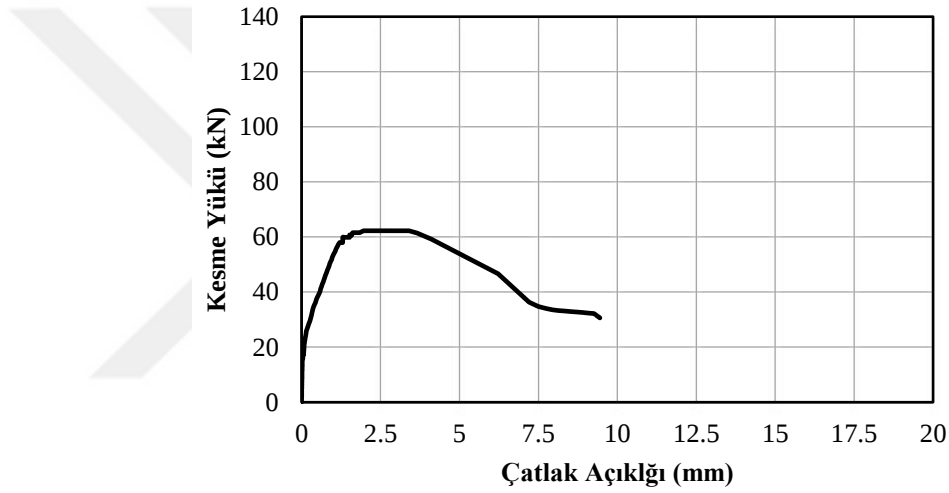
Şekil 4.2. Kontrol kirişin yükleme sonrası deformasyon şekli

Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde 15 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman olduğu ve bu yükten sonra kirişlerin lineer bir davranış göstermiş olduğu, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kirişin yenilmeye başlamıştır. (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Kontrol kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği

Kontrol kirişlerine ait eğilme deneyi sırasında kirişlerin bir tanesinde çatlak ölçerle deney hatası olduğu tespit edildiği için veri hatası olmayan kirişin verileri kullanılmıştır. Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikleri Şekil 4.4.'te sunulmuştur. Grafikten Yaklaşık 15 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı olduğu ve kesme yükü- çatlak açıklığı orantısı değiştiği anlaşılmaktadır. Kiriş kesme dayanımına yaklaştığında oluşan ikinci orantının da bozulmaya başladığı ve tepe noktada yük artmazken deformasyonun arttığı ve sonrasında kirişin yenilmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Kontrol kirişlerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

4.2. US45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

BFRP kompozitler ile 45° U şerit sarım yöntemi (US45) ile güçlendirilen iki adet kiriş numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.5.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.2.'de sunulmuş ve yapılan güçlendirilmenin daha iyi anlaşılması açısından kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2. US45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri

Kiriş numuneleri	Kesme yükü (V) (kN)	Yükleme altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
US45-1	92,16	8,30	2,80
US45-2	96,75	8,30	2,47
Ortalama	94,46	8,30	2,64



Şekil 4.5. 45US kiriş numunelerinin eğilme deneyi

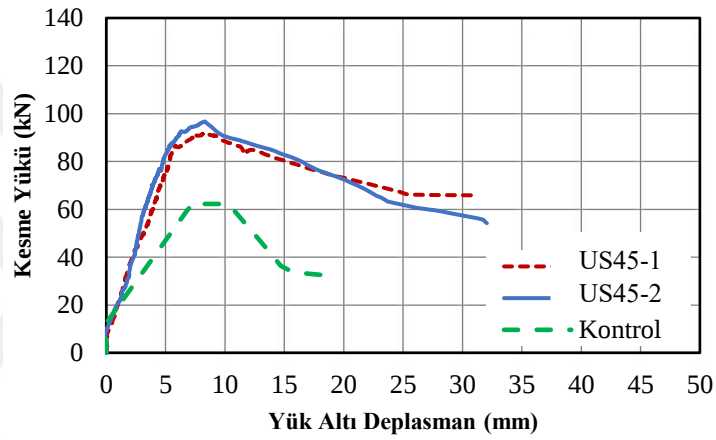
US45 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 94,46 kN, 8,30 mm ve 2,64 mm olarak bulunmuştur. US45 kiriş numuneleri kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. US45 kiriş numunelerinin kontrol kirişlerine göre kesme dayanımları ortalama %61 oranında artmıştır. Kesme yüküne karşılık oluşan ortalama deplasman ve çatlak açıklığı sırasıyla %10,27 ve %22,35 oranında azalma tespit edilmiştir.

Deney sırasında, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Ayrıca, sabit hızlı yüklenen kirişlerde yükleme arttıkça kesme çatlakları oluşması nedeniyle şeritlerin beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılması izlenmiştir. Kirişler nihai dayanımına ulaştıncaya kesme kırılması ile göçmüş olup deney sona erdirilmiştir (Şekil 4.6.).



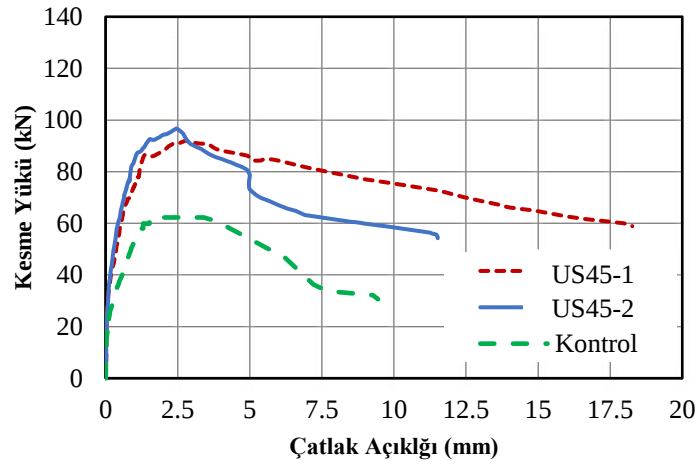
Şekil 4.6. US45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri

Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikler şekilde sunulmuştur (Şekil 4.7. ve 4.8.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde US45 kiriş numuneleri nihai kesme dayanımına kadar birbirine oldukça yakın davranış göstermişlerdir. Grafikten yaklaşık 13 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman oluşmuş ve bu yükten sonra kirişler lineer bir davranış göstermiş, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kiriş yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişine göre US45 kiriş numunelerinin eğilme rijitliklerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. US45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği

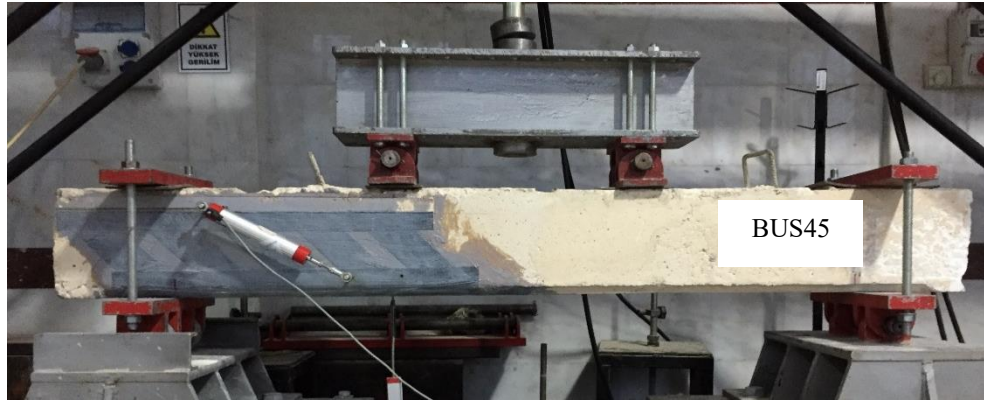
US45 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kiriş dayanım ve davranışları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Yaklaşık 32 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı oluştuğu, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığının orantılı bir şekilde devam ettiği, maksimum kesme dayanıma yaklaştığında ise bu orantı bozulmaya başladığı, sonrasında kirişin dayanımını kaybetmeye başladığı ve nihayet göçtüğü görülmüştür (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. US45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

4.3. BUS45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

BFRP şeritler ile U sarım üstüne yatay başlıklı şerit olacak şekilde (BUS45) güçlendirilen iki adet kiriş numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.9.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.3.'te sunulmuş ve kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.9. BUS45 kiriş numunelerinin eğilme deneyi

Tablo 4.3. BUS45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri

Kiriş numuneleri	Kesme yükü (V) (kN)	Yüklemeye altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
BUS45-1	101,50	6,68	1,97
BUS45-2	100,89	6,55	2,35
Ortalama	101,20	6,62	2,16

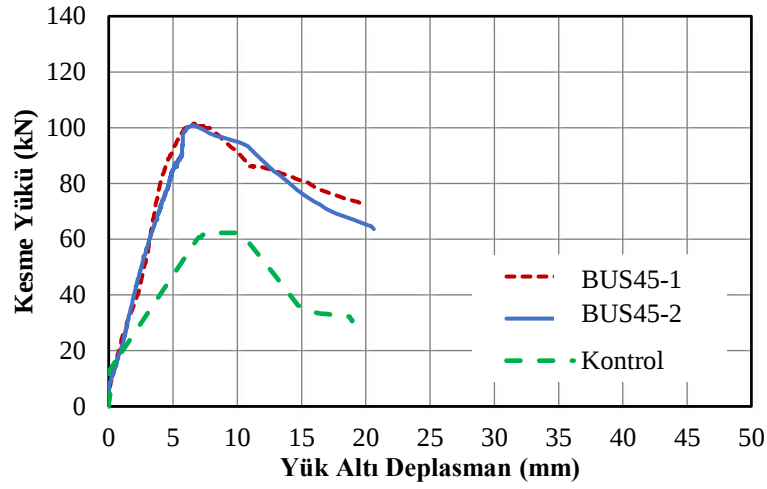
BUS45 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 101,2 kN, 6,62 mm ve 2,16 mm olarak bulunmuştur. BUS45 kiriş numuneleri kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. BUS45 kirişlerin kontrol kirişlerine göre kesme dayanımları ortalama %72,4 oranında artmıştır. Kesme yüküne karşılık oluşan ortalama deplasman ve çatlak açıklığı sırasıyla %28,43 ve %36,47 oranında azalma tespit edilmiştir.

İlk çatlaklar kirişin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemine devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Deney sırasında, yükleme arttıkça kesme çatlakları oluşması nedeniyle U şeritler yatay başlıklarla birlikte mesnete yakın bölgede beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılmıştır (Şekil 4.10.).



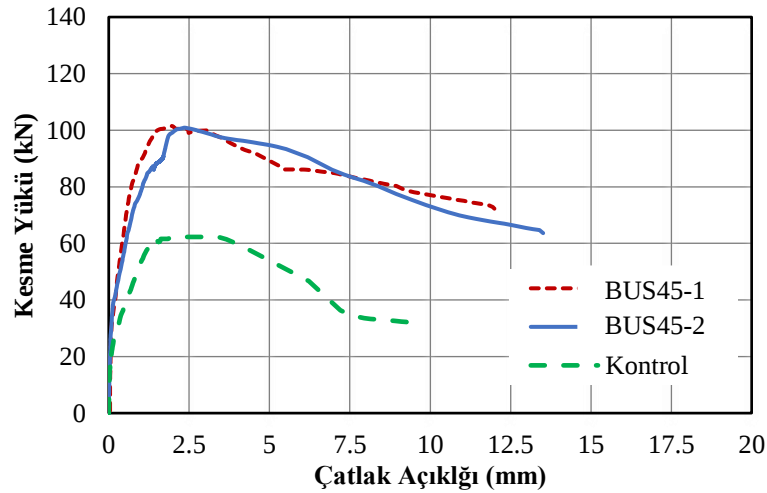
Şekil 4.10. BUS45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri

Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikler şekilde sunulmuştur (Şekil 4.11. ve 4.12.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, BUS45 kiriş numuneleri nihai kesme dayanımına kadar birbirine oldukça yakın davranış göstermişlerdir. Grafikten yaklaşık 12 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman oluşturmuş (0,39 mm) ve bu yükten sonra kirişler lineer bir davranış göstermiş, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın bozulmaya başlamış ve nihai dayanımdan sonra kiriş yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişine göre BUS45 kiriş numunelerinin eğilme rijitliklerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.11. BUS45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği

BUS45 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kiriş dayanım ve davranışları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Yaklaşık 34 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı oluştuğu, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığı orantılı bir şekilde devam etmektedir. Maksimum kesme dayanıma yaklaştığında ise bu orantı bozulmaya başlamış, sonrasında kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. BUS45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

4.4. FS45 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

BFRP şeritler ile tam sarım şerit şekilde (FS45) güçlendirilen iki adet kiriş numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.13.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.4.'te sunulmuş ve kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13. FS45 kiriş numunelerinin eğilme deneyi

Tablo 4.4. FS45 kiriş numunelerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri

Kiriş numuneleri	Kesme yükü (V) (kN)	Yüklemeye altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
FS45-1	104,69	7,31	1,90
FS45-2	117,04	9,08	2,04
Ortalama	110,87	8,20	1,97

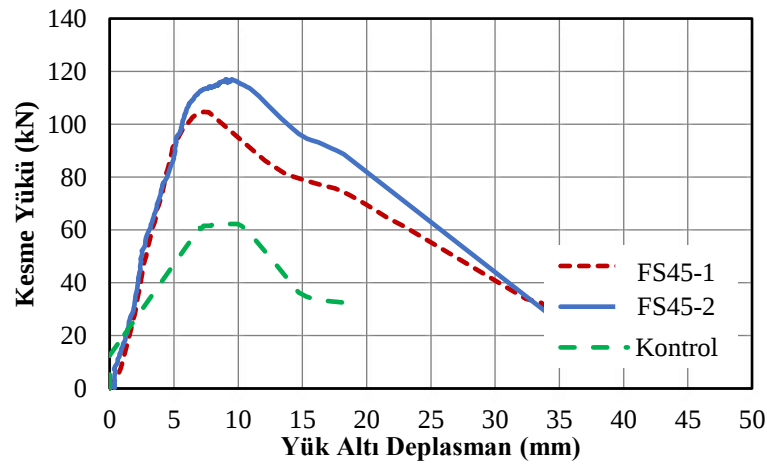
FS45 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yüklemeye altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 110,87 kN, 8,20 mm ve 1,97 mm olarak bulunmuştur. FS45 kiriş numuneleri kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. FS45 kirişlerin kontrol kirişlerine göre kesme dayanımları ortalama %89 oranında artmıştır. Kesme yüküne karşılık oluşan ortalama deplasman ve çatlak açıklığı sırasıyla %11,3 ve %42 oranında azalma tespit edilmiştir.

Deney sırasında, kirişler nihai dayanımına ulaşınca yan yüzeylerdeki şeritlerde bazalt elyaflar şerit orta bölgesinden kopmuş olup herhangi bir sıyrılma oluşmamıştır. Ayrıca, FS45-2 numunesinde çekme bölgesinde beton örtüsü dökülmüş ve çekme donatısının aderans kaybı ile birlikte düşey ana çatlak oluştuğu görülmüştür. (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. FS45 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri

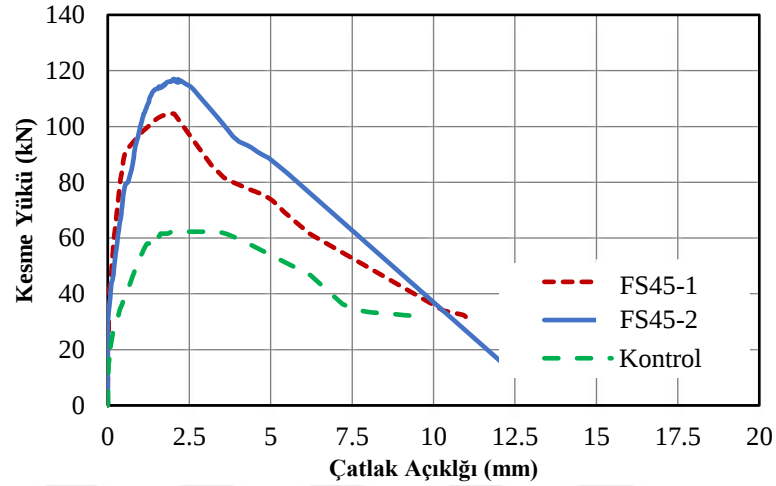
Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikler şekilde sunulmuştur (Şekil 4.15. ve 4.16.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, FS45 kirişler maksimum dayanımlarında farklılık oluştursa da, maksimum dayanımlarına kadar kiriş numuneleri birbirine yakın davranış göstermişlerdir. Grafikten yaklaşık 6 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman oluşturmuş ve bu yükten sonra kirişler lineer bir davranış göstermiş, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranış bozulmaya başlamış ve nihai dayanımdan sonra kirişler yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişlerine göre FS45 kiriş numunelerinin eğilme rijitliklerinin de arttığı izlenmiştir (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. FS45 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği

FS45 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kirişlerin davranışları birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Yaklaşık 42 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı oluşmuş, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığı orantılı bir şekilde devam etmiştir. Maksimum kesme dayanıma yaklaştığında

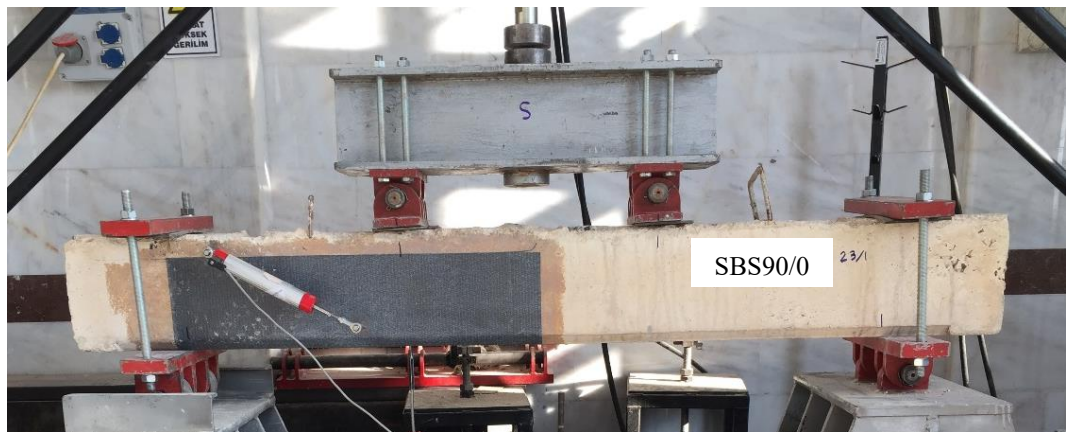
ise bu orantı bozulmaya başlamış, sonrasında kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. FS45 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

4.5. SBS90/0 Kiriş Numunesinin Eğilme Deney Sonuçları

BFRP kumaş ile yan sarım yöntemi ile (SBS90/0) güçlendirilen bir adet kiriş numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.17.). Kiriş numunesinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.5.'te sunulmuş ve kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.17. SBS90/0 kiriş numunesinin eğilme deneyi

Tablo 4.5. SBS90/0 kiriş numunesine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri

Kiriş numunesi	Kesme yükü (V) (kN)	Yüklemeye altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
SBS90/0	101,57	9,00	0,99

SBS90/0 kiriş numunesinde ortalama kesme yükü, yüklemeye altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 101,57 kN, 9 mm ve 0,99 mm olarak bulunmuştur. SBS90/0 kiriş numunesi kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. SBS90/0 kirişin kontrol kirişlerine göre kesme dayanımı ortalama %73 oranında artmıştır. Kesme yüküne karşılık oluşan ortalama deplasman ve çatlak açıklığı sırasıyla %3 ve %71 oranında azalma tespit edilmiştir.

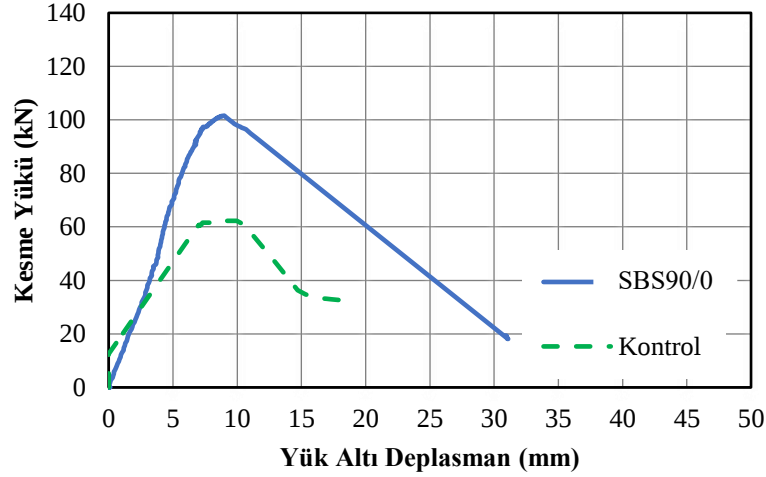
Deney sırasında, sabit hızlı yüklemeye arttıkça kesme çatlakları oluşması nedeniyle BFRP kumaş mesnete yakın bölgede beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılmış, kiriş nihai dayanımına ulaşınca çekme bölgesindeki beton örtüsü dökülmüş ve çekme donatısının aderans kaybı ile birlikte olmuş olup kesme kırılması ile ani bir şekilde göçme meydana gelmesi ile deney sona erdirilmiştir (Şekil 4.18.).



Şekil 4.18. SBS90/0 kiriş numunesinin yüklemeye sonrası deformasyon şekilleri

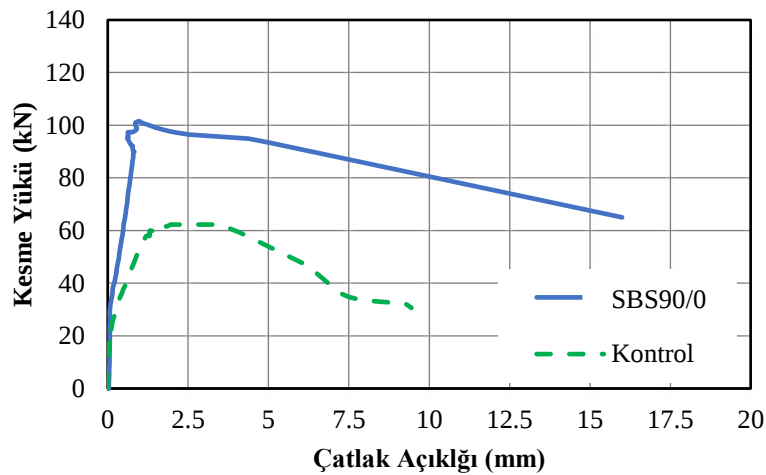
Yapılan sabit hızlı yüklemeye sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikler Şekil 4.19. ve 4.20.'de sunulmuştur. Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, yüklemeye ilk başladığında deplasman olduğu izlenmiştir. SBS90/0 kiriş kesme yükü yaklaşık 95 kN olana kadar lineer bir davranış göstermiş, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kirişin aniden yenildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, SBS90/0 kiriş

numunesinin, kontrol kirişine göre eğilme rijitliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. SBS90/0 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği

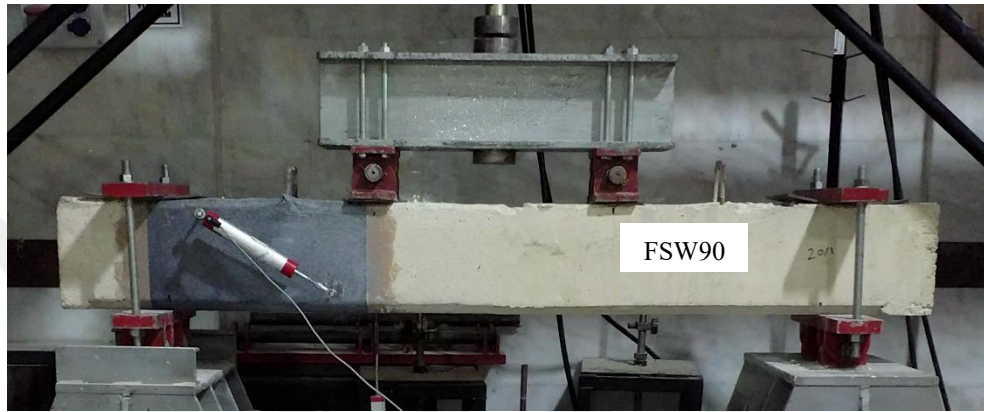
SBS90/0 kiriş numunesinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, yaklaşık 32 kN kesme yükünde ilk beton çatlakları oluşmuş, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığı lineer bir davranış göstermiş, maksimum kesme dayanıma yaklaştığında ise bu davranış bozulmaya başlamış, sonrasında kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.20.).



Şekil 4.20. SBS90/0 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

4.6. FSW90 Kiriş Numunesinin Eğilme Deney Sonuçları

BFRP kumaş ile tam sarım yöntemi ile (FSW90) güçlendirilen bir adet kiriş dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.21.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.6.'da sunulmuş ve kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.21. FSW90 kiriş numunesinin eğilme deneyi

Tablo 4.6. FSW90 kiriş numunesine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı verileri

Kiriş numunesi	Kesme yükü (V) (kN)	Yüklemeye altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
FSW90	125,20	11,14	2,74

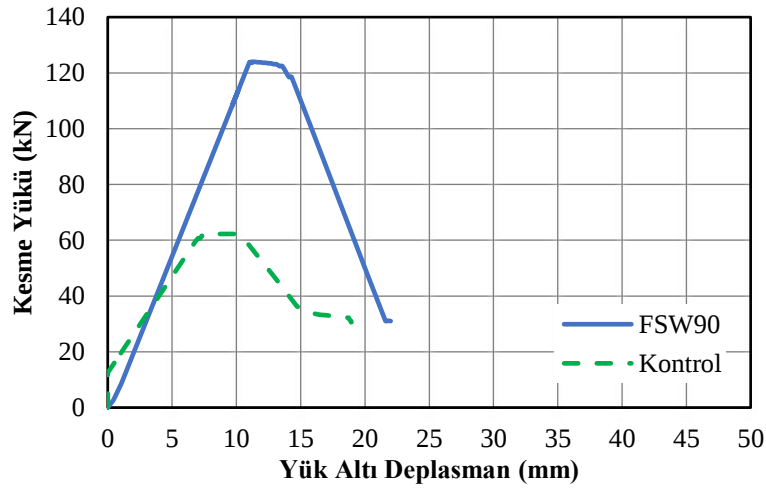
FSW90 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yüklemeye altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 125,20 kN, 11,14 mm ve 2,74 mm olarak bulunmuştur. FSW90 kiriş numunesi kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. FSW90 kiriş numunesinin kontrol kirişlerine göre %113,32 daha yüksek kesme yüküne sahip olduğu tespit edilmiştir, kesme yüküne karşılık oluşan deplasmanda %20,43 artış ve çatlak açıklığında %19,41 oranında azalma olmuştur.

Deney sırasında, sabit hızlı yüklemeye arttıkça apaçık kesme çatlaklarının oluşması veya elyafın sıyrılması izlenmemiştir. kirişler nihai dayanımına ulaşınca yan yüzeylerdeki elyaf yırtılmış olup kesme kırılması ile ani bir şekilde göçme meydana geldiğinde deney sona erdirilmiştir (Şekil 4.22.).



Şekil 4.22. FSW90 kiriş numunesinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri

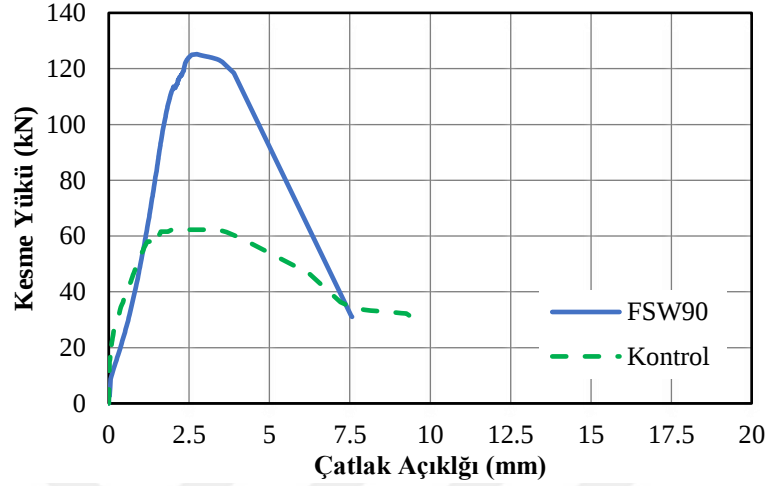
Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikleri şekilde sunulmuştur (Şekil 4.23. ve 4.24.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, yükleme ilk başladığında deplasman olduğu izlenmiştir. FSW90 kirişin kesme yükü yaklaşık 121 kN olana kadar lineer bir davranış göstermiş, kiriş maksimum kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın bozulmaya başlamış ve nihai dayanımdan sonra kiriş yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişine göre FSW90 kiriş numunesinin eğilme rijitliğinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.23.).



Şekil 4.23. FSW90 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği

FSW90 kiriş numunesinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, yaklaşık 9 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı oluşmuş, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığı orantılı bir şekilde devam etmektedir. Maksimum kesme

dayanımına yaklaştığında ise bu orantı bozulmaya başlamış, sonrasında kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.24.).



Şekil 4.24. FSW90 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği

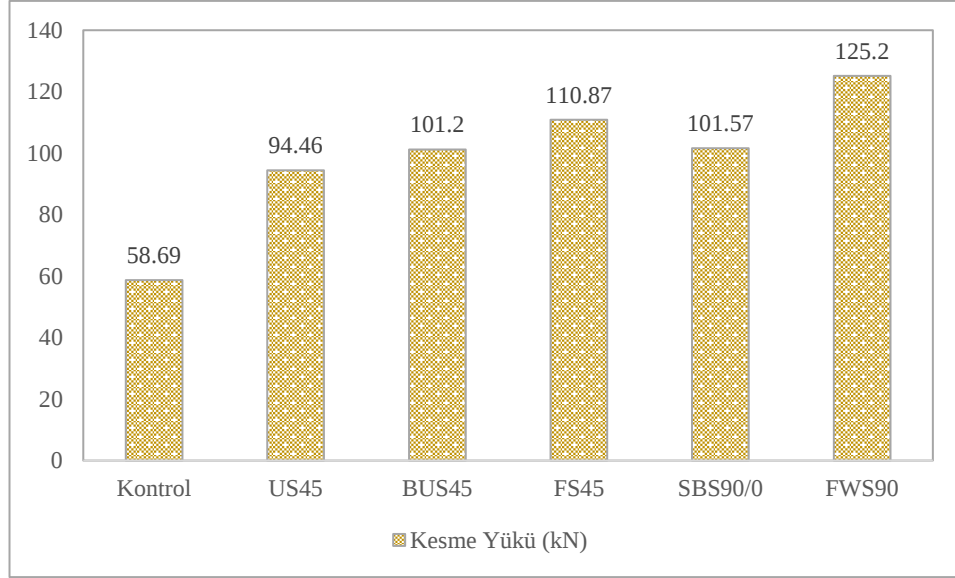
4.7. Kirişlerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kontrol kirişlerin ve BFRP Kompozit ile kesmeye karşı güçlendirilen kirişlerin deney sonuçlarından elde edilen ortalama kesme yükü, çatlak açıklığı, yükleme altı deplasmanı ve göçme biçimleri Tablo 4.7.'de sunulmuştur. Kontrol kiriş numuneleri ve BFRP ile güçlendirilen kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri Şekil 4.25.'te verilmiştir. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri Şekil 4.26.'da sunulmuştur.

Tablo 4.7. Kiriş numunelerin ortalama deneylerin sonuçları ve göçme şekilleri

Kiriş Numune	Kesme Yüğü (V) (kN)	Yükleme Altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)	Göçme Şekli
Kontrol	58,69	9,25	3,40	Kesme göçmesi
US45	94,46	8,30	2,64	Beton yırtılması + Kesme göçmesi
BUS45	101,20	6,62	2,16	Beton yırtılması + Kesme göçmesi
FS45	110,87	8,20	1,97	Elyaf Kopması + Kesme göçmesi
SBS90/0	101,57	9,00	0,99	Beton yırtılması + Kesme göçmesi
FSW90	125,20	11,14	2,74	Elyaf Kopması + Kesme göçmesi

BFRP Kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında kontrol kiriş numunelerine göre kesme yükü taşıma kapasitelerinde dikkate değer artışlar elde edilmiştir (Şekil 4.25.). Kiriş yatay eksenine 90° açılı tam sarım sürekli kumaş (FSW90) ve 45° açılı tam sarım şeritler (FS45) yöntemleri ile güçlendirilen kiriş numunelerinin kesme yükü taşıma kapasitelerinde diğer güçlendirilmiş kiriş numunelere göre büyük artışlar elde edilmiştir. FSW90 ve FS45 kirişlerinde kesme yükü taşıma kapasitesi kontrol kirişlerine göre sırasıyla ortalama %113 ve %89 artış görülmüştür. Ayrıca, bu iki kiriş kendi aralarında kıyaslandığında, FSW90 kiriş numunesinin kesme yükü taşıma kapasitesi %13 daha yüksek olduğu görülmüştür. En az kesme dayanım artışı kiriş yatay eksenine 45° açılı U sarım şeritler (US45) yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunelerinde elde edilmiştir. Bunun sebebi; bazalt elyaf nihai (etkili) dayanımına erişmeden önce beton örtüsü koparak ayrılmasıdır. US45 kiriş numunelerin kesme yükü taşıma kapasitesinde kontrol kirişlerine göre ortalama %61 artış göstermiştir. Bu problemi ortadan kaldırmak için U şeritlerin uçlarına yatay şerit başlık yapılmıştır. 45° açılı U şerit ile iki yatay (başlık) şerit yöntemi ile US45 kiriş numunelerine göre %8 iyileşme sağlanmıştır. 45° açılı şerit yöntemleri ile güçlendirilen kiriş numuneler arasında en yüksek dayanım 45° açılı tam sarım şerit yöntemine (FS45) elde edilmiştir. Ancak, döşemeli kirişlere tam sarım yöntemlerin uygulanması yapısal açıdan gerçekte zor ve zahmetli olacağından U şeklinde sarım ve yan sarım yöntemleri daha çok tercih edilmektedir. Yine de, 45° açılı U sarım şerit ile iki yatay başlık şerit yöntemi (BUS45) ve $90/0^\circ$ yönlendirilmiş BFRP sürekli kumaş ile yan sarım yöntemi (SBS90/0) kullanarak kontrol kirişlere göre önemli artışlar elde edilmiştir (sırasıyla ortalama %72 ve %73 artış). Ayrıca, bu iki güçlendirme yöntemi ile güçlendirilen kiriş numuneleri (45° açılı U sarım şerit ile yatay başlık şerit ve yan sarım kumaş) en yüksek kesme yükü taşıma kapasitesine sahip olan FS45 kirişleri ile kıyaslarsak sırasıyla %9 ve %8 daha az dayanım göstermiştir. Ayrıca BFRP kompozitler ile güçlendirilen kirişler benzer kiriş özelliklerine sahip ancak diğer FRP kompozit malzemeler (örneğin, GFRP ve CFRP) ile güçlendirilen kirişlere göre iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır [51] [55,56].

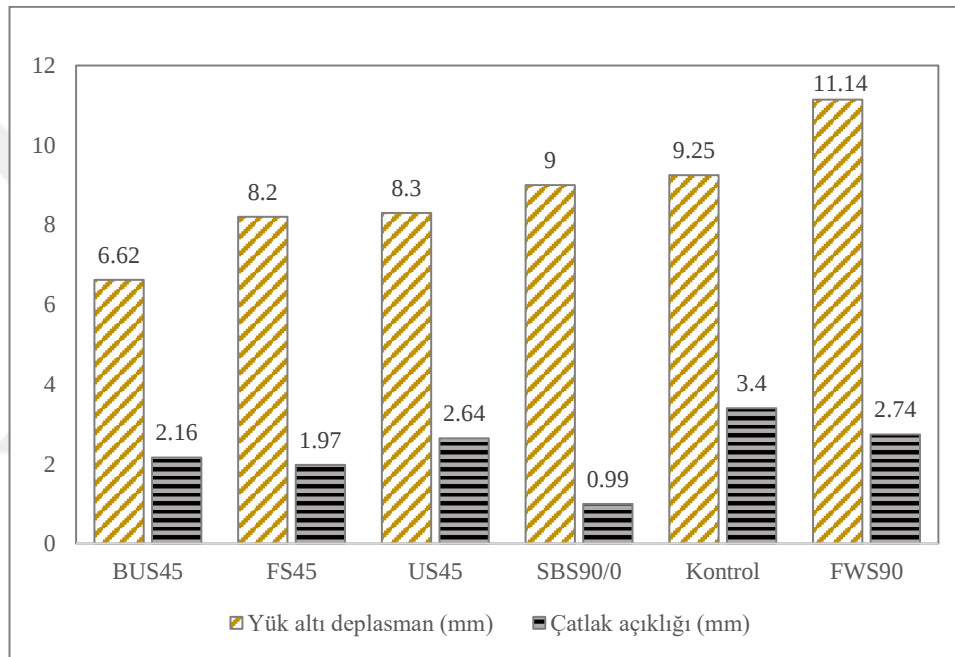


Şekil 4.25. Kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri

FSW90 kiriş dışında BFPR kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında kontrol kirişlere göre yükleme altı deplasman değerlerinde azalmalar elde edilmiştir (Şekil 4.26.). Deneysel çalışmada kontrol kirişler ve güçlendirilmiş kirişlerin arasında 90° açılı tam sarım sürekli kumaş yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunesinin (FSW90) en büyük yükleme altı deplasman yapan kiriştir. En küçük yükleme altı deplasman ise, 45° açılı U şerit ile iki 0° başlık şerit yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur (BUS45). FSW90 kirişin, Kontrol, US45, BUS45, FS45 ve SBS90/0 kirişlere göre yükleme altı deplasmanı sırasıyla %20,5, %34, %68, %36 ve %24 oranlarda daha yüksek çıkmıştır. Kontrol kirişin, FS45, US45 ve SBS90/0 kirişlere göre yükleme altı deplasmanı yaklaşık %3 ile %11 oranında daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak kirişler maksimum kesme dayanımlarına daha az deplasman ile eriştikleri anlaşılmaktadır.

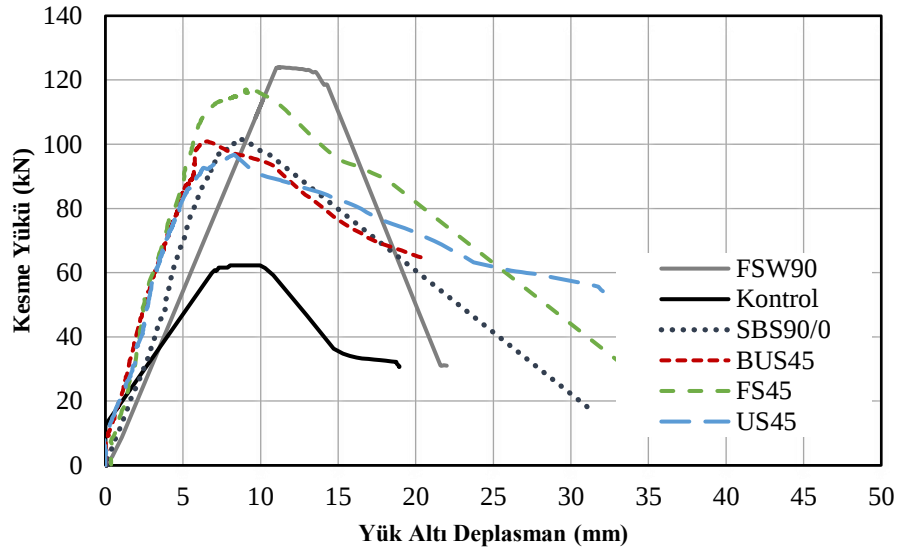
BFPR kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tamamında kontrol kirişlere göre maksimum kesme yüklerine karşılık gelen çatlak açıklığı değerlerinde azalmalar elde edilmiştir (Şekil 4.26.). Deneysel çalışmada güçlendirilmiş kirişlerin arasında FSW90 en büyük çatlak sahibi kiriştir. En küçük çatlak açıklığının sahibi ise, yan sarım yöntemi ile güçlendirilen kiriştir (SBS90/0). Maksimum kesme yüküne karşılık gelen çatlak açıklığı açısından, SBS90/0 kiriş numunesinin, Kontrol, US45, BUS45,

FS45 ve FSW90 kiriş numunelere göre sırasıyla %71, %62,5, %54, %50 ve %64 azalma tespit edilmiştir. FSW90 kirişin ise, US45, BUS45, FS45 ve SBS90/0 kirişlere göre sırasıyla ortalama %4, %27, %39 ve %178 artış ve kontrol kirişlere göre ortalama %19,5 azalma tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada BFRP şeritler ile uygulanan 3 farklı güçlendirme yöntemi arasında, 45° açılı tam sarım şerit yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunelerinde (FS45) en küçük çatlak açıklığı elde edilmiştir. FS45 kiriş numuneler, 45US ve BUS45 kiriş numunelere göre sırasıyla %25,5 ve %9 daha az çatlak açıklığı sahip olduğu tespit edilmiştir.

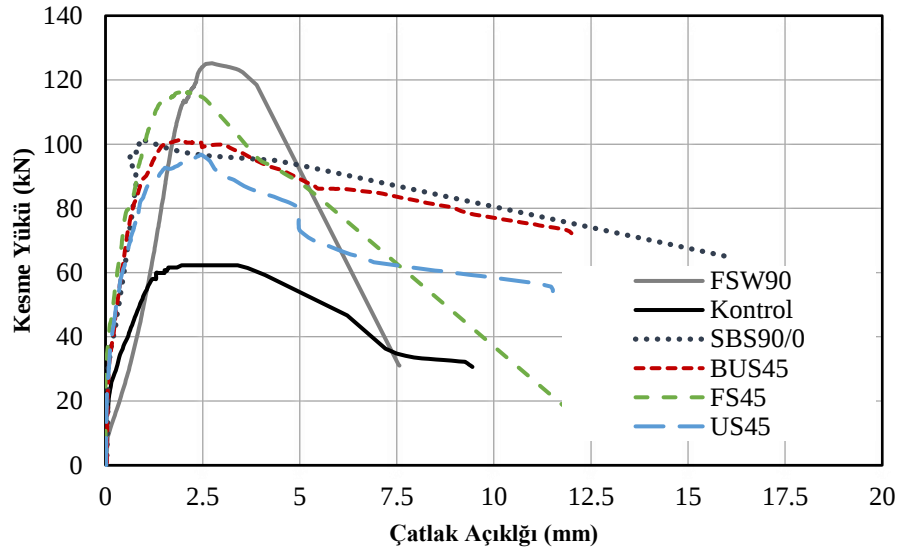


Şekil 4.26. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri

Kontrol kirişlerine göre BFRP kompozitler ile güçlendirilen kiriş numunelerin eğilme rijitlikleri artmıştır. Ayrıca, BFRP şeritler ile güçlendirilen US45, BUS45 ve FS45 kiriş numunelerin maksimum dayanımlarında farklılık oluşsa da, 85 kN kesme yüküne kadar kesme yükü-deplasman ve kesme yükü-çatlak açıklığı davranışı orantılı bir şekilde artmış ve kiriş numuneleri birbirine oldukça yakın davranış göstermişlerdir (Şekil 4.27.). Ayrıca, ortalama 35 kN kesme yükünde ilk çatlakların oluşumları izlenmiştir (Şekil 4.28.).



Şekil 4.27. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.28. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-çatlak açıklığı grafikleri

4.8. Deneysel Sonuçların Analitik Tahminlerle Karşılaştırılması

FRP kompozitler ile kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini tahmin etmek üzere önerilen birçok yaklaşım ve yönetmelik bulunmaktadır. Bu bölümde deney sonuçlarının literatürde yaygın olarak kabul gören Chen-Teng, Khalifa-Nanni modelleri ile ve ACI 440.2R, Fib-TG 9.3 yönetmelikleri ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. BFRP kompozitlerle güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımlarından kontrol kirişlerinin kesme dayanımı çıkarılarak BFRP kompozitlerin kesmeye katkısı bulunmuştur ($V_{f, test}$). Betonarme kirişlerin kesme dayanımı için deneysel sonuçlar ve analitik sonuçlar Tablo 4.8.'de sunulmuştur.



Tablo 4.8. Deney sonuçları ve analitik sonuçlar

Numune Adı	Deneyisel Sonuçları			Analitik Sonuçları								
	Göçme anındaki kesme Kuvveti (KN)	$V_c + V_s$ (KN)	$V_{f,test}$ (KN)	ACI 318	ACI 440.2R		FIB-TG 9.3		Chen-Teng modeli		Khalifa-Nanni modeli	
				$V_c + V_s$ (KN)	$V_{f,ana}$ (KN)	$\frac{V_{f,test}}{V_{f,ana}}$	$V_{f,ana}$ (KN)	$\frac{V_{f,test}}{V_{f,ana}}$	$V_{f,ana}$ (KN)	$\frac{V_{f,test}}{V_{f,ana}}$	$V_{f,ana}$ (KN)	$\frac{V_{f,test}}{V_{f,ana}}$
Kontrol	58,69	58,69	-	62,5	-	-	-	-	-	-	-	-
US45	94,46	58,69	35,77	62,5	8,98	3,98	27,22	1,31	15,31	2,34	8,50	4,21
BUS45	101,20	58,69	42,51	62,5	8,98	4,73	27,22	1,56	15,31	2,78	8,50	5
FS45	110,87	58,69	52,18	62,5	13,42	3,89	77,17	0,68	57,09	0,91	58,71	0,89
SBS90/0	101,57	58,69	42,88	62,5	10,33	4,15	36,03	1,19	30,93	1,39	6,16	6,96
FSW90	125,20	58,69	66,51	62,5	19,73	3,37	91,12	0,73	59,21	1,12	86,35	0,77

BUS45 ve US45 kirişlerin kesme dayanımlarını en yakın tahmin eden Fib-TG 9.3 yönetmeliği, FS45 kirişlerin kesme dayanımlarını en yakın tahmin eden Chen-Teng ve Khalifa-Nanni modelleri, SBS90/0 ve FSW90 kirişlerin kesme dayanımlarını en yakın tahmin eden Chen-Teng modeli olmuştur. Deneysel sonuçlara göre ACI 440.2R yönetmeliğinde BFRP kompozitin kesmeye katkısı 3 ila 4 kat daha düşük sonuçlar vererek güvenli tarafta kalındığı anlaşılmaktadır. FIB-TG 9.3 yönetmeliği ile hesaplanan BFRP kompozitin kesme dayanımı katkısı genel olarak yakın sonuçlar vermiştir. Ancak deney sonuçlarına göre sürekli levhalar ve şeritlerle tam sarım durumunda kesme dayanımı katkısı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Chen-Teng modeli ile sürekli levhalar ve şeritler ile tam sarım ve yan sarım durumlarında BFRP kompozitlerin kesmeye katkısı genel olarak daha iyi ve yakın sonuçlar vermiş ve U şeklinde sarım durumunda ise iki kat daha düşük sonuçlar vermiştir. Khalifa-Nanni modeli ise tüm tam sarım şeklindeki durumlarda daha yüksek ve yakın sonuçlar vermiştir. Ancak diğer sarım yöntemlerine göre 4 ile 7 kat daha düşük sonuçlar vermiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin BFRP kompozitler ile güçlendirmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kirişlerin güçlendirilmesinde BFRP kompozitin ve sarım yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Ayrıca deney sonuçların mevcut hesap yöntemleri ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli kirişler 150×250 mm kesitinde ve 2000 mm boyunda laboratuvar ortamında üretilmiştir. Betonarme kiriş numuneleri; eğilme momenti taşıma gücü yeterli olacak şekilde, kirişin bir tarafı kesme taşıma gücü yetersiz diğer tarafı kesme taşıma gücü yeterli olarak tasarlanmıştır. Kiriş numunelerinin kesme dayanımı zayıf bölgeleri, BFRP kompozitler ile tam sarım, kısmi sarım ve şerit yöntemleri ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen kiriş numuneleri güçlendirme şekillerine uygun olarak isimler verilmiştir. Kontrol kiriş numuneleri “Kontrol”, 45° açılı U sarım şerit “US45”, 45° açılı U sarım şerit ile yatay başlık şeritler “BUS45”, 45° açılı tam sarım şerit “FS45”, çift doğrultulu (90°/0°) sürekli levhalar ile yan sarım “SBS90/0” ve 90° açılı sürekli levhalar ile tam sarım “FSW90” şeklinde isimlendirilmiştir. Kiriş numuneleri güçlendirilen kiriş numuneleri ve kontrol kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme ile dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Kiriş numunelerin ortalama kesme dayanımları, sehim kapasiteleri, kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ve kesme deformasyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- 1- BFRP kompozitler ile güçlendirilen tüm kiriş numunelerinin kesme dayanımları kontrol kiriş numunelerine göre önemli ölçüde artmıştır. Bu artış US45 kiriş numunelerinde %61, BUS45 kirişlerinde %72,4, FS45 kirişlerinde %89, SBS90/0 kirişinde %73, FSW90 kirişinde %113,32 oranında olmuştur.
- 2- Tam sarım yöntemlerinde elyaflar tam kapasite çalışmıştır. Diğer yöntemlerde bazalt lifler kopmamış ve BFRP kompozit beton yüzeyini kopararak kiriş yüzeyinden ayrılmıştır.

- 3- BUS45 kiriş numunelerin US45 kiriş numunelerinden %8 daha fazla kesme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Başlık şerit elyafın beton yüzeyden sıyrılmasını bir miktar önlemiştir.
- 4- Analitik model sonuçları incelendiğinde yönetmelikler açısından FIB-TG 9.3 yönetmeliği ile hesaplanan BFRP kompozitin kesme dayanımı katkısı genel olarak yakın sonuçlar vermiştir. Ancak deney sonuçlarına göre sürekli kumaş ve şeritlerle tam sarım durumunda kesme dayanımı katkısı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Model çalışmalarında ise Chen-Teng modeli ile sürekli kumaş ve şeritler ile tam sarım ve yan sarım durumlarında BFRP kompozitlerin kesmeye katkısı genel olarak daha iyi ve yakın sonuçlar vermiş ve U şeklinde sarım durumunda ise iki kat daha düşük sonuçlar vermiştir.
- 5- BFRP kompozit ile güçlendirilmiş kirişler beton kesme çatlağı oluşmadan daha yüksek dayanım göstermektedir. Ayrıca kirişlerin tamamında kontrol kirişlerine göre kesme dayanımlarına karşılık gelen çatlak açıklığı azaltmıştır.
- 6- BFPR kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında kontrol kirişlere göre kesme dayanımına karşılık gelen deplasman değerleri düşmüş ve kiriş eğilme rijitlikleri artmıştır.
- 7- Son olarak, BFRP kompozitlerin betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde ileriye dönük ümit verici alternatif bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca;

BFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu eleman modellemesi yapılarak kirişler daha detaylı incelenebilir ve yeni deney numuneler üretilebilir. BFRP kompozitin beton yüzeylerinden sıyrılmaması için farklı yöntemler araştırılabilir. Dokunmuş bazalt kumaşı (iki doğrultulu - örgülü kumaş), BFRP plaka ve Bazalt hibrit kompozitler kullanılarak betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi

zerindeki etkisi araştırılabilir. BFRP kompozitler ile kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi üzerindeki etkisi araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Swamy RN, Jones R, Bloxham JW. Structural behavior of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel. *Struct Eng* 1987;65A:59–68.
- [2] Jones R, Swamy RN, Charif A. Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates. *Struct Eng* 1988;66:85–94.
- [3] Meier U. Strengthening of structures using carbon fiber/epoxy composites. *Construct Building Mater* 1995;9(6):341–51.
- [4] Drimoussis EH, Cheng JJ. Shear strengthening of concrete girders using carbon fibre reinforced plastic sheets. *Structural Engineering Report No. 205*, Department of Civil Engineering, University of Alberta; 1994. 177 pages.
- [5] Khalifa A, Nanni A (2002) Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Constr Build Mater* 16:135–146
- [6] Baggio D, Soudki K, Noel M (2014) Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Constr Build Mater* 66:634–644
- [7] Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, Tanaka T (1996) Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams. In: El-Badry MM (ed) *Advanced composite materials in bridges and structures (2nd international conference)*. Published by the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada, pp 621–628.
- [8] Taerwe L, Khalil H, Matthys S (1997) Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets. In: *Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, vol 1. Published by Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp 483–490
- [9] Norris T, Saadatmanesh H, Ehsani MR (1997) Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets. *J Struct Eng* 123(7):903–911.
- [10] Chaallal O, Nollet MJ, Perraton D (1998) Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP strips. *J Compos Constr* 2(2):111–113.

- [11] Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504–512.
- [12] Berset JD (1992) Strengthening of reinforced concrete beams for shear using FRP composites. MS thesis, Dept. of Civil and Environmental engineering, MIT.
- [13] Al-Sulaimani GJ, Sharif A, Basunbul IA, Baluch MH, Ghaleb BN (1994) Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. *ACI Struct J* 91(3):458–464.
- [14] Sundarraja MC, Rajamohan S (2009) Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips—an experimental study. *Constr Build Mater* 23(2):856–864.
- [15] Saribiyik A. ve Caglar N., «Flexural strengthening of RC Beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP,» *Structural Engineering and Mechanics*, cilt 58, no. 5, pp. 825-845, 2016.
- [16] Berozashvili M. Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications. *Adv Mater Com News, Compos Worldwide* 2001;21(6):5–6
- [17] Brik VB. Advanced concept concrete using basalt fiber composite reinforcement. Tech Res Report submitted to NCHRP-IDEA, Project 25; 1999.
- [18] Brik VB. Performance evaluation of basalt fibers and composite rebars as concrete reinforcement. Tech Res Report submitted to NCHRP-IDEA, Project 45; 1999.
- [19] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structure (ACI 440.2R-08). Farmington Hill, Mich., USA; 2008.
- [20] fédération internationale du béton, 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Task Group 9.3, Bulletin No. 14, Lausanne, Switzerland.
- [21] Guadagnini M, Pilakoutas K, Waldron P. Shear resistance of FRP RC beams: experimental study. *J Compos Construct* 2006;10(6):464–473 2006.
- [22] Sas G, Täljsten B, Barros J, Lima J, Carolin A. Are available models reliable for predicting the FRP contribution to the shear resistance of RC beams? *J Compos Construct* 2009;13(6):514–34.

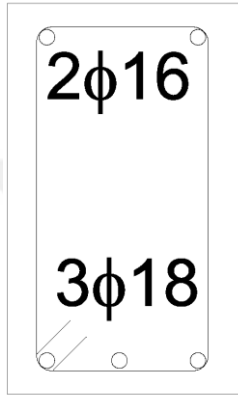
- [23] Bousselham A, Chaallal O. Behaviour of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fibre-reinforced polymer – an experimental study. *ACI Struct J* 2006;103(3):339–47.
- [24] Chen GM, Teng JG, Chen JF, Rosenboom OA. Interaction between steel stirrups and shear-strengthening FRP strips in RC beams. *J Compos Construct* 2010;14(5):498–509.
- [25] Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004. “Betonarme”, Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 459-473, (2004).
- [26] Kong, F.K., and Evans, R.H., "reinforced and prestressed concrete" 3rd.ed., Nelson, (2017).
- [27] Panda, K. C., Barai, S. V., & Bhattacharyya, S. K. (2018). Shear Strengthening of T-beam with GFRP. *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*.
- [28] Pellegrino C, Modena C. FRP shear strengthening of RC beams with transverse steel reinforcement. *J Compos Construct* 2002;6(2):104–11.
- [29] Pellegrino C, Modena C. An experimentally based analytical model for shear capacity of FRP strengthened reinforced concrete beams. *Mech Compos Mater* 2008;44(3):231–44.
- [30] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05), Farmington Hills, Mich., USA; (2005).
- [31] Türk Standartları Enstitüsü (TSE) 2000 TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Birinci Baskı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2000).
- [32] Modifi A, Chaallal O. Shear strengthening of RC beams with EB FRP: influencing factors and conceptual debonding model. *J Compos Construct* 2011;15(5): 62–74.
- [33] Lima J, Barros J. Reliability analysis of shear strengthening externally bonded FRP models. *Proc Inst Civil Eng (ICE) – Struct Build* 2011;164(1):43–56.
- [34] Chen JF, Teng JG. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construct Build Mater* 2003;17:27–41.
- [35] Chen JF, Teng JG. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP rupture. *J Struct Eng* 2003;129(5):615–25.

- [36] Khalifa A, Gold WJ, Nanni A, Abdel Aziz MI. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. *J Compos Construct* 1998;2(4):195–202.
- [37] Triantafillou TC, Antonopoulos CP. Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP. *J Compos Construct* 2000;4(4):198–205.
- [38] Triantafillou TC (1998) Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy bonded FRP composites. *ACI Struct J* 95(2):107–115.
- [39] Uji K (1992) Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets. *Trans Jpn Concr Inst* 14:253–266.
- [40] Funakawa I, Shimono K, Watanabe T, Asada S, Ushijima S (1997) Experimental study on shear strengthening with continuous fiber reinforcement sheet and methyl methacrylate resin. In: *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures: proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, vol 1. Published by Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp 475–482.
- [41] Araki N, Matsuzaki Y, Nakano K, Kataoka T, Fukuyama H (1997) Shear capacity of retrofitted RC members with continuous fiber sheets. In: *Non-Metallic (FRP) reinforcement for concrete structures: proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, vol 1. Published by Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp 515–522.
- [42] Khalifa A, Tumialan G, Nanni A, Belarbi A (1999) Shear strengthening of continuous RC beams using externally bonded CFRP sheets. *Fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures*. In: Dolan CW, Rizkalla SH, Nanni A (eds) *Proceedings of 4th international symposium*, SP-188, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp 995–1008.
- [43] Taljsten B, Elfgren L (2000) Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials: evaluation of different application methods. *Compos B Eng* 31:87–96.
- [44] Li A, Assih J, Delmas Y (2001) Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets. *J Struct Eng* 127(4):374–380.
- [45] Li A, Diagana C, Delmas Y (2002) Shear strengthening effect by bonded composite fabrics on RC beams. *Compos B* 33:225–239.
- [46] Taljsten B (2003) Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Constr Build Mater* 17(1):15–26.

- [47] Adhikary BB, Mutsuyoshi H, Ashrof M (2004) Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer sheets with bonded anchorage. *ACI Struct J* 101(5):660–668.
- [48] Zhang Z, Hsu CTT, Moren J (2004) Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates. *J Compos Constr* 8(5):403–414.
- [49] Zhang Z, Hsu CTT (2005) Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates. *J Compos Constr* 9(2):158–169.
- [50] Islam MR, Mansur MA, Maalej M (2005) Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems. *Cement Concr Compos* 27:413–420.
- [51] Cao SY, Chen JF, Teng JG, Hao Z, Chen J (2005) Debonding in RC beams shear strengthened with complete FRP wraps. *J Compos Constr* 9(5):417–428.
- [52] Carolin A, Taljsten B (2005) Experimental study of strengthening for increased shear bearing capacity. *J Compos Constr* 9(6):488–496.
- [53] Mosallam AS, Banerjee S (2007) Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Compos B* 38:781–793.
- [54] Leung CKY, Chen Z, Lee S, Ng M, Xu M, Tang J (2007) Effect of size on the failure of geometrically similar concrete beams strengthened in shear with FRP strips. *J Compos Constr* 11(5):487–496.
- [55] A. Saribiyik ve N. Caglar, «Flexural strengthening of RC Beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP,» *Structural Engineering and Mechanics*, cilt 58, no. 5, pp. 825-845, 2016.
- [56] Li W, Leung CKY (2017) Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips. *Compos Struct* 177:141–157.
- [57] Qureshi, H. J., & Saleem, M. U. (2018). Flexural and Shear Strain Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Adhered to a Concrete Surface. *Materials*, 11(12), 2596.

EKLER

Ek 1. Kiriş Numunelerin Dayanım Hesaplamaları



$$b_w = 150 \text{ mm}$$

$$C = 30 \text{ mm} \quad C16, S420, S360$$

$$d = 220 \text{ mm} \quad f_{ck} = 16, f_{yk} = 420, f_{ctk} = 1.4$$

$$f_{ywk} = 360 \quad L = 1,6 \text{ m}$$

$$2 \text{ } \emptyset 16 \quad (A'_s) = 402 \text{ mm}^2$$

$$3 \text{ } \emptyset 18 \quad (A_s) = 763 \text{ mm}^2$$

Kiriş numunesinin basınç donatısı oranı:

$$\rho' = \frac{A'_s}{b_w d} = 0,0122$$

Kiriş numunesinin çekme donatısı oranı:

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} = 0,023$$

Minimum donatı oranı:

$$\rho_{min} = 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0027$$

$$\rho \geq \rho_{min} \text{ koşulu : } \rho = 0,023 \geq \rho_{min} = 0,0027 \text{ (sağlanmıştır)}$$

Dengeli donatı oranı:

$$\rho_b = 0,85 k_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{600}{600 + f_{yd}} \right) = 0,016$$

$$\text{Çekme ve basınç donatıları oranları farkı: } \rho - \rho' = 0,0108$$

$$\rho \leq \rho_{min} \text{ koşulu: } \rightarrow \rho - \rho' \leq \{0,85 \rho_b \rightarrow 0,0108 < ? \} \{0,0136 \text{ (sağlanmıştır)}\}$$

Basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü:

$$\rho - \rho' \geq \left(0,85 k_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}}\right) \left(\frac{600}{600-f_{yd}}\right) \frac{d'}{d} \rightarrow 0,0108 < 0,0125 \text{ (donatı akmamıştır)}$$

Denge denklemi:

$$F_c + F'_s = F_s \rightarrow 0,85 f_{cd} b_w k_1 c + A'_s \sigma' = A_s f_{yd}$$

$$\sigma'_s = 600 \left(\frac{c - d'}{c} \right)$$

$$\frac{(0,85 f_{cd} b_w k_1) c^2}{A_1} + \frac{(600 A'_s - A_s f_{yd}) c}{A_2} - \frac{(A'_s 600 d')}{A_3} = 0$$

İkinci dereceden denklemin çözümünden:

$$c_{1,2} = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4 A_1 A_3}}{2 A_1}$$

İkinci derece denklemin katsayıları:

$$A_1 = 1734, A_2 = -79260, A_3 = -7236000$$

Denklemin kökleri:

$$c_{1,2} = 53,5 \text{ mm}$$

$$\text{Basınç bloğu derinliği} \rightarrow a = k_1 c = 0,85 * 53,5 = 45,48 \text{ mm}$$

$$\text{Basınç donatısındaki gerilme: } \sigma'_s = 600 \left(\frac{c-d'}{c} \right) = 263,55 \text{ N/mm}^2$$

$$M_r = (A_s f_{yd} - A'_s \sigma'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \sigma'_s (d - d') = 62,44 \text{ kN.m}$$

$$M_r = \left(P \frac{L}{6} \right) \rightarrow P = 234,15 \text{ kN.m}$$

Kiriş numunesi kesme dayanım hesaplaması;

$$V_r = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_c}}{6} b_w d = 22 \text{ kN}$$

$$V_s = A_{sw} f_{yw} k \frac{d}{s} = 39,8 \text{ kN}$$

$$V_r = (P/2) = 61,8 \text{ kN} \rightarrow P = 123,6 \text{ kN}$$

ÖZGEÇMİŞ

Bassel ABODAN, 01.01.1988’de Halep’te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Halep’te tamamladı. 2006 yılında Amerikan Koleji’nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı Tishreen Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2014 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalı’nda yüksek lisansını başladı.

