

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

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER ETRİYE DONATILI  
DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİNİN  
KESME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Eymen KADI**

**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

CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER ETRİYE DONATILI  
DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİNİN  
KESME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Eymen KADI


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.

Muhammed Eymen KADI

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. 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.

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Metin İPEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan, bana yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Bassel ABODAN'a ve İzzet DEĞİRMENCİ'e çok teşekkür ederim.

Laboratuvar imkânlarını kullanmama müsaade eden Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne ve Laboratuvar ortamında bana deneyim bilgilerini esirgemeyen laboratuvar teknisyeni Sami GÜRSES'e teşekkür ederim.

Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına destekleri için teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLOLAR LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
SUMMARY .....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsam .....	6

### BÖLÜM 2.

#### BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI VE LİTERATÜR

ARAŞTIRMASI .....	8
2.1. Kesme Kırılması Durumu .....	8
2.1.1. Kesme takviyesi olmayan betonarme elemanlar .....	10
2.1.1.1. Betonarme kiriş kesme kırılması biçimleri .....	12
2.1.2. Çelik etriyeli betonarme kirişler .....	14
2.1.2.1. Betonarmede kesme gerilmeleri karşılanan iç kuvvetler .....	14
2.2. FRP Donatılı Betonarme Kirişler.....	15
2.2.1. FRP donatılar .....	15
2.2.1.1. Karbon elyaf.....	15
2.2.1.2. Cam elyaf .....	16
2.2.1.3. Aramid elyaf .....	16

2.2.1.4. Bazalt elyaf .....	17
2.2.2. Reçine (Matrisler) .....	17
2.2.2.1. Epoksiler .....	17
2.2.2.2. Polyesterler .....	18
2.2.2.3. Vinilesterler .....	18
2.2.3. Pultruzyon yöntemi .....	18
2.3. FRP Etriyeli Betonarme Kirişlerin Kesme Hesap Yöntemleri .....	21
2.3.1. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 440.1R-15) .....	21
2.3.2. Kanada Standartlar Birliği (CAN / CSA-S806-12) .....	22
2.3.3. Kanada Tasarım Rehberi (ISIS-M03-07) .....	24
2.3.4. Lignola ve arkadaşları tarafından önerildiği denklem .....	25
2.3.5. Kara ve arkadaşları tarafından önerildiği denklem .....	26
2.4. Literatür Araştırması .....	27

### BÖLÜM 3.

MALZEME VE YÖNTEM .....	32
3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri .....	32
3.1.1. Kiriş betonu .....	32
3.1.2. Çelik donatılar .....	33
3.1.2. GFRP etriyeler .....	34
3.2. Deneysel Çalışma .....	37
3.2.1. Test düzeneği, parametreleri ve numune ayrıntıları .....	37
3.2.1.1. Referans kirişler .....	39
3.2.1.2. Nervürlü GFRP etriyeli kirişler .....	40
3.2.1.3. Kumlu GFRP etriyeli kirişler .....	42
3.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması .....	43
3.2.2.1. Kiriş kalıbı .....	43
3.2.2.2. Kiriş numunelerin kalıplara yerleştirilmesi .....	44
3.2.2.3. Beton dökümü .....	46
3.2.3. Deney düzeneği .....	47
3.2.3.1. Yükleme ve ölçüm düzeneği .....	47

## BÖLÜM 4.

### GFRP ETRİYELİ BETONARME KİRİŞ DENEY SONUÇLARI VE TEORİK

ANALİZ .....	52
4.1. Referans Kiriş Numunelerinin Eğilme Deneyi Sonuçları .....	52
4.2. GN100 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları .....	55
4.3. GN75 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları .....	58
4.4. GK75 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları .....	62
4.5. GN50 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları .....	67
4.6. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	71
4.7. Deneysel Sonuçların Teorik Hesap Sonuçları ile Karşılaştırılması ..	74

## BÖLÜM 5.

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	76
-------------------------	----

KAYNAKLAR .....	79
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ .....	83
----------------	----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_{fv}$	: Kesme donatılarının toplam kesit alanı
AFRP	: Aramid Elyaf Takviyeli Polimer
$A_{sw}$	: Çelik etriyelerin kesit alanı
$a$	: Kesme açıklığı
AR-cam	: Elkali-dirençli cam elyaf
BFRP	: Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer
$b_w$	: Kesit genişliği
$c$	: Çatlamış kesit bölümünün tarafsız eksen derinliği
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CTE	: Termal genleşme katsayısı
$d$	: Faydalı derinlik
$d_b$	: GFRP donatının çapı
E-cam	: Elektrikli cam elyaf
$E_c$	: Betonun elastisite modülü
$E_f$	: Boyuna GFRP donatının elastisite modülü
$E_s$	: Çelik elastisite modülü
$E_K$	: Eğik kesme yenilmesi
$f'_c$	: Beton basınç dayanımı
$f_{ctk}$	: Beton hesap çekme dayanımı
$f_{fu}$ büküm	: GFRP büküm kapasitesi
$f_{fv}$	: FRP kesme takviyesinde maksimum hesap gerilmesi
$f_{su}$	: Çelik maks. Çekme dayanımı
$f_{yk}$	: Çelik Akma dayanımı
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
GK75	: 75 mm adım mesafesi cam kumlu-nervürlü etriyeli giriş numunesi



GN75	: 75 mm aralıkla nervürlü cam etriyeli kiriş numunesi
GN100	: 100 mm aralıkla nervürlü cam etriyeli kiriş numunesi
GN50	: 50 mm aralıkla nervürlü cam etriyeli kiriş numunesi
K_K	: GFRP etriyelerini koparak kesme yenilmesi
$K$	: Faydalı derinliğinin azalma katsayısı
$K_a$	: Kemer etkisinde beton kesme dayanımı arttırılmasının faktörü
$K_m$	: Moment/kayma oranının etkilerini açıklayan faktörü
$K_r$	: Boyuna donatı rijitliği
$K_s$	: Beton kesme dayanımı azalayan faktörü
$M$	: Moment
PAN	: Poli akrilonitril
PM1	: Potansiyometre numara 1
PM2	: Potansiyometre numara 2
$R_t$	: Gerçek çatlak açıklığı
RC	: Betonarme kiriş
$r_b$	: FRP köşe yuvarlatma yarı çapı
$S$	: Kesme donatılarının aralığı
S-cam	: Yüksek mukavemetli cam elyaf
$T$	: Kesme kuvveti
$t$	: Ölçülen çatlak açıklığı
$V$	: Kesme kuvveti
$V_{cc}$	: Çatlamamış betondaki kesme dayanımı
$V_{cd}$	: Kaldıraç etkisiyle kesme dayanımı
$V_{ci}$	: Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle kesme dayanımı
$V_{cf}$	: FRP donatılı beton kesme dayanımı
$V_{cr}$	: Betonda toplam kesme dayanımı
$V_{exp}$	: Deneysel kesme kuvveti
$V_r$	: Kirişin kesme kapasitesi
$V_{Rd,f}$	: FRP kesme donatının kesme dayanımı
$V_{sw}$	: Çelik etriyelerin kesme dayanımı
$V_{sf}$	: FRP etriyelerin kesme dayanımı

$\beta$	: Çatlak açısı
$\gamma_{f,\emptyset}$	: Emniyet faktörü
$\Delta$	: Deplasman değeri (Sehim)
$\varepsilon_1$	: Kesitin orta derinliğindeki boyuna şekil değıştirme değeri
$\emptyset$	: Diyagonal basınç gerilmesinin açısı
$\emptyset_c$	: Beton için mukavemat faktörü
$\lambda$	: Beton yoğunluğunu hesaba katan faktör
$\rho$	: Basınç boyuna donatının oranı
$\rho'$	: Çekme boyuna donatının oranı
$\rho_b$	: Dengli donatı oranı
$\rho_f$	: GFRP boyuna donatı oranı
$\rho_v$	: Kesme donatı oranı
$\Sigma F_{sw}$	: Eğik çatlağın kestiğı etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamı
$\sigma_c$	: Normal basınç gerilmesi
$\sigma_{sw}$	: Eğik çatlağın kestiğı etriyelerdeki çekme gerilmesi
$\sigma_t$	: Normal çekme gerilmesi
$\tau_s$	: Kayma gerilmesi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Korozyon nedeniyle betonun paspayı düşmesi ve donatıları paslanması .....	1
Şekil 1.2. Korozyon sebebiyle özelliğini yitiren bordür .....	2
Şekil 1.3. Betonarme kirişin korozyonu .....	2
Şekil 1.4. FRP'nin temel malzeme bileşenleri .....	3
Şekil 1.5. Köprü döküm öncesi GFRP donatı, Greene ilçesi, Missouri.....	4
Şekil 1.6. Soft-eye inşaat firması, üretim tesisinde GFRP donatı kafesi, Angri, Italy .....	4
Şekil 1.7. Honopapiilani deniz istinat duvarı, güney Lahaina, Maui Hawaii .....	5
Şekil 2.1. Basit kesme etkisi altında oluşan asal gerilmeler .....	8
Şekil 2.2. Ortasından tekil yüklü basit mesnetli kirişte oluşan asal gerilmelerin yönü .....	9
Şekil 2.3. Eğimli çatlakların Türleri .....	10
Şekil 2.4. Etriyersiz kirişlerdeki a/d oranının kesme dayanımının üzerine etkisi.....	11
Şekil 2.5. Derin kirişlerde kesme yetersizliği modları .....	12
Şekil 2.6. Kısa kirişlerde kesme yetersizliği modları .....	13
Şekil 2.7. Eğik çekme göçmesi .....	14
Şekil 2.8. Çelik kesme donatılı bir kirişte kesme kuvvetlerinin karşılanması .....	14
Şekil 2.9. Nervürlü, kumlu ve Sargılı-kumlu FRP donatılar.....	19
Şekil 2.10. Pultrüzyon yöntemi konfigürasyonu .....	19
Şekil 3.1. Beton pres makinesinde basınç deneyi .....	32
Şekil 3.2. Çelik donatının çekme deneyi.....	33
Şekil 3.3. Çekme deneyinde Ø10, Ø16 ve Ø18 donatıların kopma şekli .....	34
Şekil 3.4. Nervürlü dikdörtgen etriyeler .....	35
Şekil 3.5. Epoksi bileşenleri ve karışımı .....	36
Şekil 3.6. Kum karışım bileşenleri ve kumlanan GFRP etriyeler .....	37

Şekil 3.7. Nervürlü-kumlu dikdörtgen etriyeleri .....	37
Şekil 3.8. Deneş kiriş örneği (Ebatlar mm'dir) .....	38
Şekil 3.9. Referans kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı (Ebatlar mm'dir) .....	39
Şekil 3.10. Referans kirişin kesit ayrıntıları (Ebatlar mm'dir) .....	39
Şekil 3.11. (a), (b) ve (c) Nervürlü GFRP kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı, (d) kesit A-A ve B-B ayrıntıları (Ebatlar mm'dir) .....	41
Şekil 3.12. Deneş kirişlerin demir ve GFRP montajları .....	41
Şekil 3.13. Kumlu GFRP etriyeli kirişin geometrik ebadı ve kesit A-A ve B-B ayrıntıları (Ebatlar mm'dir) .....	42
Şekil 3.14. İmal edildiği plywood kalıpları .....	43
Şekil 3.15. Kalıpları plywood yağı ile yağlandırılması .....	44
Şekil 3.16. GFRP etriyeler, çelik donatı ile bağlanması .....	44
Şekil 3.17. Nervürlü GFRP etriyeli 50 mm ve 100 mm aralıklı kiriş numunelerinin görünümü .....	45
Şekil 3.18. Nervürlü ve kumlu GFRP etriyeli 75 mm aralıklı numune kirişlerinin görünümü .....	45
Şekil 3.19. Referans kiriş numunelerinin ve 50 mm aralıklı nervürlü GFRP etriyeli kiriş numuneleri .....	46
Şekil 3.20. Beton dökümü ve yerleştirilmesi .....	46
Şekil 3.21. Beton dökümü ardından bir gün sonra kiriş ve küp numunelerin aynı şartlarda bekletilmesi .....	47
Şekil 3.22. Kiriş numuneleri kalıptan çıkarıp kür edilmesi .....	47
Şekil 3.23. A) Deplasman ölçme cetveli, B) Çatlak genişliği ölçme cetveli .....	48
Şekil 3.24. Yükleme düzeneği ve ölçüm aletlerinin yerleşimi .....	49
Şekil 3.25. Yükleme sistemine göre T ve M grafikleri .....	49
Şekil 3.26. Yükleme sisteminde ölçüm aletlerin yerleşim detayları .....	50
Şekil 3.27. Kesme çatlağın genişliğinin belirlenmesi .....	51
Şekil 4.1. Referans kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi .....	52
Şekil 4.2. Referans kirişlerin kırılma şekli ve kesme çatlak açısı .....	53
Şekil 4.3. PM1 ile referans kirişlerin kesme yüküne karşılık gelen çatlak açıklığı grafiği .....	54

Şekil 4.4. Referans kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği .....	54
Şekil 4.5. GN100 kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi .....	55
Şekil 4.6. Deney esnasında GN100 No1 deney kiriş numunesinde kılcal çatlak şekli .....	56
Şekil 4.7. GFRP etriyelerinin yenilme ayrıntıları.....	56
Şekil 4.8. GN100 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	57
Şekil 4.9. GN100 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	57
Şekil 4.10. GN100 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği.....	58
Şekil 4.11. GN75 kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi .....	58
Şekil 4.12. (a) Kılcal çatlak oluşumu, (b ve c) Etriyelerin kırılma durumları .....	60
Şekil 4.13. GN75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	61
Şekil 4.14. GN75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	61
Şekil 4.15. GN75 kirişlerinde kesme yükü-deplasman grafiği .....	62
Şekil 4.16. K75 kiriş dört nokta eğilme deneyine hazırlanması.....	62
Şekil 4.17. Nervürlü-kumlu kırılma şekilleri ve kesme çatlak açısı hesabı .....	64
Şekil 4.18. Gk75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	65
Şekil 4.19. Gk75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	66
Şekil 4.20. GK75 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği .....	66
Şekil 4.21. GN50 kirişin test kesme bölgesi (A tarafı) .....	67
Şekil 4.22. GN50 kiriş numunelerin göçmesinde çekme donatılarının betondan sıyırılması ve GFRP etriyelere hasar edilmesi .....	68
Şekil 4.23. GN75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	69
Şekil 4.24. GN75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği.....	70
Şekil 4.25. GN50 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği .....	70
Şekil 4.26. GFRP etriyenin deneysel ortalama kesme dayanımı.....	72
Şekil 4.27. GFRP etriyeli kiriş numunelerine ait ortalama çatlak açıklığı ve deplasman değerleri .....	72
Şekil 4.28. PM1 bölgesinde deney kiriş numunelerinin kesme-çatlak genişliği davrenişleri karşılaştırılması .....	73
Şekil 4.29. Deney kiriş numuneleri deplasman açısında karşılaştırılması .....	74

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. FRP donatıların 0,5-0,7 elyaf hacim oranı için çekme etkisi altında özellikleri .....	20
Tablo 3.1. Küp beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları .....	33
Tablo 3.2. Boyuna ve enine donatının çekme deneyin sonuçları .....	34
Tablo 3.3. Kullanılan GFRP donatının özellikleri.....	35
Tablo 3.4. HR epoksi reçine özellikleri .....	36
Tablo 3.5. Deney numuneler için parametreler tablosu .....	39
Tablo 4.1. Referans kirişlerin mekanik özellikleri .....	53
Tablo 4.2. GN100 kirişlerin mekanik özellikleri .....	55
Tablo 4.3. GN75 kirişlerin mekanik özellikleri .....	60
Tablo 4.4. GK75 kirişlerin mekanik özellikleri .....	64
Tablo 4.5. G N50 kirişlerin mekanik özellikleri .....	69
Tablo 4.6. Deney kiriş numuneleri karşılaştırılması.....	71
Tablo 4.7. Deney sonuçlarının yönetmelik teorik hesaplar ile karşılaştırmaları .....	75

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Kesme davranışı, Kesme dayanımı, Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP), Donatı, Etriye, Betonarme, kiriş, Deplasman, Sayısal analiz

Betonarme yapılarında kullanılan çelik donatılar zamanla çeşitli sebeplerden dolayı paslanmaya maruz kalmaktadır. Paslanma sonucu donatıda kesit azalması, beton örtüsü bozulması, aderans kaybı ve donatının mekanik özelliklerinde değişimi meydana gelmektedir. Donatının korozyonunu önlemek için çeşitli koruma yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerden hiçbiri korozyon sorununu yeterince çözememektedir. Ayrıca betonarme yapılarında donatı korozyonu nedeniyle oluşan hasarların giderilmesi ve onarılması zaman alıcı ve ekonomik açıdan ciddi bir sorundur. Teknolojik gelişmelerle paralel olarak ilerleyen yapı sektörü Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerin betonarme elemanlarında donatı olarak kullanarak, korozyon sorununu kökten kaldırılmasına ve daha uzun ömürlü alternatif yapı elemanlarına imkan sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada GFRP kompozitlerin betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı üzerine deneysel çalışma yapılmıştır. GFRP etriyeli dikdörtgen kesitli betonarme kirişler 150×250 mm kesitinde ve 1900 mm açıklıklı olarak laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Çalışmada günümüzde sıklıkla kullanılan C25/30 beton sınıfı, nervürlü ve nervürlü-kumlu yüzey özelliklerine sahip etriye donatısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada etriye adım mesafesi ve yüzey özellikleri değişken parametreleridir. Kiriş numuneleri kesme dayanımı zayıf, eğilme dayanımı güçlü olacak şekilde tasarlanmış ve her bir deney grubundan üçer adet kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme ile dört nokta eğilme deneyinde test edilmiştir. GFRP kiriş numunelerin ortalama kesme dayanımları, sehim kapasiteleri, kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları, literatürden FRP etriyeli kirişlerin hesaplanmasında yaygın kullanılan modeller ve bazı araştırmacıların önerdiği denklemler ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Deneysel çalışma bulgularına göre, GFRP etriyelerin kesme takviyesinde etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca nervürlü-kumlu yüzey özelliklere sahip GFRP etriyeli kirişlerin, kumlanmamış GFRP nervürlü kirişlere kıyasla beton ile daha iyi bir aderans sağladığı ve kesme dayanımında %10 civarında ilave iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Modeller ve önerilen denklemlerin kesme teorik hesap sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen GFRP etriyeli kirişlerin kesme dayanımlarının karşılaştırmalı analizlerine göre Kanada Standartlar Birliği "CAN/CSA S806-12" yönetmelik tarafından önerilen denklemlerin en uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

# **INVESTIGATION OF THE SHEAR BEHAVIOR OF RECTANGULAR CROSS SECTION RC BEAMS WITH TRANSVERSE GLASS FIBER REINFORCED POLYMER BARS**

## **SUMMARY**

Keywords: Shear behaviour, Shear strength, Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP), Rebar, Stirrup, Reinforced Concrete (RC), Beam, Displacement, Numerical analysis

Over time in the construction sector, steel reinforcement which are used in RC structures for various reasons is subject to corrosion. A reduction of rebars cross-section, deterioration of concrete cover, loss of adherence and change in steel rebars' mechanical properties occur as a result of corrosion. Various protection methods are used to prevent corrosion of the reinforcement rebars. However, none of them sufficiently solve the corrosion's problem. In addition, it is a time consuming and serious economic problem to repair damages in RC structures which caused by corrosion. The progressing of construction sector in parallel with technological developments leads to use GFRP composites as rebars in RC structures which would remove the problem of corrosion permanently and provide longer-life alternative construction.

In this thesis, experimental study was conducted on the use of GFRP composites as shear reinforcement (Stirrups) in RC beams. The beam specimens with GFRP stirrups had a rectangular cross-section 150×250 mm, overall length of 1900 mm and were produced under laboratory conditions. Concrete class C25/30 (Commonly used today) and stirrups with ribbed or ribbed-sandy surface were used in the study. The principal variables of this experimental study were stirrups spacing and their surface properties. Beam specimens were designed to have low shear and strong bending strength. Three beam samples were tested for each parameter. Beam specimens were subjected to four-point bending experiment with constant speed loading. Average shear strength, deflection capacities, shear cracks' opening values that formed on the surface of beam specimens were assessed in details. In addition, the experimental results were performed with comparative analysis according the commonly used models in the calculation of FRP reinforced beams and the equations suggested by some researchers which studied in the theoretical part.

According to the experimental study findings, GFRP stirrups were found to be effective in shear reinforcement. As well as the beams with ribbed-sandy surface stirrups provided better adherence with concrete and additional increase in the shear strength by 10% comparing to beams with just ribbed (non-sanded) GFRP stirrups. According to the comparative analysis of the shear strength of GFRP-beam obtained from the experimental study with the shear theoretical calculation results of the models and proposed equations, it was found that the equations proposed by the Canadian Standards Association "CAN/CSA S806-12" modul had proposed the most appropriate results.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsan, varoluşundan şimdiye kadar yaşam kalitesi geliştirmek amacıyla devamlı olarak değişim göstermektedir. İlk asırlardan biri insanoğlu kendini barındırmak ve korumak için etrafındaki bulunduğu her türlü malzemeyi yalın hali ya da iki malzeme birleşerek ihtiyaçlarına karşılayabilmiştir. Günümüzde bu sürecin hala devam ettiği ve yeni nasıl malzemeler çağında olduğunu bilmekteyiz. 1800'lü yıllarda çimentonun keşfi ile yapı sektörü yeni bir boyut kazanmış beton ile çeliğin beraber kullanılmasıyla oluşan betonarme, yapı endüstrisinin vazgeçilmezi olmuştur. Günümüz yapı stoku düşünüldüğünde bu yapıların çoğu betonarme ile inşa edilmektedir. Betonarme yapılarda betonun zayıf yönleri giderilmesi için çelik donatı kullanılmaktadır. Ancak bu durum farklı problemleri de beraberinde getirmiştir.

Çelik donatılı betonarme yapıların nem, tuzlu su, klor, donma-çözme vb. etkilere maruz kaması durumunda zamanla korozyona uğratıldığı bilinmektedir. Korozyon sonucu donatıda çap azalması, aderans kaybı ve donatının mekanik özelliklerinde değişimi ve hatta betonda çatlama meydana gelmektedir (Şekil 1.1.). Çelik donatıların korozyonuna maruz kalan bölgelerde yapı elemanının taşıma gücünü düşürmekte yanı sıra yapı elemanının davranışı ve bütünlüğünü bozmaktadır.



Şekil 1.1. Korozyon nedeniyle betonun paspayı düşmesi ve donatıları paslanması (Foundation masters, 2004)

1900'lerin ikinci yarısından sonra çelik donatıdaki korozyona bağlı olarak betonarmenin yapısının bozulması önemli bir sorun haline gelmektedir. Bu olay betonarme yapı elemanının dayanım ve estetiğini önemli ölçüde bozarak yapıyı güvensiz hale getirmektedir (Şekil 1.2.) ve (Şekil 1.3.).



Şekil 1.2. Korozyon sebebiyle özelliğini yitiren bordür (Sarıbyık ve ark., 2018)



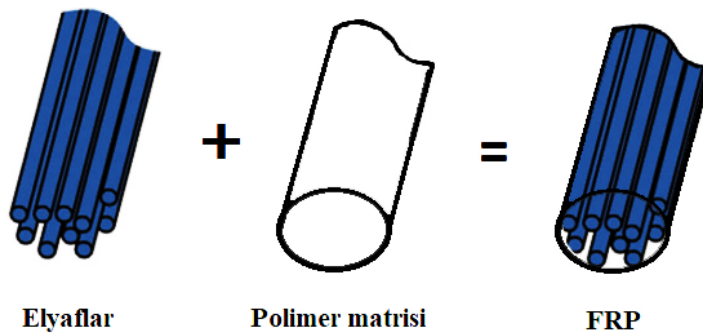
Şekil 1.3. Betonarme kirişin korozyonu (Namita, 2018)

Araştırmacılar ve sektör korozyon oluşumu önlemek için çeşitli koruma yöntemleri (Geçirimsiz beton, donatı yüzeyine korozyon önleyici maddeleri, beton örtü kalınlığı artırması) ve kaplamalar kullanılmaktadır. Betonun dış yüzeyine galvanizli, elektrostatik sprey füzyon yapıştırılmalı ve polimer emdirilmiş beton epoksi kaplamalar da dahildir (Plencik ve ark., 1988). Ne yazık ki, bu çözümler korozyon sorununu zamanla yetersiz kalabilmekte ve ilave işgücü ve maliyet oluşturmaktadır. FRP kompozitler bilinen özelliklerine göre, korozyon sorununa çözüm olabileceğini göstermektedir. Ayrıca kimyasal üretim yapan tesisler ve manyetik alan ile ilgili

yaşanan problemler nedeniyle işletmelerde çelik donatıların kullanımı istenmemektedir (Nanni, 1999).

II. Dünya Savaşı'ndan sonra, geleneksel malzemelerle karşılanmayan havacılık endüstrisi talebini karşılamak üzere araştırmacılar ve bilim adamları yeni çözümler aramaya başlamışlardır. Araştırma neticesinde polimer bir reçine matrisin içine güçlü elyaflar gömerek yeni ve metalik malzemelere göre çeşitli avantajlar sağlayan bir Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) malzemesi bulunmuştur. Bulunan bu malzeme yüksek çekme dayanımı, hafiflik, korozyon direnci, elektromanyetik alanlara etkilenmemesi vb. yenilikçi özelliklere sahip olması nedeni ile farklı endüstrilerdeki birçok uygulamada kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde, uçağın ağırlığını azaltan üstün mukavemete ve sertliğe sahip hafif malzeme olarak FRP kompozitleri kullanmaya başlamıştır. Daha sonra, denizcilik, savunma ve spor malzemeleri gibi diğer endüstrilerde FRP kompozitlerini geniş bir şekilde kullanmaya başlamıştır (Kaw, 2005).

Günümüzde araştırmacılar ve inşaat sektörü diğer teknik alanlarda olduğu gibi malzeme teknolojisine karşı gelen problemleri gidermek amacıyla, yeni uygulamalar ve tasarımlar ortaya koymaktadırlar. Bunlardan bir tanesi olan FRP donatılar betonarme yapılarda çelik donatı yerine alternatif olarak kullanılmaya başlamıştır (Şekil 3.4.).

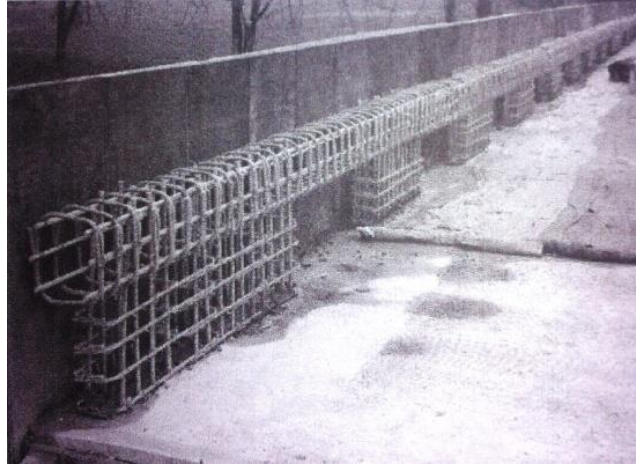


Şekil 1.4. FRP'nin temel malzeme bileşenleri

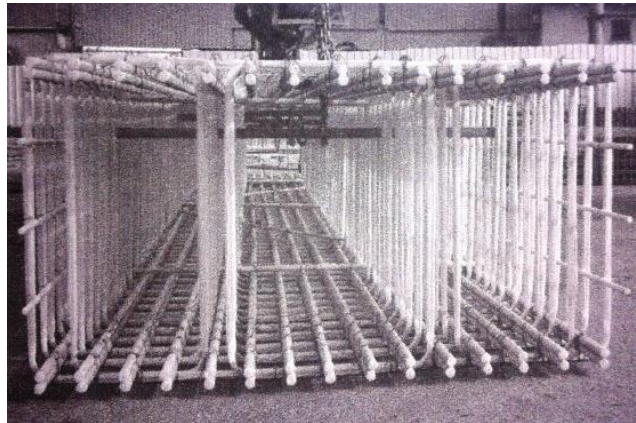
FRP donatıların üretiminde cam, karbon ve aramid elyaflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Son yıllarda, sürekli bazalt elyaflar bu elyafların arasında

yerini almaktadır. Genel olarak epoksi, polyester ve vinilester reçineler gibi matris malzemeleri FRP kompozitlerde kullanılmaktadır. Epoksi, karbon lifleriyle birlikte kullanılan en yaygın matris malzemesi türüdür. Polyester ve vinilester reçineleri genellikle cam elyaflarla kullanılmaktadır (Bakis ve ark., 2002; Bakis, 1993; Bank, 1993).

Betonarme yapılarda FRP kompozitleri donatı olarak, 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde (Bank, 2006), 1970'lerde Avrupa'da (Taerwe ve Matthys, 1999) ve ardından Japonya'da (Fukuyama, 1999) kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1.5. ve Şekil 1.6.).



Şekil 1.5. Köprü döküm öncesi GFRP donatı, Greene ilçesi, Missouri (Nanni ve ark., 2014)



Şekil 1.6. Soft-eye inşaat firması, üretim tesisinde GFRP donatı kafesi, Angri, Italy (Nanni ve ark., 2014)



Kompozit malzemeleri, binalar ve köprüler için yapısal açıdan inşaat malzemeleri haline gelmiştir. Özellikle korozyon problemlerinin sık yaşandığı yerlerde, elektromanyetik alanı istenmeyen yapılarda, kimyasal maddelerin etkisine maruz kalan yapılarda, su ve nem etkisindeki kıyı yapılarında FRP donatılara ihtiyaç giderek artmaktadır (Şekil 1.7.).



Şekil 1.7. Honopapiilani deniz istinat duvarı, güney Lahaina, Maui Hawaii, (Nanni ve ark., 2014)

Donatıların dayanımı ve sertliğini kompozitteki elyaf doğrultusu (FRP donatıları homojen olmayan bir malzemedir), elyaf türü ve hacim oranlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. FRP donatının göçme mekanizması ve kırılma dayanıklılığını FRP kompozitinde kullanılan reçine tipinden etkilenmektedir. Ayrıca reçine kürü, üretim süreci ve üretimdeki kalite kontrolü FRP donatıların özelliklerine etkileyen diğer faktörlerdir.

Son 25 yılda, Laboratuvar testleri FRP donatılarının beton yapılarda iç takviye olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Endüstri ile üniversite işbirliğine dayalı araştırmaları FRP donatılı betonarme kullanımı laboratuvardan gerçek uygulamalara aktarılmasına

önemli rol oynamıştır. Homojen olmayan yani sadece elyafların yönüne paralel olarak yüksek çekme dayanımını göstermekte olup kırılmasına kadar lineer, elastik ve akmasız bir davranışa sahip FRP donatıların geleneksel çelikten çok farklı olduğunu bilinmektedir (Wu.,1990; Tamura, 1993; Nanni ve ark., 1998). Genellikle FRP donatılı betonarme elemanları eğilmede ani ve gevrek yenilmesinden önce geniş çatlaklar ve büyük deplasmanlar meydana gelmektedir. FRP donatıları homojen olmayan dezavantajı betonarme kirişlerinde kaldıraç etkisini ve donatının bükülme bölgelerin kesmeye karşı mukavemetini doğrudan etkilenmektedir (ACI 440.1R-06, 2006). Ayrıca, FRP donatılarının basınç sırasındaki davranışı çekmede olduğu kadar iyi değil (FRP donatıları anizotropik yapısına sahiptir) ve basınç modülü çekmeye göre daha düşüktür (Mallick, 1988; Wu.,1990).

### **1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsam**

FRP donatıların betonarme yapı elemanlarında donatı olarak kullanımı ve davranışı hala gelişmekte ve yurt dışında FRP kullanılması ile ilgili yönetmelikler hazırlanmıştır. Ama çelik donatıya göre hesap yöntemi ve kullanımı yeterince oturmamış ve betonarme yapılarda kullanımı sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada FRP donatıların betonarme yapı elemanında donatı olarak kullanımı üzerine deneysel çalışma yapılmıştır. Bu amaçla Türkiye’de üretilmeye başlanan hafiflik, yüksek dayanım, korozyona dayanıklılık, düşük ısı iletkenlik ve manyetik geçirgenliğinin olmaması yanı sıra istenilen boyut ve yüzey özelliğinde üretilebilmesi vb. avantajlara sahip Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) kompozit donatıları dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı araştırılmıştır.

Çalışmada GFRP etriyeli betonarme kirişler 150×250 mm kesitinde ve 1900 mm boyunda laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Kirişlerde günümüzde sıklıkla kullanılan C25/30 kalitesindeki beton, nervürlü ve nervürlü-kumlu yüzey özelliklerine sahip GFRP etriye donatısı kullanılmıştır. GFRP etriye adım mesafesi 100, 75, 50 mm arasında değişmektedir. Kirişler sabit hızlı yükleme ile dört nokta eğilme deneyinde test edilmiştir. FRP etriye donatılı kirişlerin dayanım ve davranışlarının teorik ve

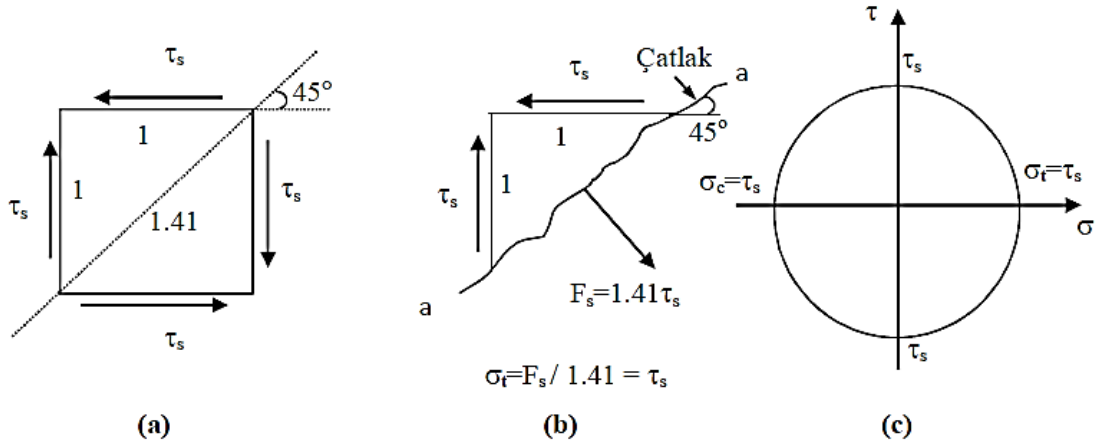
deneysel olarak incelenmesi ve mevcut bazı hesap yöntemleri ve son yıllarda araştırmacılar tarafından önerilen hesap yöntemler ile analizini kapsamaktadır.

Numunelerin ortalama kesme dayanımları, sehim kapasiteleri ve kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları American Concrete Institute (ACI 440.1R-15), Canadian Standards Association (CAN/CSA S806-12) ve Canadian design manual (ISIS-M03-07) yönetmelikleri ve son yıllarda araştırmacılar tarafından önerilen teorik kesme hesabı ile karşılaştırılmıştır.

## BÖLÜM 2. BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kesme Kırılması Durumu

Kesme ve aksenal kuvvetlerden dolayı oluşan asal çekme gerilmeleri, betonun düşük çekme dayanımı olması nedeniyle önemli sorunlar doğurmaktadır. Betonun kesme ve basınç dayanımı, çekme dayanımından yüksektir. Bu nedenle basit kesme durumunda bile kırılma şekli, asal çekme gerilmelerine dik yönde gelişen eğik çatlaklar boyunca oluşan gevrek kırılma düzlemleri ile olmaktadır. Asal çekme gerilmeleri betonarme yapı elemanında göçmeye götürecektir büyük boyutlarda eğik kesme çatlaklarına sebep olabilmektedir. Betonarme elemanlarda oluşan asal çekme gerilmelerini karşılamak için uygun beton sınıfı ve kesme donatıları kullanılmaktadır. Basit kesme durumunda asal basınç ve çekme gerilmeleri kesme gerilmesine eşit olacağından kırılma daha düşük dayanım olan çekme gerilmesi nedeni ile oluşacaktır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Basit kesme etkisi altında oluşan asal gerilmeler (Ersoy ve Özcebe, 2012)

Kesme ile birlikte normal gerilmelerin etkilediği durumlarda eğik çatlakın eğimi asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.2.'de simetrik



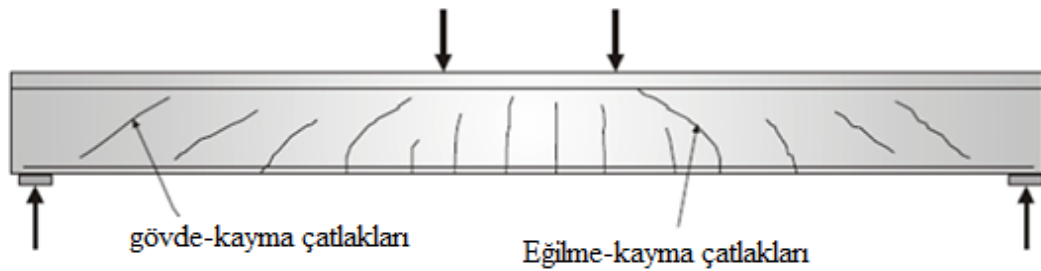


Bu bilgilerden betonarmede büyük sorunlara yol açan ve gevrek bir kırılmaya neden olan eğik çatlakların kesme gerilmelerinden değil de asal çekme gerilmelerinden kaynaklandığı görülmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2012).

### 2.1.1. Kesme takviyesi olmayan betonarme elemanlar

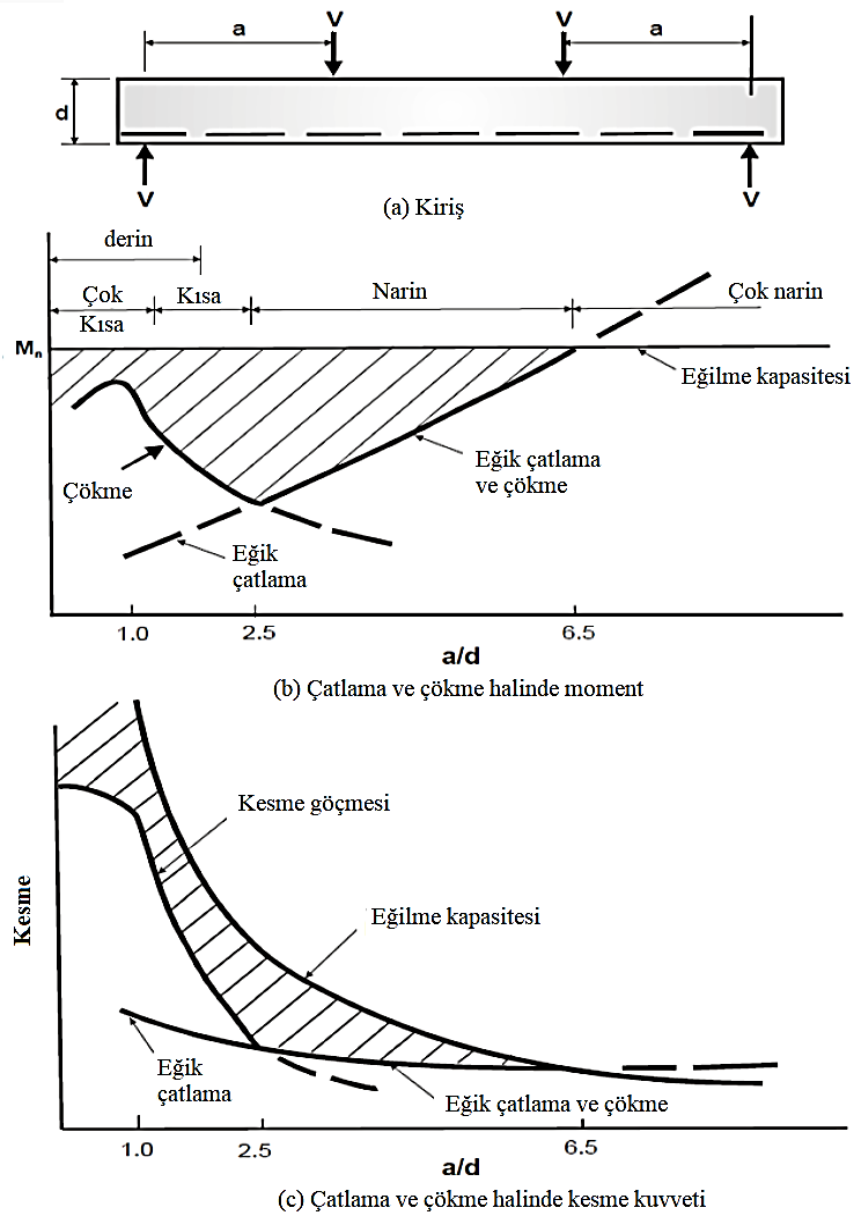
Betonarme kirişin herhangi bir bölgesinde betonun asal çekme gerilmesi mukavemetini aştığında betonda bir çatlak oluşmaktadır. Çatlaklar genellikle asal gerilmenin yönüne dik olarak oluşmaktadır. Tek eksenli gerilmeye maruz bileşenler için, asal çekme gerilmeleri elemanın uzun eksenine paralel olmakta ve dolayısıyla bu durumdan kaynaklanan çatlaklar elemanın eksenine dik olarak oluşmaktadır. Çift eksenli gerilmeye maruz kalan elemanlar için (Eğilme ve kayma gerilmeleri durumu gibi) asal çekme gerilme yönleri, elemanın uzun eksenine açılı eğimlidir. Bu nedenle, önemli bir kayma gerilmelerinin olduğu bir yerde bir çatlak oluşursa, çatlak elemanın eksenine eğimli olacaktır.

1979'da, Winter ve Nilson olmak üzere iki farklı kayma çatlak modu belirlemiştir. Gövde-kayma ve eğilme-kayma çatlakları. Moment ve kesme kuvvetin değerlerine göre, asal çekme gerilmelerinin büyüklüğü ve yönü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek kayma ve düşük moment durumunda, maksimum kesme durumu tarafsız eksenden meydana gelmektedir. Sonuç olarak, eğik çatlaklar tarafsız eksenden oluşmaktadır ve bu konumdan yayılmaktadır. Bu çatlaklar gövde-kayma çatlakları olarak bilinmektedir (Şekil 2.3.). Diğer taraftan, yüksek kesme ve yüksek moment durumunda, eğik çatlaklar önceden mevcut olan eğilme çatlaklarının bir uzantısı olarak gelişmekte ve eğilme-kayma çatlakları olarak bilinmektedir (Winter ve Nilson, 1979).



Şekil 2.3. Eğimli çatlakların Türleri (Mohammed ve Ali, 2016)

kesmede başarısız olan kirişlerin davranış, kaldıraç etkisine, beton sınıfına, kemer eylemine ve kesme takviyesinin miktarına bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Kayma donatısız dikdörtgen kirişlerin eğik çatlama ve göçmesindeki moment ve kesme kuvvetleri Şekil 2.4.'te gösterilmiştir. Şekilde eğilme kapasitesi  $M_n$  yatay çizgisi iken taralı alan, kesme nedeniyle kuvvet azalmasını temsil etmektedir. MacGregor (1997) sınıflamasına göre, Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi, kiriş  $a/d$  oranları ile 4 başlık altında çok kısa, kısa, narin ve çok narin kirişler olarak sınıflandırılmıştır. İki tekil yüklü kirişlerde  $M=V \times a$  olduğu için Şekil 2.4.c.'nin Şekil 2.4.b.'deki moment kesme açıklığına "a" bölerek elde edilmektedir.

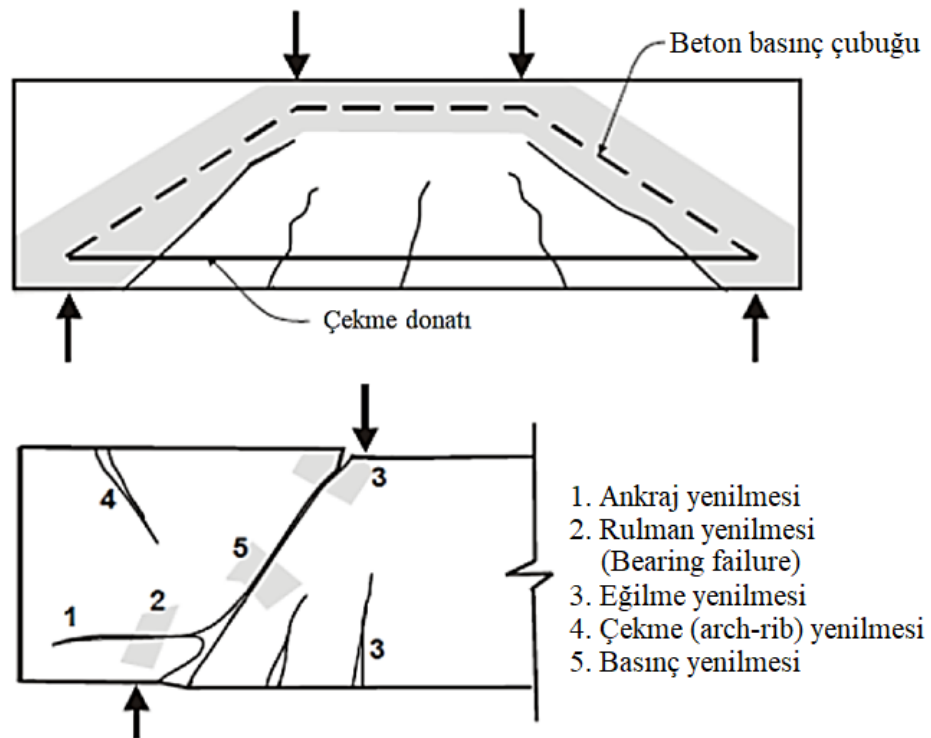


Şekil 2.4. Etriyersiz kirişlerdeki  $a/d$  oranının kesme dayanımının üzerine etkisi (MacGregor, 1997)

### 2.1.1.1. Betonarme kiriş kesme kırılması biçimleri

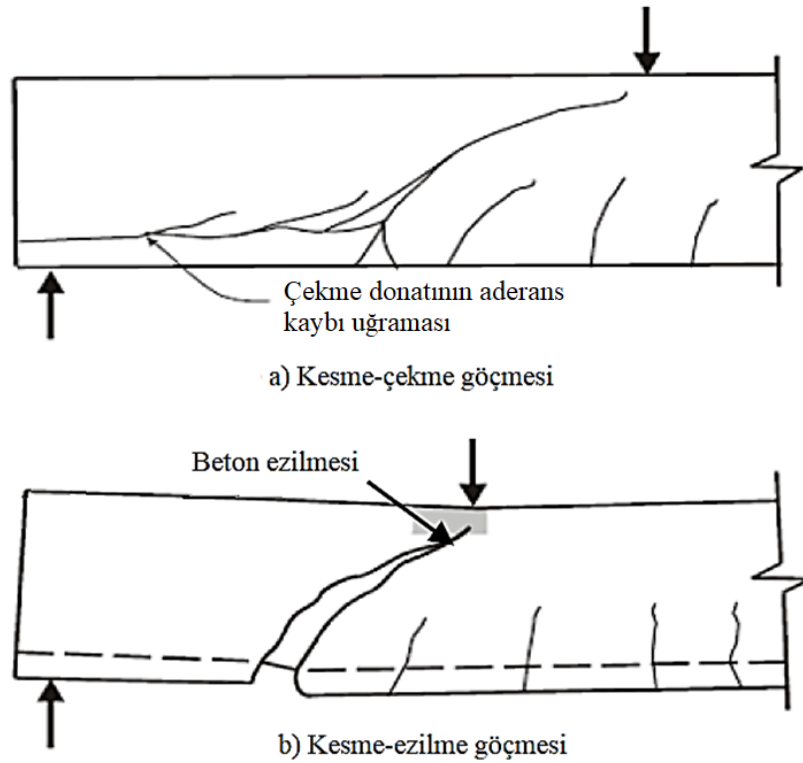
ASCE-ACI Komite 426 (1973) tarafından Kirişlerin kesme yenilmesinin modları  $a/d$  oranlarına bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Simetrik iki tekil yük etkisinde basit mesnetli kesme takviyesiz dikdörtgen kirişlerin yenilme modları aşağıda açıklanmıştır.

**a. Çok kısa kirişler,  $a/d < 1.0$ :** Kirişlerde tekil yük ve mesnete birleştiren eğimli çatlaklar ilerlemektedir. Böylece, kesme kuvvetinin çoğu beton basınç çubuğu aracılığıyla yapısal sistem olarak mesnete aktarılmaktadır (Şekil 2.5.). Genellikle derin kirişler olarak adlandırılan bu kirişlerin kırılması, Şekil 2.5.'te gösterilmektedir. Kiriş uçlarından çekme çelik donatının sıyrılmasıyla yenilme meydana gelmektedir. Mesnetin üzerindeki betonun ezilmesiyle rulman yenilmesi (Bearing failure) meydana gelebilmektedir. Çekme çeliğinin akması ya da basınç bölgesinin ezilmesi nedeniyle eğilme kırılması da mümkündür. köşe tepesine yakın eğimli kesitinde devamlı basınç ademi merkezietin nedeniyle çekme göçmesi (arch-rib) gerçekleyebilmektedir. Basınç kırılması, kesme çatlağı boyunca kiriş gövdesinin ezilmesiyle meydana gelebilmektedir.



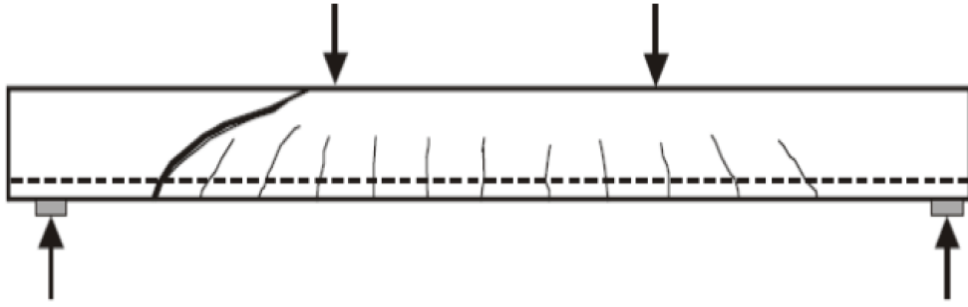
Şekil 2.5. Derin kirişlerde kesme yetersizliği modları (ASCE-ACI Committee 426, 1973)

**b. Kısa kirişler,  $1.0 < a/d < 2.5$ :** Bu kirişlerde eğimli çatlaklar oluşuktan sonra kemer etkisiyle ortaklaşarak iç kuvvetlerin yeniden dağıtılıp daha fazla yük taşıyabilmektedir. Bu kirişlerin nihai yenilmesi, kesme-eğilme çatlakları nedeniyle çekme donatı aderansını kaybetmesi ve kaldıraç çökmesinden kaynaklanabilmekte (Şekil 2.6.a.) veya basınç bölgesinde kesme çatlağı üzerinde beton ezilmesiyle Şekil 2.6.b.'de gösterildiği gibi meydana gelebilmektedir.



Şekil 2.6. Kısa kirişlerde kesme yetersizliği modları (ASCE-ACI Committee 426, 1973)

**c. Narin kirişler,  $2.5 < a/d < 6.0$ :** Bu kirişlerde, eğilme çatlaklarının bir kısmı büyümekte ve eğilme-kesme çatlaklarına neden olabilmektedir. Eğimli çapraz çatlaklar kirişin üst ve altına doğru ilerlemeye devam edebilmekte ve çekme donatının akmasına sebep olmaktadır. Kirişin eğik-çekme yenilmesinde iki parçaya ayrılabilir.



Şekil 2.7. Eğik çekme göçmesi (ASCE-ACI Committee 426, 1973)

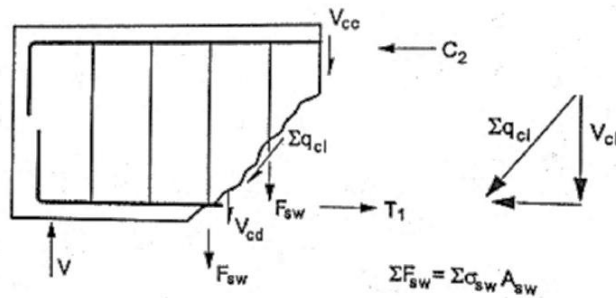
**d. Çok narin kirişler,  $a/d > 6.0$ :** Bu kirişler eğimli çatlakların oluşmasından önce eğilme kırılması olmaktadır.

### 2.1.2. Çelik etriyeli betonarme kirişler

Çelik etriyeler, kirişin eğik kesme yenilmesi (asal çekme kırılması) önlemek amacıyla ve kirişin eğilme kapasitesine ulaşmasına kadar önemli vazife yapmaktadır.

#### 2.1.2.1. Betonarmede kesme gerilmeleri karşılanan iç kuvvetler

Eleman içerisine yerleştirilen kesme donatıları eğik çatlakların oluşmasını engelleyemez. Ancak tekniğine uygun olarak yerleştirilen kesme donatıları çatlakların kılcal düzeyde kalmalarını sağlamaktadır. Etriye bir kirişte eğik çatlaklar oluşmadan önce kesme dayanımı betonla karşılanmaktadır. Eğik çatlak oluşuktan sonra  $V_{cc}$ ,  $V_{cd}$  ve  $V_{ci}$ 'nin yanısıra kesme donatısı da kesme dayanımına katkıda bulunacaktır. Eğik çatlak oluşuktan sonra kesme dayanımına katkıda bulunan iç kuvvetler Şekil 2.8.'de gösterilmektedir (Doğangün, 2017).



Şekil 2.8. Çelik kesme donatılı bir kirişte kesme kuvvetlerinin karşılanması (Doğangün, 2017).

Bu şekilden hareketle kesme denklemleri 2.1, 2.2 ve 2.3'te gibi yazılabilir.

$$V_r = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} + V_{sw} \quad (2.1)$$

$$V_{cr} = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} \approx 0,65f_{ctk} b_w d \quad (2.2)$$

$$V_{sw} = \Sigma F_{sw} = \Sigma A_{sw} \cdot \sigma_{sw} = A_{sw} f_{ywk} \frac{d}{s} \quad (2.3)$$

Burada,  $V_r$ : Betonarme kirişin kesme kapasitesi,  $V_{sw}$ : Etriyelerin kesme dayanımı,  $V_{cc}$ : Çatlamamış betondaki kesme dayanımı,  $V_{cd}$ : Kaldıraç etkisiyle kesme dayanımı,  $V_{ci}$ : Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle kesme dayanımı,  $\Sigma F_{sw}$ : Eğik çatlakın kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamı ve  $V_{cr}$ : Betonda toplam kesme dayanımıdır.

## 2.2. FRP Donatılı Betonarme Kirişler

### 2.2.1. FRP donatılar

FRP donatıların imalatında en yaygın kullanılan elyaflar ve reçine matrisleri kısaca tanıtılmaktadır. Genel olarak, GFRP, CFRP, bazalt FRP (BFRP) ve aramid FRP (AFRP) gibi yapısal mühendislik uygulamalarında kullanılan dört tür elyaf bulunmaktadır. Cam elyaf maliyetin ve özgül dayanımın özelliklerinin arasında ekonomik bir denge sağlar ve bu nedenle cam donatıları çoğu betonarme uygulamada tercih etmektedir.

#### 2.2.1.1. Karbon elyaf

Karbon elyaf, poli akrilonitrilden (PAN), zift veya suni ipek elyaf öncüllerinden yapılır. PAN tabanlı karbon elyaf, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan üstünlük alan malzemedir. PAN-bazlı karbon elyaf, yüksek mukavemet ve nispeten yüksek bir modüle sunulur. Zift-bazlı karbon fiber daha yüksek modüle sahiptir ancak daha düşük mukavemete sahiptir, bu da havacılık uygulamaları için uygun hale

getirir. Karbon elyaf, yüksek yorulma dayanımı, alkali veya asit saldırısına karşı yüksek direnç, düşük bir termal genleşme katsayısı (CTE), nispeten düşük darbe dayanımı ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir; Metallerle doğrudan temas ettiğinde galvanik korozyona neden olabilir. Ayrıca reçinelerle kolayca ıslanmaz; bu nedenle, reçineye gömülmeden önce boyutlandırma gereklidir. Genel olarak, karbon elyaf cam elyaflardan yaklaşık 10 kat daha pahalıdır ve yaklaşık üç kat daha fazla dayanım ve modül sergilemektedir.

#### **2.2.1.2. Cam elyaf**

Cam elyaf temel olarak silika kumundan yapılmış ve farklı sınıflarda ticari olarak temin edilebilmektedir. En yaygın kullanılan cam türleri elektrikli cam (E-cam), yüksek mukavemetli cam (S-cam) ve alkali-dirençli AR-camıdır. E-cam yüksek elektriksel yalıtım özellikleri, neme karşı düşük duyarlılık ve yüksek mekanik özellikler sunmaktadır. S-cam daha yüksek çekme dayanımı ve modülüne sahiptir, ancak daha yüksek maliyeti ondan dolayı E-camdan daha az tercih edilmektedir. AR-cam, çimento esaslı matrislerde alkali saldırılarına karşı oldukça dirençlidir. Cam elyafından yapılan kompozitler, iyi elektriksel ve termal yalıtım özellikleri göstermektedir.

#### **2.2.1.3. Aramid elyaf**

Aramid elyaf bir aromatik poliamid organik elyaftır. Aramid elyaf, düşük yoğunluk, yüksek tokluk ve yüksek darbe dayanımı ile iyi mekanik özellikler sunar. Aramid elyaf hem elektrik hem de ısı için iyi bir yalıtıcıdır ve organik çözücülere, yakıtlara ve yağlama maddelerine karşı dayanıklıdır. Ancak ultraviyole (UV) ışığına, yüksek sıcaklığa ve yüksek neme karşı duyarlıdır. Aramid elyafının gerilme mukavemeti, camınkinden daha yüksektir. Kevlar en yaygın aramid elyafın türüdür ve ticari olarak Kevlar 29, 49 ve 149 olarak temin edilebilir. Aramid elyafın yüksek maliyetinden dolayı bu tipten FRP donatılarının imalatları sınırlanmaktadır.



#### **2.2.1.4. Bazalt elyaf**

Bazalt elyaf, E-camdan biraz daha güçlü ve dayanıklıdır, çevresel olarak güvenli, zehirli değil ve manyetik geçirgenliğine sahip olmamaktadır. Ayrıca yüksek ısı stabilitesi ve yalıtım özelliklerine sahiptir. Bazalt elyaf E-cam elyaf için kullanılan aynı teknoloji ile imal edilir, ancak üretim süreci daha az enerji gerektiren, ve primer ham malzemenin (bazalt kaya) tüm dünyada mevcuttur (Deak ve Czigany, 2008; Wang ve ark., 2008; Sim ve ark., 2005; Di Ludovico ve ark., 2010).

#### **2.2.2. Reçine (Matrisler)**

Matrisler genellikle termoset polimerik reçineleridir. Termoset reçineler ilk hallerinde, genellikle sıvılar veya düşük erime noktalı katılardır. Bir sertleştirici madde veya ısı ile kürlenirler. Termoplastik reçinelerin aksine, katı termoset reçineler sertleştikten sonra, asıl sıvı formlarına geri dönüştürülemez veya yeniden şekillendirilemez. Epoksi, polyester ve vinilester Kompozit endüstrisinde kullanılan en yaygın termoset reçinelerdir. Kompozitlerin performansını artırmak ve maliyetleri azaltmak için katkı maddeleri ve dolgu maddeleri reçine ile karıştırılabilir.

##### **2.2.2.1. Epoksiler**

Epoksi reçinesinin temel avantajları: yüksek mekanik özellikler, işleme kolaylığı, kür sırasında düşük daralma ve çok çeşitli lifler ile iyi yapışma özelliklere sahiptir. Epoksiler yüksek korozyon direncine sahiptir ve diğer polimerik matrislere göre su ve ısıdan daha az etkilenir. Dezavantajları yüksek maliyetli ve uzun kürlenme süresidir. Epoksi reçinesi ayrıca farklı malzemelerle formüle edilebilir veya spesifik performans özellikleri elde etmek için diğer reçinelerle karıştırılabilir. Epoksi reçineler cam, karbon, aramid ve bazalt elyaflarıyla uyumludur. Ancak, profil çekme sektöründe (Pultrüzyon yöntemi) kullanımları sınırlıdır (Nanni ve ark., 2014).

### 2.2.2.2. Polyesterler

Polyester reçinelerin temel avantajı iyi mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri karşılık boyutsal durağanlık, maliyet ve işlem kolaylığın dengesidir. Polyester reçineler genellikle nispeten ucuzdur ve iyi mekanik ve elektriksel performans sunmaktadır. Polyesterler çok çeşitli uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için kimyasal olarak uyarlanabileceğini için esneklik, elektrik yalıtımı, korozyon direnci, ısı ve ultraviyole ışığına karşı direnç, yangına dayanıklılık ve saydamlık gibi spesifik performansa yönelik bir dizi özel polyester mevcuttur. FRP donatıların imalatında kullanımları önerilmez çünkü vinilestere göre daha düşük kimyasal direnci sunmaktadır (Nanni ve ark., 2014).

### 2.2.2.3. Vinilesterler

Vinilesterler, kimyasal direnç ve yüksek mukavemet gibi epoksilerin yararlı özelliklerinden bazılarını sergilerler. Ayrıca polyesterin akışkanlık ve hızlı kürlenme gibi özelliklerine sahiptir. Vinilesterler iyi alkali direnci sergilerler ve cam elyafı ile iyi ıslanma ve iyi yapışma özelliğine sahiptirler ve ona dayalı vinilesterler, GFRP kompozitlerin üretiminde en iyi ve tercih edilen reçine türüdür (Nanni ve ark., 2014).

### 2.2.3. Pultruzyon yöntemi

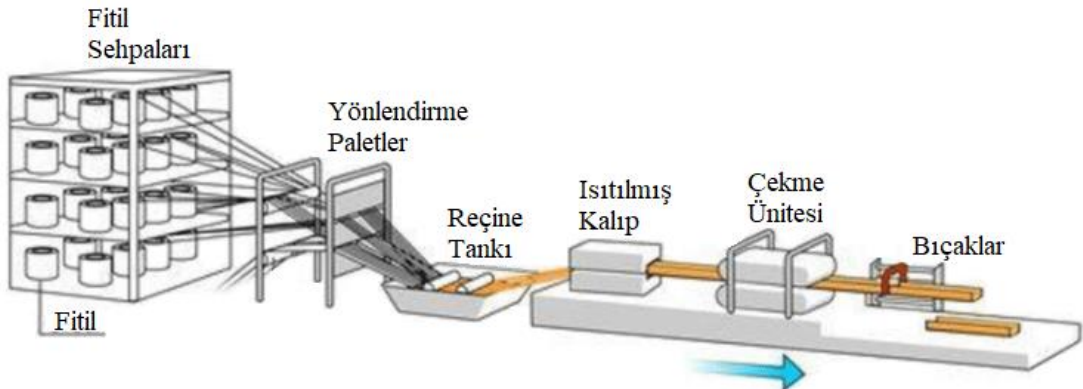
FRP kompozitlerin üretiminde birçok yöntem bulunmaktadır (Örnekleri: Püskürtme, reçine enjeksiyonu, Islak sistem pres kalıplama ve Preslenebilir takviyeli termoplastik vb.). İnşaat sektöründe çelik donatı muadili olarak kullanılan fiber donatıların üretimi pultruzyon metodu ile yapılmaktadır. Diğer kompozit üretim yöntemleriyle üretilen kompozitlerin taşıyıcı olarak kullanılan elemanların karşılaması gereken kuvvetlere karşı yetersiz kalmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe taşıyıcı eleman olarak kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sorunu çözebilmek ve malzemeleri ekonomik bir şekilde üretebilmek için Pultruzyon yöntemi geliştirilmiştir. Reçine kürlendikten sonra FRP donatıları bükülemez yani bükümler imalat sırasında yapılması gerekmektedir. FRP donatı ile beton arasında iyi bir

mekanik aderans sağlaması için nervürlü, kumlu ve iple sarılmış yüzey pürüzlülüğü ile üretilmektedir (Şekil 2.9.). FRP donatılarındaki kesme gecikmesi olarak adlandırılan bir olay nedeniyle aksenal çekme dayanımı donatının boyutuna bağlıdır (Bank, 1993). Cam elyafların, karbon elyaflara göre daha düşük maliyetli avantajı olması sebebiyle GFRP donatılar yapı elemanlarında kullanımı tercih edilmektedir. Ancak özel gereksinimler için Karbon FRP (CFRP) donatıları da tercih edilmektedir.



Şekil 2.9. Nervürlü, kumlu ve Sargılı-kumlu FRP donatılar (Nanni ve ark., 2014)

Günümüzdeki modern haline kavuşan Pultrüzyon makinesinin çalışma prensibi (Şekil 2.10.)’da gösterilmektedir. Genellikle FRP donatı Pultrüzyon yöntemi ile üretilmektedir. Pultrüzyon yöntemi, elyaf takviyesini ile Termoset reçineyi birleştiren sürekli bir kalıplama sürecidir. Bu da inşaat donatılar gibi sabit bir enine kesite sahip olan kompozit parçaların sürekli üretimi için idealdir. Pultrüzyon yöntemi ile FRP donatılar üretim aşamaları aşağı kısaca anlatılmaktadır.



Şekil 2.10. Pultrüzyon yöntemi konfigürasyonu (Marco ve Gallegos, 2014)

Başlangıçta makaralarda paketlenmiş olan cam elyaflar reçine banyosuna girmeden önce iyi ıslanmaya sağlamak için lifler yayılmakta sonra termoset reçine banyosundan iyice emdirip çekilmektedir. Reçine emdirilmiş lifler nihai donatının boyutunu belirleyen metal bir kalıp içinden yönlendirilip bir küreleme fırınına ısıtılmaktadır. kürelemeye girdirmeden önce donatı yüzeyine kum kaplama veya spiral şeklinde sargılar varsa uygulanmaktadır. Fırındaki uygulanan ısıyı, reçine kürelemesini etkinleştirmekte ve sıvı halinden katı hale dönüşmektedir. Donatı sürekli olarak çekilip üretilmekte ve istenilen boyutlarla kestirilmektedir. İşlemin süresi, donatının boyutuna göre değişmektedir. Genellikle, üretim hızı dakikada 91 cm'dir (Nanni ve ark., 2014).

Yaygın olarak kullanılan cam, karbon, aramid ve bazalt donatıları çekme etkisi altında özellikleri Tablo 2.1.'de verilmektedir (Özşahin ve ark, 2015)

Tablo 2.1. FRP donatıların 0,5-0,7 elyaf hacim oranı için çekme etkisi altında özellikleri (Günnur, 2011)

Parametre	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal Akma Gerilmesi (MPa)	276~517	Akma yok	Akma yok	Akma yok
Çekme Dayanımı (MPa)	483~690	483~1600	600~3690	1720~2540
Elastisite Modülü (GPa)	200	35~51	120~580	41~125
Akma Şekil Değişirme (%)	0,14~0,25	Akma yok	Akma yok	Akma yok
Kopma Şekil Değişirme (%)	6~12	1,2~3,1	0,5~1,7	1,9~4,4

GFRP donatıların mekanik ve fiziksel özellikleri geleneksel çelik donatılarından fark göstermektedir. GFRP donatının mekanik ve fiziksel özellikleri kompoziti oluşturan reçine, polimer elyaf tibi ve hacim oranına, polimer elyaf reçine ile yapışma kabiliyetine, reçinedeki elyaf dağılımına etkilenmektedir. Donatının özelliklerini etkileyen diğer faktörler reçine küreleme oranı, üretim süreci ve üretim esnasında kalite kontrolüdür.

GFRP donatıların geleneksel çelik donatılarına göre avantajları;

1. Yüksek çekme dayanımı
2. Manyetik geçirgenliği olmaması
3. Yüksek çekme dayanım sahibi

4. Hafiflik
5. Düşük ısı ve elektrik iletkenlik özelliği
6. Yüksek korozyona dayanıklılık

Diğer taraftan GFRP donatının geleneksel çeliğe göre dezavantajları;

1. Sünek bir malzeme değildir
2. Düşük elastisite modülü sahip olması
3. Malzemenin maliyet yüksek olması
4. Dayanımın elyaf doğrultusuna bağlı olarak değişmesi
5. Düşük aderans ve kenetlenmesidir

### 2.3. FRP Etriyeli Betonarme Kirişlerin Kesme Hesap Yöntemleri

Bu bölümde, farklı kuruluşlar tarafından oluşturulan çeşitli kesme tasarım denklemleri seçilmiştir ve gözden geçirilmiştir. Yönetmeliklerde, FRP'ye özgü özellikleri hesaba katılarak eğilme elemanlarının kayma davranışları farklı şekillerde etkilenmektedir.

#### 2.3.1. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 440.1R-15)

ACI 440.1R-15'te FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme kapasitesi ( $V_r$ ) denklem 2.4 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_{cf} + V_{sf} \quad (2.4)$$

Burada;  $V_{cf}$ : Betonun ve FRP boyuna donatıların kesmeye katkısını ve  $V_{sf}$ : FRP etriyelerin kesme katkısını ifade edilmektedir.  $V_{cf}$  denklem 2.5 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{cf} = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c ; c = k \cdot d \quad (2.5)$$

Burada;  $f'_c$ : Beton basınç dayanımı,  $b_w$ : Kirişin kesit genişliği,  $c$ : Çatlamış kesitin tarafsız eksen derinliğini ifade etmektedir.  $k$ : Faydalı derinliğinin azalma katsayısı denklem 2.6 gibi hesaplanmaktadır.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.6)$$

Burada;  $\rho_f$ : FRP boyuna donatı oranı,  $n_f: E_f / E_c$ ,  $E_f$  ve  $E_c$  sırasıyla boyuna FRP donatının ve betonun elastisite modülünü ifade eder. FRP etriyelerin kesme dayanımı  $V_{sf}$  denklem 2.7 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{sf} = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (2.7)$$

Burada;  $d$ : Faydalı derinliği,  $A_{fv}$ : Kesme donatılarının toplam kesit alanı,  $S$ : Kesme donatılarının adım mesafesi ve  $f_{fv}$ : FRP kesme takviyesinde maksimum hesap gerilme düzeyi ifade eder.  $f_{fv}$  denklem 2.8 ile hesaplanmaktadır.

$$f_{fv} = 0,004 E_v \leq f_{fu} \text{ büküm} \quad (2.8)$$

FRP büküm kapasitesi denklem 2.9'a göre belirlenmektedir.

$$f_{fu} \text{ büküm} = (0,05r_b / d_b + 0,3) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (2.9)$$

Burada,  $r_b$ : FRP köşe yuvarlatma yarı çapı,  $d_b$ : FRP donatının çapını ifade eder.

### 2.3.2. Kanada Standartlar Birliği (CAN/CSA-S806-12)

CSA-S806-12'de FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme kapasitesi  $V_r$  denklem 2.10 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_{cf} + V_{sf} \leq 0,22f'_c b_w d_v \quad (2.10)$$

Kesitin faydalı derinliğe 300 mm'yi geçmeyen ve üzerine hiçbir aksenal yük olmayan kirişler için beton kesme katkısı denklem 2.11 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{cf} = 0,05 \lambda \phi_c k_m k_r (f'_c)^{1/3} b_w d_v \quad (2.11)$$

Denklemden,  $\lambda$ : Beton yoğunluk faktörü ifade edip normal yoğunluklu beton için 1.0 olarak alınır.  $\phi_c$ : Malzemenin mukavemet faktörü,  $k_m$ : Moment/kayma oranlarının etkilerini açıklayan faktörü ve  $k_r$ : Eğilme donatılarının rijitlik faktörünü ifade eder.  $k_m$  ve  $k_r$  faktörleri sırasıyla denklem 2.12 ve 2.13 ile hesaplanmaktadır.

$$k_m = (V_f d / M_f)^{1/2} \leq 1,0 \quad (2.12)$$

$$k_r = 1 + (E_f \rho_f)^{1/3} \quad (2.13)$$

Denklemlerde  $\rho_f$ : FRP boyuna donatı oranını ifade etmektedir. Denklem 2.11 ile hesaplanan  $V_{cf}$  değeri,  $0,22\sqrt{f'_c} b_w d_v$  ile  $0,11\sqrt{f'_c} b_w d_v$  arasında olmalıdır.  $f'_c$  beton basınç gerilme değeri 60 Mpa'dan daha büyük alınmamalıdır. Elemanlarda olan a/d oranı 2,5'ten küçük ise kemer etkisinde kesme dayanıma katkısı kesme tahmin değerine aktarması için denklem 2.11'den elde edilen  $V_{cf}$  değeri 2.14'e göre hesaplanan  $k_a$  faktörü ile çarpılarak büyütülmektedir.

$$k_a = (2,5 V_f d) / M_f \quad ; \quad 1,0 \leq k_a \leq 2,5 \quad (2.14)$$

Kesitin faydalı derinliği 300 mm'den daha büyük ve kesme etriyelerin oranı  $A_{v,min}$ 'den küçükse  $V_{cf}$  değeri denklem 2.16'ya göre hesaplanan  $k_s$  faktörü ile çarpılarak azaltılmaktadır.

$$A_{v,min} = 0,07\sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{0,4 f_{fu}} \quad (2.15)$$

$$k_s = \left( \frac{750}{450 + d} \right) \leq 1,0 \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da faydalı derinliği ( $d$ ) milimetre biriminde kullanılmalı. FRP etriyelerin kesme dayanımı  $V_{sf}$  denklem 2.17'ye göre hesaplanır.

$$V_{sf} = \frac{A_{fv} f_{fv} d_v}{s} \cot\theta \quad (2.17)$$

Burada;  $f_{fv}$ : FRP maksimum çekme gerilmesi,  $0,005E_v$ ,  $0,4f_{fu}$  veya 1200 Mpa'dan daha küçük olarak alınmaktadır.  $\theta$ : Diyagonal basınç gerilmesinin açısını ifade etmektedir.  $\theta$  değeri denklem 2.18 ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = 30 + 7000\varepsilon_1 \quad (2.18)$$

Burada;  $\varepsilon_1$ : Kesitin orta derinliğindeki boyuna şekil değiştirme değerini ifade eder.

### 2.3.3. Kanada Tasarım Rehberi (ISIS-M03-07)

Bu yönetmelikte FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı denklem 2.19 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_{cf} + V_{sf} \quad (2.19)$$

Kesitin faydalı derinliği 300 mm'yi geçmeyen kesitler için betonun kesme dayanımı olan katkısı denklem 2.20 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{cf} = 0,2\lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \quad (2.20)$$

Kesit yüksekliği 300 mm'den daha fazla olan kiriş durumunda ise  $V_{cf}$  denklem 2.21 ile hesaplanmaktadır.



$$V_{cf} = \left( \frac{260}{1000+d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fn}}{E_s}} \geq 0,1 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fn}}{E_s}} \quad (2.21)$$

Burada,  $\lambda$ : Beton yoğunluk faktörünü ifade eder ve normal yoğunluklu beton için 1.0 olarak alınır.  $\phi_c$ : Malzemenin mukavemet faktörünü ifade etmektedir. FRP etriyelerin kesme dayanımı  $V_{sf}$  denklem 2.22 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{sf} = \frac{\phi_f A_{fv} f_{fv} d_v \cot \theta}{s} \quad ; d_v = 0,9.d \quad (2.22)$$

Burada;  $d_v$ : Kesit etkili kesme yüksekliği,  $f_{fv}$ : FRP donatının kesme gerilmesini ifade etmektedir.  $f_{fv}$  değeri denklem 2.23 ile hesaplanmaktadır.

$$f_{fv} = \frac{\left( 0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fu}}{1,5} \quad (2.23)$$

Burada;  $r_b$ : FRP köşe yuvarlatma yarı çapı,  $d_b$ : GFRP donatının çapı.

#### 2.3.4. Lignola ve arkadaşları tarafından önerildiği denklem

Eurocode-like tasarım denklemlerine istatistiksel bir kalibrasyon yapılmıştır. 129 deney kirişi eğilme testini içeren bir veri tabanına dayanarak FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme kapasitesini belirlenmiştir. FRP kesme donatı sayesinde kesme katkısı  $V_{Rd,f}$  denklem 2.24 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{Rd,f} = \frac{f_{fd}}{\gamma_{f,\phi}} \frac{A_{fv}}{s} z \cos \theta \quad (2.24)$$

Denklemden;  $f_{fd}$ : FRP'nin tasarım çekme dayanımını ifade etmektedir.  $\gamma_{f,\phi}$ : Emniyet faktörü 2,82'ye eşittir (boyuna çelik donatılara göre bükülmüş çubukların göreceli verim eksikliğini dikkate almaktadır).

### 2.3.5. Kara ve arkadaşları tarafından önerildiği denklem

Kara ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan çalışmada literatürden elde edilen 206 adet deney sonucu göz önünde bulundurularak FRP donatıları betonarme kirişlerin kesme dayanımı için denklem önerilmiştir. Kirişlerin kesme dayanımı denklem 2.25 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_c + V_f \quad (2.25)$$

Betonarme kesitinin faydalı derinliği 300 mm'yi geçmeyen kesitler için betonun kesme dayanımı olan katkısı denklem 2.26 ile hesaplanmaktadır.

$$V_c = 2,6 \left( \rho_{fl} \frac{E_{fl}}{E_s} \frac{d}{a} f'_c \right)^{1/3} b_w d ; d \leq 300 \text{ mm} \quad (2.26)$$

Denklemde;  $E_f$  ve  $E_c$  FRP ve çelik boyuna donatıları için elastisite modülü değerlerini ifade etmektedirler.

Kesit yüksekliği 300 mm'den daha fazla olan kiriş durumunda ise  $V_{cf}$  denklem 2.27 ile hesaplanmaktadır.

$$V_c = 2,6 \left( \rho_{fl} \frac{E_{fl}}{E_s} \frac{d}{a} f'_c \right)^{1/3} \left( \frac{300}{d} \right)^{0,25} b_w d ; d > 300 \text{ mm} \quad (2.27)$$

FRP donatıları betonarme kirişlerde kesme donatılarının dayanımına olan katkısı denklem 2.28 ile hesaplanmaktadır.

$$V_f = 0,58 (\rho_{fv} f_{uv})^{0,5} (b_w d) \quad (2.28)$$

Burada;  $\rho_{fv}$ : Kesitteki FRP kesme donatısının oranını,  $f_{uv}$ : Kesme donatısı için kırılma anındaki gerilme değerlerini ifade etmektedir.

## 2.4. Literatür Araştırması

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür araştırması aşağıda özetlenerek sunulmuştur.

Nagasaka ve arkadaşları (1993) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. 900 mm uzunluğunda ve 250x300 mm kesitinde kiriş numuneler maksimum kesme kapasitesine kadar sabit hızlı yükleme etkisinin altında test edilmiştir. Çalışmada temel değişkenler, donatının tipi ve oranı, donatı sarılma şekilleri ve betonun dayanımıdır. FRP donatılı kirişler etriyelerin bükülme bölümleri kırılmasından veya eğik beton kesiti ezilmesinden dolayı göçmüştür. Birinci kırılma durumu, ikinci durumdan aşırı derecede gevrek ve istenmeyen bir durum olduğu vurgulanmıştır. Kesme kapasitesi, FRP etriyelerin arttırılmasıyla arttırılmış ve etriyelerin tipinden etkilendiği, FRP etriyelerin geleneksel çelik etriyelere göre kesme kuvvetini etkili bir şekilde taşımadığı tespit edilmiştir. FRP etriyeli kirişlerin maksimum kesme kapasitesinin, Arakawa'nın denklemindeki çelik akma dayanımı yerine FRP'nin bükülmüş kısımlarının çekme dayanımı ile değiştirilmesi oldukça iyi bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Vijay ve arkadaşları (1996) tarafından yapılan çalışmalarda, GFRP donatılar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışı boyuna ve enine donatı olarak araştırılmıştır. Çalışmada altı kiriş numunesi dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kirişler 150x300 mm kesite ve 1500 mm uzunluğa sahiptir. Kirişlerin kesme kırılması ile göçecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada, diyagonal çatlakların oluşumu, FRP etriyeli ve etriyesiz betonarme kirişlerin kesme dayanımı yanı sıra etriye aralıklarının kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ACI denklemlerinin FRP etriyeli betonarme kirişlerin kesme dayanımı hesabında uygulanabilirliği belirtilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, FRP kirişlerin çelik donatılı betonarme kirişlerinkine benzer çatlak yayımı sergilendiği GFRP etriye kollarının bindirme payı  $4d_b$  ila  $5d_b$  civarında olduğundan dolayı açılma olduğu gözlenmiştir ( $d_b$ : etriye çapıdır). Ayrıca ACI yönetmeliğine göre elde edilen yalın

betonun kesme dayanımını (hesap değeri), çapraz kesme çatlakların ilk oluşumunda kayitlenen kesme değeri ile iyi uyum sağladığı sonucuna varılmıştır.

Duranovic ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan çalışmalarda, kesme mukavemetini ve kırılma şekillerini araştırmak üzere yedi kiriş numunesi GFRP donatılarla eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmiştir. GFRP deney kirişleri, 150x250 mm dikdörtgen kesite, 2500 mm toplam uzunluğa, 2300 mm net açıklığa sahip ve dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan GFRP etriyelerin köşelerde bükülme mukavemeti 390 ila 410 MPa arasında değişmektedir. Çelik donatılarla güçlendirilmiş iki kontrol kiriş numunesi de test edilmiştir. Etriye aralık mesafesi bu çalışmanın temel değişkenidir. Kesme donatısı olmayan kirişlerin göçmesi çapraz kesme kırılmasıyla gerçekleştiği belirtilmiştir. Kesme donatısı olan kirişlerin kırılmasını eğilme ezilmesiyle veya kesme-kopma ile olduğu tespit edilmiştir. GFRP etriyeli kirişlerinden iki kirişin kesme-kopma kırılmasıyla göçtüğü sonucuna varılmıştır. Ama etriyelerin üzerine konulan strengçe aletleri vasıtası ile ölçülen gerilmeler 270 Mpa'yı geçmediği belirtilmiştir.

Shehata ve arkadaşları (2000) tarafından yapılan çalışmalarda, betonarme yapılarda kesme takviyesi olarak kullanılan FRP etriyelerin yapısal performansı incelemek için yapılan deneysel programı anlatılmıştır. FRP etriyeler bir kirişin mekanizmasına etkisini araştırmak amacıyla büyük ölçekte FRP etriyeli deney kiriş numuneler test edilmiştir. Çalışmada, CFRP ve GFRP etriyeli kiriş numuneler yanı sıra bir çelik etriyeli betonarme kiriş numunesi ve bir kesme donatısız referans kiriş numunesi kullanıldığı belirlenmiştir. Eğilme ve kesme donatının türü ve etriye aralığını çalışmanın temel değişkenleri olduğu belirtilmiştir. FRP'nin tek yönlü karakteristikleri nedeniyle, çapraz kesme çatlağının (etriye doğrultusuna göre) eğiminden dolayı FRP etriyelerin konfigürasyonunda bükülmesiyle elyaflara paralel çekme dayanımına göre etriyenin kesme dayanımında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Araştırmanın bulgularına dayanarak Kanada koduna (CSA) uygunluğu ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler için kesme tasarım denklemleri önerilmiştir.

Alkhrdaji ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmalarda, GFRP donatılarla eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmiş dört adet betonarme kirişinin kesme performansını araştırmak üzere bir deney yapılmıştır. GFRP kirişler 178x330 mm kesitinde ve 1500 mm uzunluğunda basit bir mesnetleme açıklığıyla üç nokta eğilme sistemi deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmanın temel amacı, ACI-440 komitesi (2001) tarafından önerilen kesme tasarım yaklaşımını ve sınırları doğrulamaktadır. GFRP kompozit, 9.5 mm çapına ve 19 mm'lik bir bükülme yarıçapına sahip olan kapalı etriyeler kullanılmıştır. Deney değişkenleri, eğilme donatı oranı ve etriye adım mesafesidir (152 mm veya 203 mm etriye aralığı kullanılmıştır). Tek kiriş hariç, tüm kirişler, üst bölgesinde beton ezilmesiyle başlayıp ardından GFRP kopmasının nedeniyle eğilme-kesme göçmesi meydana gelmiştir. Kırılma anında ölçülen etriye gerilmesi, bükülme bölgesinin dayanımından daha düşük çıkmıştır. Kiriş kırılma şekillerinden bağımsız olarak, tüm deney numuneleri ACI 440.1R-01 yönetmeliğinde önerilen yaklaşımı kullanarak elde edilen tahmin dayanımlarından çok daha yüksek bir dayanım göstermiştir.

Rozapqur ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımına olan katkısını belirlemek için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanım değerleri, mevcut ülke yönetmeliği tarafından önerilen denklemlerle karşılaştırılmıştır. FRP donatılar; betonarme kirişin kesme dayanımına olan katkısına, betonun basınç dayanımına, boyuna donatının aksenal rijitliğine ve kirişe ait a/d oranına bağlıdır. ACI 440.R1-03 (2003) tarafından ,FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımı için önerilen denklemlerin daha güvenli sonuçlar verdiği görülmüştür.

Guadagnini ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP donatı ile güçlendirilmiş beton kirişlerin kesme davranışları araştırılmıştır. Altı adet 150x250 mm dikdörtgen kesite, 2500 mm toplam uzunluğa sahip ve 2300, 1800, 1000 mm net açıklıklarla kirişler dört nokta deneyine tabi tutulmuştur. Kirişlerin yarısı boyuna donatı olarak çelik ve diğer yarısı da CFRP donatıyla güçlendirilmiştir. Kirişlerin kesme davranışlarındaki değişimi incelemek için, "kesme bölgesinin boyu / faydalı derinlik" oranı 1.1 ile 3.3 arasında değiştirilmiştir. İlk deney grubunda hiçbir etriye

kullanılmamıştır. Diğer deney grubunda ise sadece yeterli miktarda cam ve karbon kesme takviyesi sağlanması nedeniyle kirişlerin kesme kırılmasıyla göçecek şekilde deneyleri sona ermiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, ACI 440.R1-06 ve Yapısal Mühendisler Enstitüsü(İngiltere) tarafından önerilen modellerden hesaplanan değerleriyle karşılaştırılmıştır. Çelik donatı için kullanılan denklemlerin modifikasyonuna dayanan bu modeller, FRP betonarme kirişlerin toplam kesme kapasitesine betonun ve etriyelerin katkısının çok güvenli olduğunu göstermiştir. Her iki modelin gerçeğe daha yakın bir hale gelmek için değiştirilebileceği önerilmiştir.

Ahmed ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan çalışmalarda, CFRP etriyeli betonarme köprü kirişlerinin kesme performansı incelenmiştir. Çalışmada, CFRP etriyeli betonarme köprü kirişlerinin davranışı ve kesme dayanımı hakkında deneysel veriler sunulmuştur. T kesitinde ve 7000 mm uzunluğunda toplam dört büyük ölçekli CFRP betonarme kiriş nunumesi imal edilip kırılmaya kadar test edilmiştir. Deney kirişleri, 9,5 mm çaplı d/2, d/3 ve d/4 aralıkla kumlu CFRP etriyeli üç adet betonarme kirişi ve 9,5 mm çaplı d/2 aralıkla geleneksel çelik etriyeli bir kontrol kirişi olarak tasarlanmıştır. CFRP etriye kopması veya çelik etriye akması ile üç kirişte kesme yenilmesi oluşmuştur. Son kalan CFRP d/4 etriye aralıklı betonarme kirişi boyuna donatı akması nedeniyle eğilme kırılması gerçekleştirmiştir. Deney bulguları, farklı tasarım modelleri ve yönetmeliklerin sağladığı tahminlerle karşılaştırılmıştır. Mevcut ACI 440.1R-06 tasarım yöntemi emniyetli tahminler sağlamıştır. CAN/CSA S6-06 ve JSCE'nin (1997) düşük şekil değiştirme limitlerinden dolayı FRP etriyelerin katkılarının daha güvenlik olduğunu tespit edilmiştir.

Oller ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP betonarme kirişlerin kesme dayanımının tahmini için mekanik bir model sunulmuştur. Kesme kuvvetinin çatlamayan beton kısmı ve etriyelerle karşılandığını tahmin edilmiştir. Beton kesitindeki asal çekme gerilmesi, beton çekme mukavemetine ulaştığında göçme olduğu kabul edilmiştir. FRP etriyelerin katkısı, etriyelerin bükülmüş bölgesinde muhtemel gevrek ve ani kırılma ile sınırlanmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu için tahminler 112 deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yöntemin

sonuçları, diğer mevcut modelleri veya kılavuz tasarım denklemlerini kullanarak varılan sonuçlardan daha iyi istatistiksel sonuçlara varıldığını kanıtlamıştır.  $V_{deney} / V_{hesap}$  oranının ortalama değeri 1.08'e eşit ve değişkenlik katsayısı % 19.5'tir.

Razaqpur and Spadea (2015) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP kesme donatılı betonarme kirişlerinde kesme gerilmeleri transfer mekanizmaları tartışılmıştır. Bu çözüm yöntemlerin üç yüz FRP donatılı kiriş numunenin kesme dayanımı deneysel sonuçları ile karşılaştırılmasıyla doğruluğu ve yaklaşımı varsayımların geçerliliği değerlendirilmiştir. FRP etriyesiz deney kirişlerin  $V_{deney} / V_{hesap}$  oranı ve standart sapması sırasıyla 1.16 ve 0.24 olduğu sonuçlanmıştır. FRP etriyeli kirişlerde elde edilen sonuçların denklemle hesaplanan değerlere oranı ve standart sapması sırasıyla 1.15 ve 0.23 bulunmaktadır. Çalışmanın sonunda önerilen Kanada yöntemiğinin daha doğru ve tutarlı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Kara ve arkadaşlar (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, FRP etriyeli ve etriyesiz betonarme kirişlerin kesme dayanımı için literatür taramasından 206 adet deney sonucu elde edilip farklı ülke yönetmelikleri tarafından önerilen FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımlarla karşılaştırılması yapılarak bu modellerin uygulanabilirliği de belirlenmeye çalışılmıştır. ACI 440.1R-15 tarafından önerilen denklem ile elde edilen sonuçların malzeme dayanımındaki azaltma katsayıları kullanmadan bile daha güvenli olduğu görülmüştür. BISE tarafından gerek etriyesiz gerekse etriyeli betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen modellerin yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği bulunmuştur. Ayrıca çalışmada FRP etriyeli kirişin kesme katkısı hesaplamak için denklem önerilmiştir.

## BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde GFRP etriyeli dikdörtgen kiriş numunelerinde kullanılan tüm malzemeler ve deney ekipmanları ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

### 3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri

#### 3.1.1. Kiriş betonu

Kirişlerde günümüzde yaygın olarak kullanılmakta beton C25/30 kalitesindeki beton kullanılmıştır. Beton Sakarya ilinde bulunan bir hazır beton firmasından temin edilerek kalıplara yerleştirilmiştir. Betonun dayanım kontrolü için 3 adet standarta uygun olarak 15x15x15cm küp numune alınmıştır. Beton numuneleri, üretilen donatılı kiriş numuneler ile 28 günlük dayanımı kazanma sürecini tamamlamasına kadar aynı ortamda tutulmuştur. Dayanım kazanma süresini tamamlayan küp numuneleri beton test cihazında 0,67 MPa/sn yükleme hızıyla test edilip basınç dayanımı belirlenmiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Beton pres makinesinde basınç deneyi



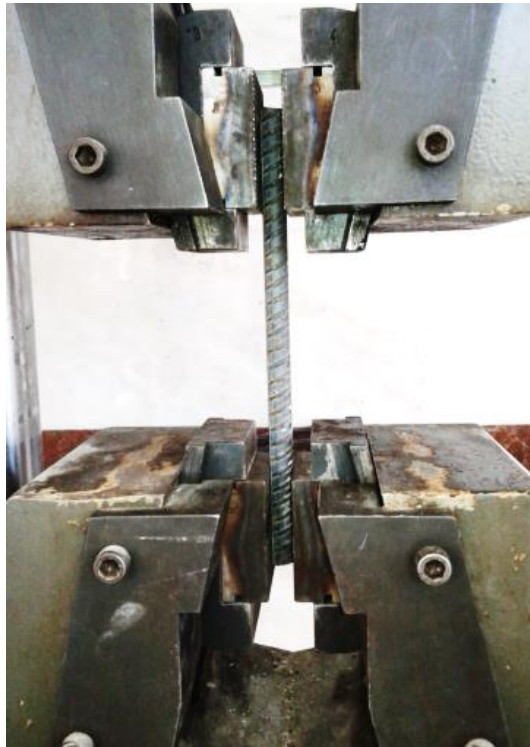
Küp beton numunelerinin ortalama basınç dayanımı 32,15 MPa ve eşdeğer silindirik beton dayanımı 25,70 MPa bulunmuştur (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Küp beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

Numuneler	Basınç Dayanım (MPa)
1	33,52
2	31,34
3	31,60
<b>Ortalama</b>	<b>32,15</b>

### 3.1.2. Çelik donatılar

Betonarme kiriş numunelerde S420 sınıfı nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Donatılar üzerinde çekme deneyi yapılarak mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Donatı anma çapı kullanılarak Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi çekme testine tabi tutulmuştur. Kirişlerde  $\varnothing 10$ 'luk etriye,  $\varnothing 16$  ve  $\varnothing 18$ 'lik boyuna donatı kullanılmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.2. Çelik donatının çekme deneyi



Şekil 3.3. Çekme deneyinde Ø10, Ø16 ve Ø18 donatıların kopma şekli

Çelik donatılardan ikişer adet numune alınarak çekme testine tabi tutulmuş. Tablo 3.2.'de numunenlerin makma akma dayanımı ve maksimum çekme gerilmesi gösterilmektedir. Ø18, Ø16 ve Ø10 donatıların anma çaplarına göre gelen ortalama akma dayanım sırasıyla 526,45 MPa, 475,12 MPa ve 464,75 MPa bulunmuştur.

Tablo 3.2. Boyuna ve enine donatının çekme deneyin sonuçları

Donatının Çapı	Akma Dayanımı $f_{yk}$ (MPa)	Çekme Dayanımı $f_{su}$ (MPa)
Ø16	477,1	751,2
	473,2	748,6
<b>Ortalama</b>	<b>475,1</b>	<b>749,9</b>
Ø18	528,7	887,2
	524,3	882,9
<b>Ortalama</b>	<b>526,45</b>	<b>885,05</b>
Ø10	460,6	595,2
	468,9	594,0
<b>Ortalama</b>	<b>464,8</b>	<b>594,6</b>

### 3.1.3. GFRP etriyeler

Betonarme kiriş numunelerinde kesmeye karşı üretici firmadan tedarik edilen, pultrüzyon metoduyla üretilmiş nervürlü yüzey özelliklerine sahip olan dikdörtgen etriye üretilirken sipariş edildiği ebatlara göre bükülerek şekillendirilen GFRP

etriyeler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan GFRP etriyeler Şekil 3.4.'te görülmektedir. Etriyelerin malzeme ve temel mekanik özellikleri Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan GFRP donatının özellikleri

GFRP Donatı	GFRP
Ağırlıkça Cam Elyaf Oranı %	69,70
Özgül Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	1,83
Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	765
Elastisite Modülü (GPa)	48,5



Şekil 3.4. Nervürlü dikdörtgen etriyeler

### 3.1.3.1. GFRP etriyelerin kumlanması

GFRP nervürlü-kumlu etriyelerin elde edilebilmesi için mevcut nervürlü etriyelerin üzerine hazırlanan kum karışımının yapıştırılmasında için HR epoksi esaslı doyumma reçinesi kullanılmıştır. EPOSİS (MT 1953 H / MT 1106 R) epoksi reçine iki

bileşenden oluşmakta olup karışım oranları H:R = 1:1 dir. İki bileşenli epoksi reçineye (Şekil 3.5.) ait özellikler Tablo 3.4.'te verilmiştir.

Kullanılan kum karışımı:

- İri kum (1 – 2 mm)'den 70%
- İnce kum (0,5 – 1 m)'den 30%
- Epoksi reçine oran 1:1 (H:R)

Tablo 3.4. HR epoksi reçine özellikleri

Malzeme	HR epoksi reçine
Elastisite modülü (GPa)	3,50
Kayma modülü (GPa)	1,60
Poisson oranı (%)	0,35
Özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	1,24



Şekil 3.5. Epoksi bileşenleri ve karışımı

İyice karıştırılan epoksi reçine GFRP etriye donatıların yüzeyine ince bir tabaka halinde sürülmüş ve hazırlanan kum havuzuna sokup donatının üzerine el ile basarak kum taneleri iyici yapıştırılmıştır. GFRP donatılarının kumlamasından sonra yedi gün laboratuvar ortamında kür edilmiştir (Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.).



Şekil 3.6. Kum karışım bileşenleri ve kumlanan GFRP etriyeler



Şekil 3.7. Nervürlü-kumlu dikdörtgen etriyeleri

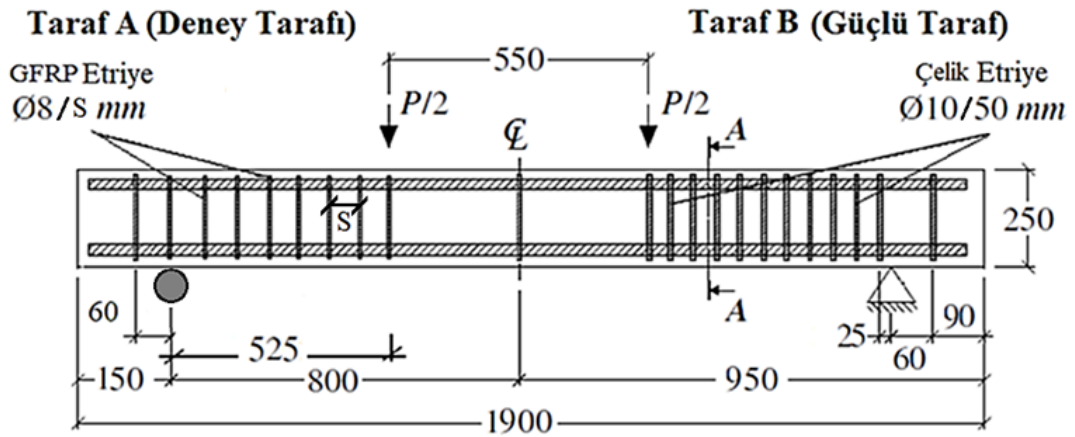
### 3.2. Deneysel Çalışma

GFRP etriyeli kiriş numunelerinin üretimi ve deneyleri Sakarya Uygulama Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

#### 3.2.1. Test düzeneği, parametreleri ve numune ayrıntıları

Deneysel çalışmalar için 12 adet GFRP etriyeli kompozit kiriş numune yanı sıra üç adet referans kiriş 1900 mm boyunda, 150x250 mm kesitinde toplam 15 adet kiriş numune tasarlanmıştır. Referans kiriş numuneleri kesme dayanımı zayıf eğilme dayanımı güçlü olacak şekilde tasarlanmıştır. GFRP kiriş numunelerinde boyuna donatı olarak alt ve üst bölgelerine sırasıyla 3Ø18 ve 2Ø16 S420 çelik donatısı

kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin kesme bölgelerinin biri kesme dayanımı açısından güçlü diğeri zayıf olarak tasarlanmıştır. Kirişin güçlü tarafında Ø10 çapında S420 sınıfı çelik etriyeler 50 mm aralıkta yerleştirilmiştir. Referans kirişler 525mm boyundaki zayıf kesme bölgesine etriye yerleştirilmemiştir. Diğer kirişlerde ise, GFRP Ø8 çapı etriyeler kiriş zayıf bölgesine 100, 75, 50 mm adım mesafesi ile yerleştirilmiştir. Kirişlerde kullanılan çekme ve basınç donatısının oranı sırasıyla  $\rho = 0.02302$ ,  $\rho' = 0.01213$ 'dir. Kirişin denge donatı oranı  $\rho_b = 0.0248$ 'dir. Kirişlerde kesme-basınç kırılma durumu sağlaması için deney kiriş numunelerinin  $a/d$  oranı 1,0 değerinden daha büyük 2,5 değerinden daha küçük olması tasarlanmıştır. Kesme bölgesinin uzunluğu  $a = 525$  mm yükün uygulama noktasından mesnete kadar olan mesafesi ve kirişin faydalı yüksekliği  $d = 221$  mm'dir. Onlara istinaden  $a/d$  oranı 2,38 olarak belirlenmiştir. Tasarlanan GFRP "S" adım mesafesiyle etriyeli kiriş örnek geometrisi ve donatı yerleşim planı Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Deney kiriş örneği (Ebatlar mm'dir)

Deney kapsamında GFRP kesme donatısının davranışı incelenmek amacıyla beş kiriş grubu hazırlanmıştır. Çalışmada kesme donatısı dikdörtgen etriye olarak incelemek için kirişlerde etriye adım mesafesi ve yüzey özellikleri etkileri araştırılmıştır. Grupların kiriş simgesi ve ayrıntılı özellikleri Tablo 3.5.'te gösterilmektedir.



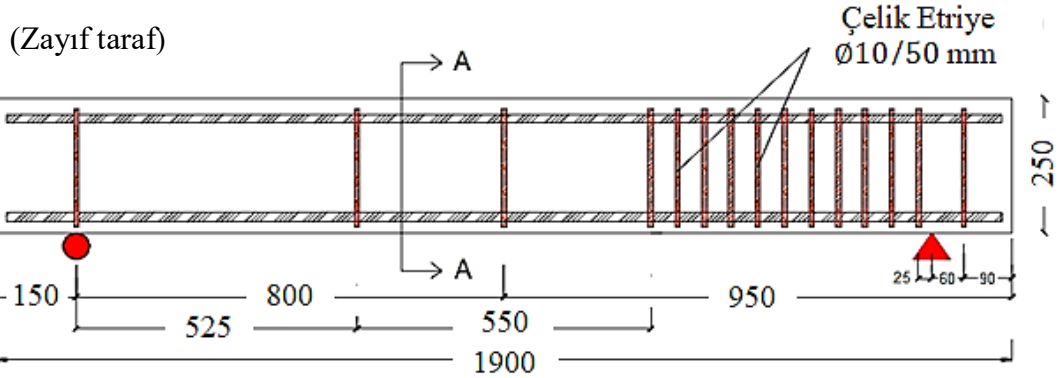
Tablo 3.5. Deney numuneler için parametreler tablosu

Numune		Beton	Boyuna Donatı		FRP Donatı				
ID	Adet	$f'_c$ (Mpa)	Türü	$\rho - \rho'$ (%)	Türü	$d_f$ (mm)	S (mm)	Yüzey tipi	a/s
R	3	25,72	Çelik	1,09	-	-	-	-	-
GN100	3	25,72	Çelik	1,09	Cam	8	100	Nervürlü	5,3
GN75	3	25,72	Çelik	1,09	Cam	8	75	Nervürlü	7,0
GK75	3	25,72	Çelik	1,09	Cam	8	75	Kumlu	7,0
GN50	3	25,72	Çelik	1,09	Cam	8	50	Nervürlü	1,5

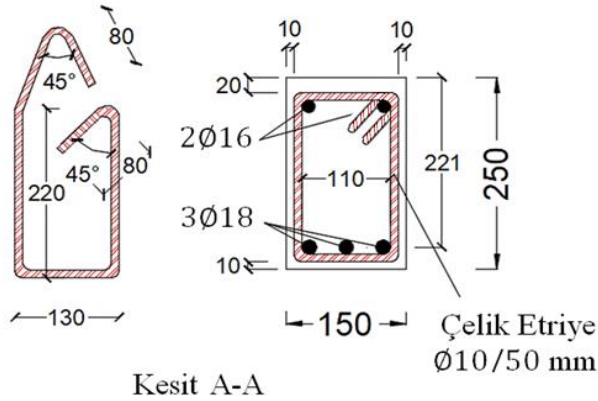
Tabloda;  $\rho$ : Kirişteki çekme donatı oranı,  $\rho'$ : kirişteki basınç donatı oranı,  $d_f$ : FRP etriye donatının çapı, S: Etriye adım mesafesini ifade etmektedir.

### 3.2.1.1. Referans kirişler

Referans kirişler eğilme dayanımı açısından güçlü kesme dayanımı açısından (A tarafı) zayıf olarak tasarlanmıştır. Kirişin zayıf kesme bölgesine etriye olmadığından dolayı betonun ve boyuna donatının kesmeye katkısı belirlenecektir. Referans kiriş geometrisi ve donatı yerleşim planı Şekil 3.9.'da verilmiştir. Referans kirişin kesit ayrıntıları Şekil 3.10.'da verilmiştir.



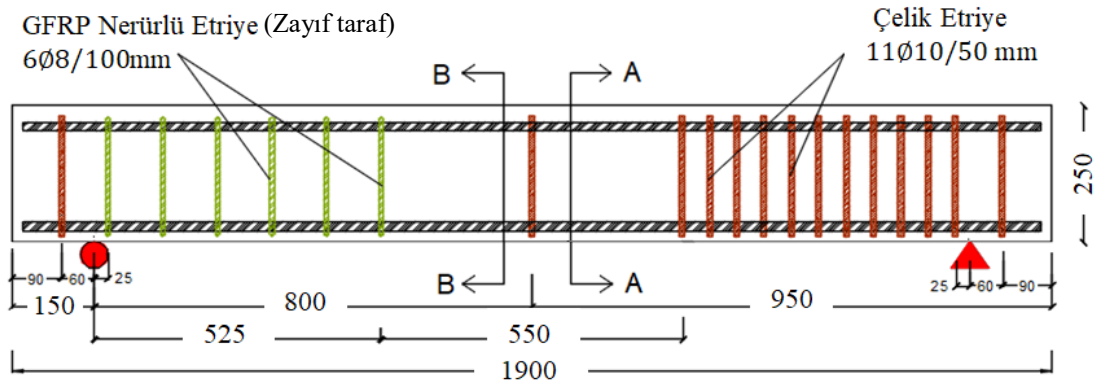
Şekil 3.9. Referans kirişlerin geometrik ebatı ve donatı yerleşim planı (Ebatlar mm'dir)



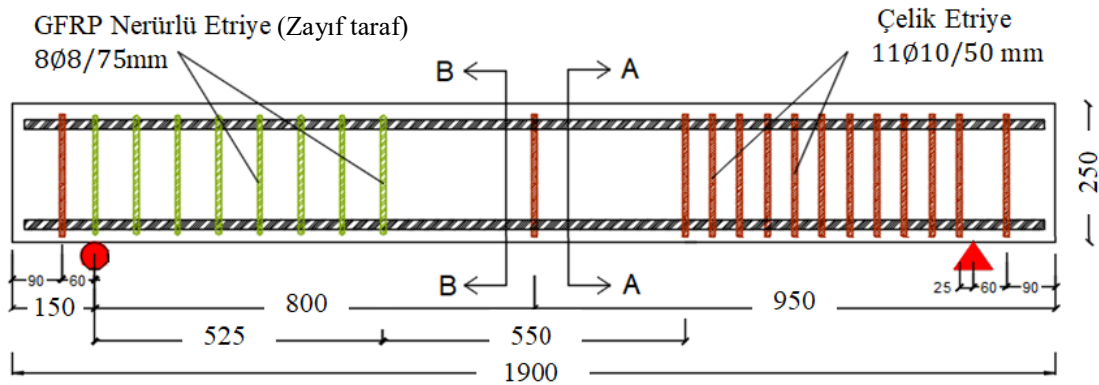
Şekil 3.10. Referans kirişin kesit ayrıntıları (Ebatlar mm'dir)

### 3.2.1.2. Nervürlü GFRP etriyeli kirişler

Kiriş numuneler nervürlü GFRP etriyeleri ile tasarlanmıştır. Beton sınıfı ve boyuna donatı türü ve özellikleri sabit tutulup kesme test tarafına  $\varnothing 8$  anma çaplı nervürlü kesme donatı 50, 75 ve 100 mm aralıklarla kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan GFRP etriyelerin  $r_b/d_b$  oranı 3 olarak tasarlanmıştır (ACI 440.1R-06, 2006). Bu kirişlerden her "S" adım mesafesi için üçer numune üretilmiştir. Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de GFRP nervürlü etriyeli kirişler geometrisi ve donatı yerleşim planı verilmiştir.

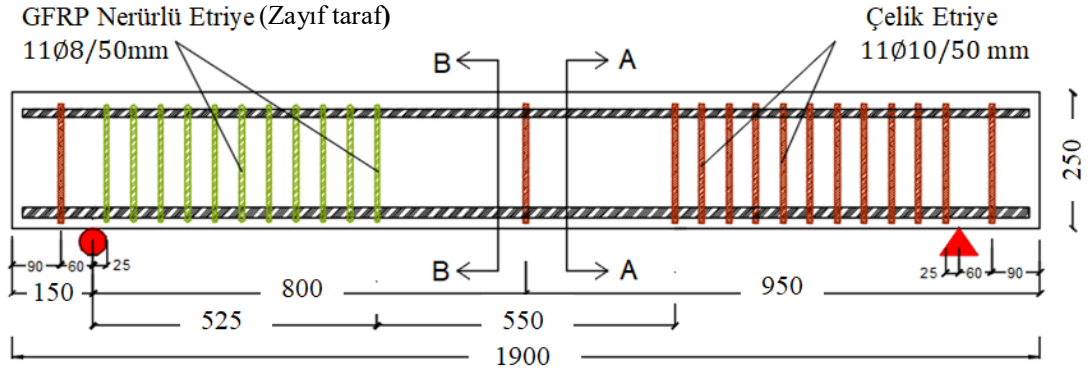


(a) GN100 deney kirişinin zayıf tarafına yüzey nervürlü 100 mm aralıkla cam etriye yerleşimi

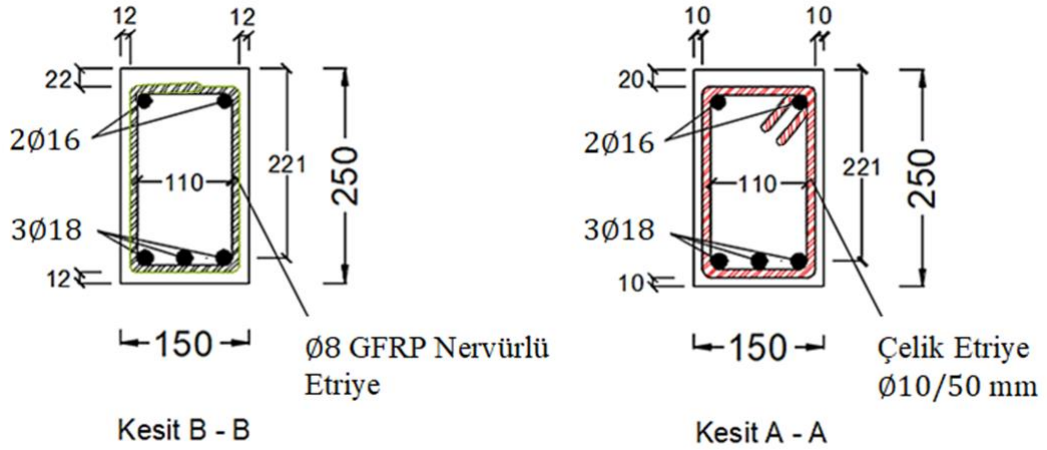


(b) GN75 deney kirişinin zayıf tarafına yüzey nervürlü 75 mm aralıkla cam etriye yerleşimi



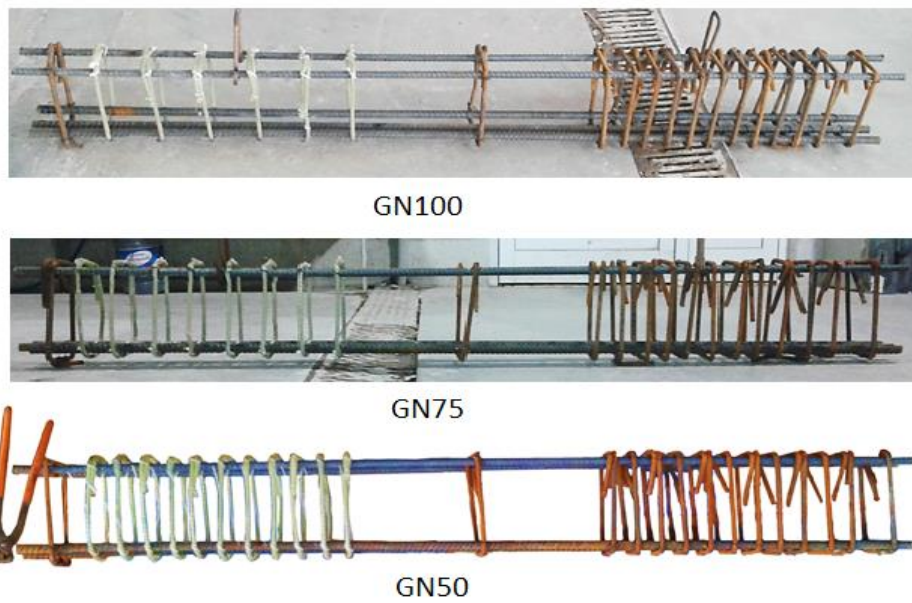


(c) GN50 deney kirişinin zayıf tarafına yüzey nervürlü 50 mm aralıkla cam etriye yerleşimi



(d) Nervürlü etriyeli kirişlerin kesit ayrıntıları (Ebatlar mm'dir)

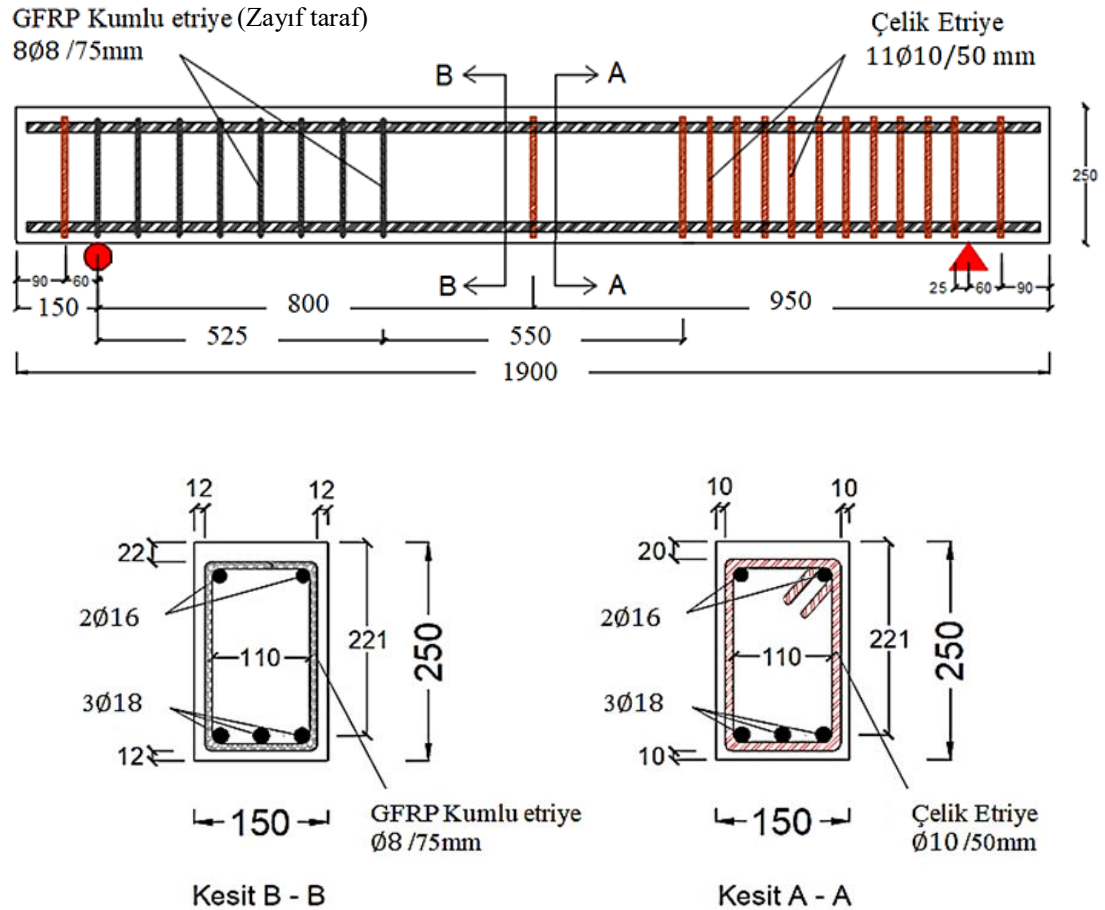
Şekil 3.11. (a), (b) ve (c) Nervürlü GFRP kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı, (d) kesit A-A ve B-B ayrıntıları (Ebatlar mm'dir)



Şekil 3.12. Deney kirişlerin demir ve GFRP montajları

### 3.2.1.3. Kumlu GFRP etriyeli kirişler

Çalışmada nervürlü olarak üretilen GFRP etriyelerinin yüzeyine betonla daha iyi aderans sağlaması için kumlama yapılmıştır. Kumlu GFRP donatının etriye olarak kesmede davranışı incelemek ve diğer nervürlü donatılarla karşılaştırmak üzere kumlu yüzeyli yüzey özelliklerine sahip etriyeler laboratuvar ortamında kumlanarak üretilmiştir. GFRP kumlu etriyeli kirişler boyuna donatı ve güçlü kesme tarafı referans kirişlere benzer olarak üretilmiştir. Kesme açısından zayıf tarafına (B tarafı) her bir kirişe 8 kumlu dikdörtgen etriye 75mm aralıkla yerleşmiş ve üç adet kiriş numune hazırlanmıştır. Şekil 3.13.'te GFRP kumlu etriyeli kirişler geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı verilmiştir.

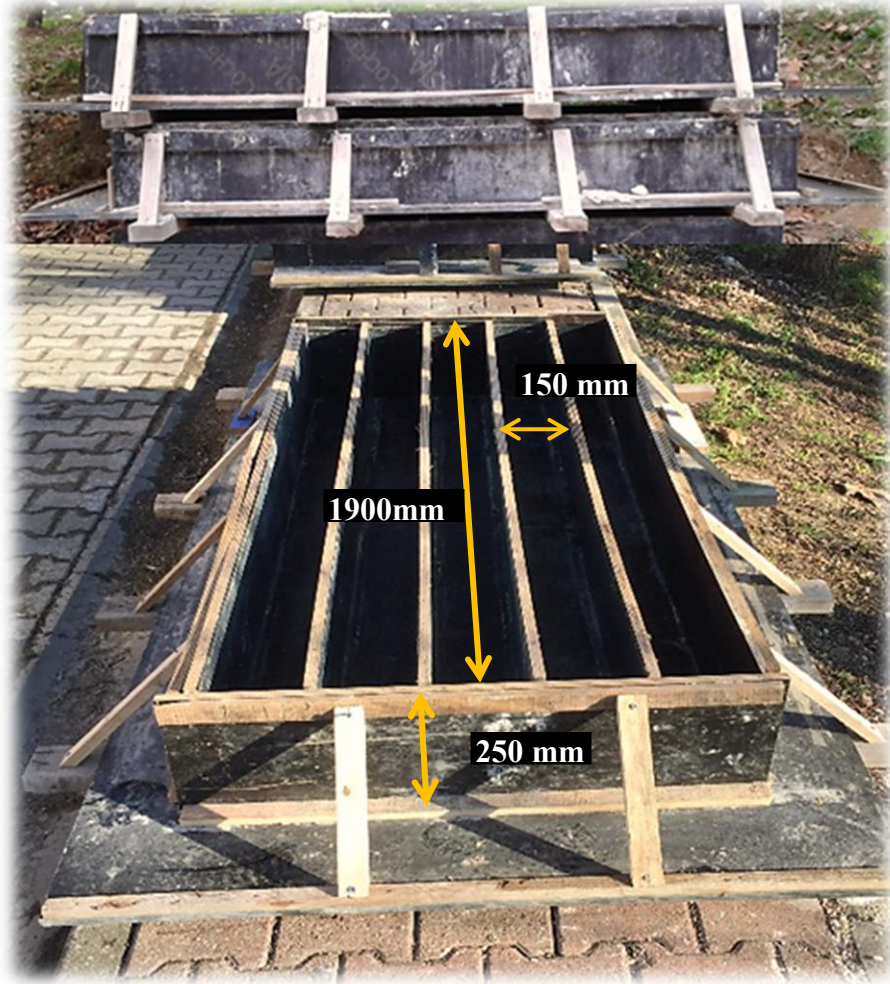


Şekil 3.13. Kumlu GFRP etriyeli kirişin geometrik ebadı ve kesit A-A ve B-B ayrıntıları (Ebatlar mm'dir)

### 3.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

#### 3.2.2.1. Kiriş kalıbı

Kiriş numunelerin boyutlarına uygun olarak dikdörtgen kesitli kiriş kalıpları hazırlanmıştır. Kiriş deney numunelerinin yüzeylerin düzgün çıkması için plywood malzeme ile kalıp hazırlanmıştır (Şekil 3.14.). Plywood kiriş numuneler kolay ayrılmasını ve betonun kalıp yüzeyine yapışmamasını sağlamıştır (Şekil 3.15.). Kiriş numuneler kalıptan kolay ayrılması için plywood kalıp yağı ile yağlanmıştır.



Şekil 3.14. İmal edildiği plywood kalıpları

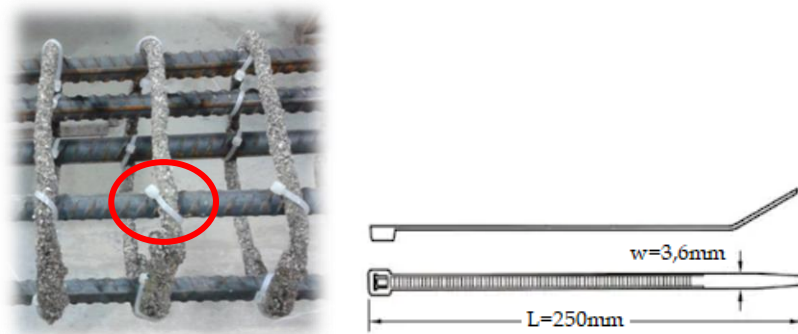




Şekil 3.15. Kalıpları plywood yağı ile yağlandırılması

### 3.2.2.2. Kiriş numunelerin kalıplara yerleştirilmesi

Kiriş kalıpları hazırlandıktan sonra, kirişlerin bir ucuna GFRP etriyeler diğer ucuna çelik donatılı etriyeler konulmuştur. Kirişlere 20 mm paspayı aparatları boyuna donatılarına takılmıştır. Hazırlanan donatı kafesleri kalıplarına yerleştirilmiş ve beton dökümüne hazırlanmıştır. GFRP etriyeler, çelik boyuna donatı ile bağlanması amacıyla plastik kelepçe kullanmıştır. GFRP etriyeleri montajları esnasında fazlalık olan plastik kelepçe kısımları kesilmiştir. Şekil 3.16’da deney kirişlerde plastik kelepçe kullanımı gösterilmiştir. Kiriş kalıplarına donatı kafesleri yerleşimi Şekil 3.17., Şekil 3.18. ve Şekil 3.19.’da verilmiştir.



Şekil 3.16. GFRP etriyeler, çelik donatı ile bağlanması



Şekil 3.17. Nüvürlü GFRP etriyeli 50 mm ve 100 mm aralıklı kiriş numunelerinin görünümü



Şekil 3.18. Nüvürlü ve kumlu GFRP etriyeli 75 mm aralıklı numune kirişlerinin görünümü





Şekil 3.19. Referans kiriş numunelerinin ve 50 mm aralıklı nervürlü GFRP etriyeli kiriş numuneleri

### 3.2.2.3. Beton dökümü

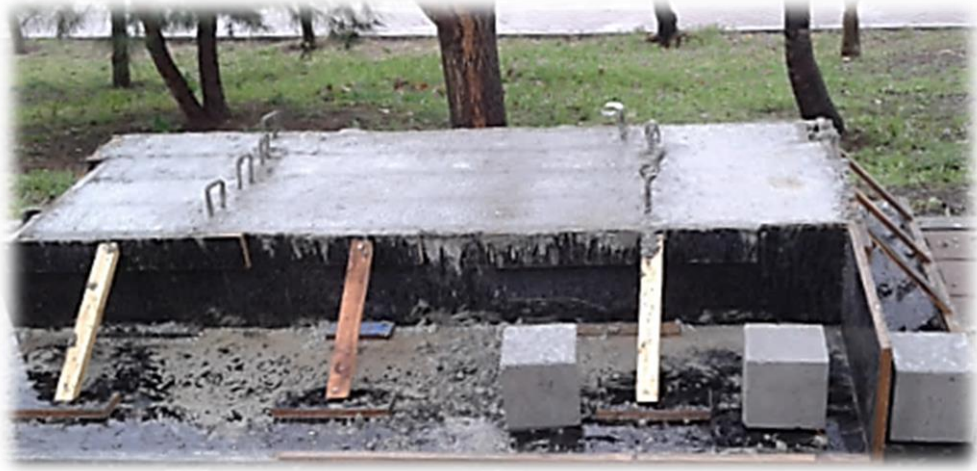
C25/30 dayanım sınıfındaki taze beton ilimizde bulunan bir firmadan temin edilerek tüm kirişler bir seferde kalıplara dalıcı el vibratörü ile yerleştirilmiştir. Yerleştime sonrası kiriş üst yüzeyi perdelanarak düzeltilmiştir. Beton dökümü ve vibrasyon işlemi Şekil 3.20.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Beton dökümü ve yerleştirilmesi

Beton dayanımını kontrol için alınan 15x15x15 cm boyutlarındaki üç adet küp numune alınarak kirişler ile aynı ortamda kür sürecini tamamlayıncaya kadar

bekletilmiştir (Şakil 3.21.). Numuneler el vinç arabasıyla kirişlere yapılan tutma kancalar ile betonun dökümünden bir hafta sonra kalıplardan çıkarılmış ve numuneler 28 gün dayanımı alana kadar her gün kirişlerin dış yüzeyi sulanması sağlanmıştır (Şakil 3.22.).



Şakil 3.21. Beton dökümü ardından bir gün sonra kiriş ve küp numunelerin aynı şartlarda bekletilmesi



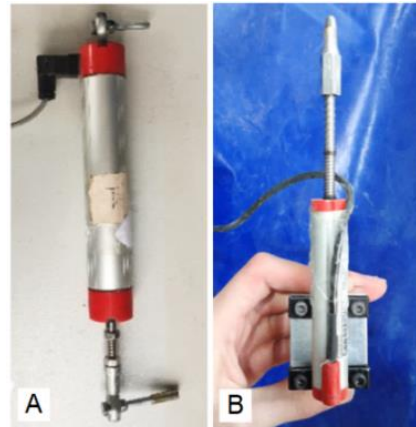
Şakil 3.22. Kiriş numuneleri kalıptan çıkarıp kür edilmesi

### 3.2.3. Deney düzeneği

#### 3.2.3.1. Yükleme ve ölçüm düzeneği

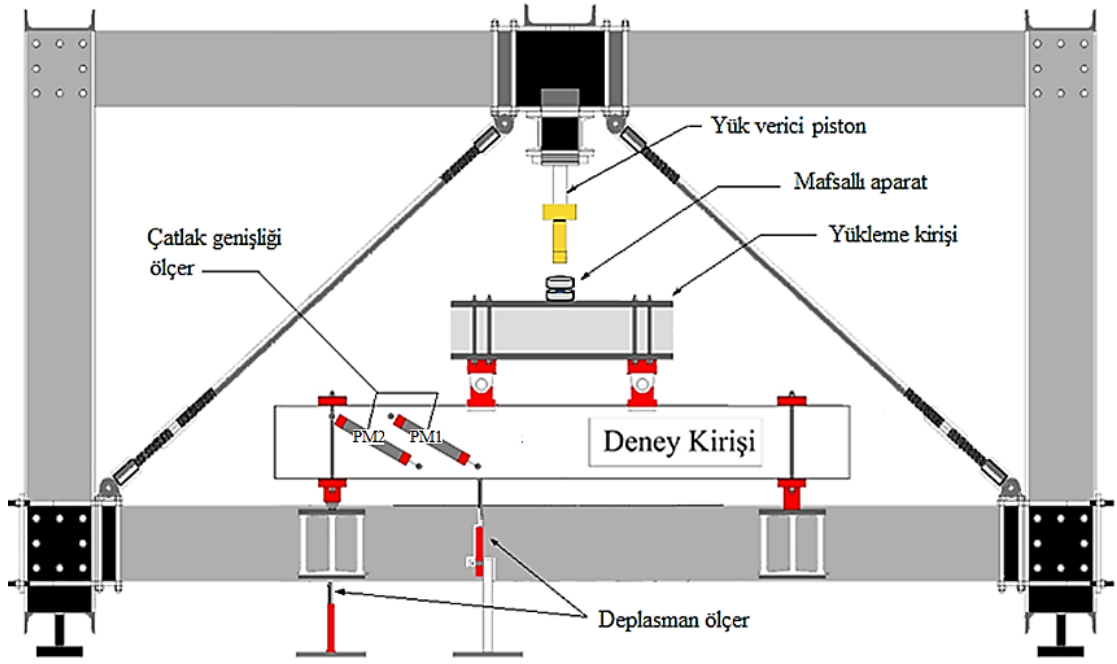
Kiriş numunelerinin dört nokta eğilme deneyinde Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (SUBÜ) Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarındaki eğilme deney çerçevesi kullanılmıştır. Eğilme çerçevesi ekipmanları ile kirişlerin kırılma yükleri, oluşan sehim miktarları ve kesme çatlak genişliği tespit edilmiştir. Yükleme çerçevesinde bulunan iki mesnetten biri hareketli biri sabit ve mesnetlerin arasındaki açıklık mesafesi 1600 mm olarak ayarlanmıştır. Deneysel çalışmada, kirişler dört

nokta yükleme sistemine tabi tutulmuştur. Kirişlerin üst yüzeyinin üzerine 550 mm aralıkla iki basit mesnete sahip olan yükleme kirişi yerleştirilmiştir. Hidrolik silindir pompasından yükleme kirişine aktarılan P tekil yük, P/2 eşit iki tekil yük olarak deney kirişlerine aktarılmıştır. Yükleme kirişinin iki mesnet noktaların altına yükün düzgün dağıtması için 5mm kalınlığında dikdörtgen şeklinde kauçuk parçalar yerleştirilmiştir. Yükleme sıfırdan başlamış ve kirişlerinde göçme oluşmasına kadar yüklemeye devam edilmiş olup göçme oluştuğundan sonra yük boşaltılmıştır. Yük verilerinin değişmesinin okunmasında elektronik yük hücresi (Load cell) kullanılmıştır. Yapılan yükleme düzeneğinde kesme açıklığı 525 mm'dir. Yük hücresi tarafından okunan veriler veri kaydedici aracı ile kaydedilmiştir. Yetersiz kesme dayanımı bölgesindeki uygulanacak P/2 yükün altındaki oluşacak deplasmanı ölçmek için, 0.01 mm hassasiyetli olan elektronik deplasman ölçer cetveli (Doğrusal potansiyometre) yükün uygulandığı noktada kirişin altına yerleştirilmiştir. Kirişlerin GFRP etriyeli bölgesinde oluşacak kesme çatlağının genişliğini belirlemek için kirişin yan yüzeyine iki adet elektronik potansiyometre cetveli yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm aletleri Şekil 3.23.'te verilmiştir. Yükleme sistemine bağlı olarak veri toplama sistemi (Datalogger) vasıtasıyla, veriler kanallardan her saniye kaydedilmiş olup veri toplama sistemine bağlı olarak bilgisayar ortamında depolanmıştır. Ayrıca kayıt süresince veri toplama sistemi dijital ekranından izlenmiştir. Yükleme düzeneği ve ölçüm aletlerinin yerleşimi Şekil 3.24.'te ve kiriş deney numunelerinin kesme ve moment diyagramları Şekil 3.25.'te verilmiştir. Yükleme sisteminde ölçüm aletlerinin yerleşim detayları Şekil 3.26.'da gösterilmiştir.

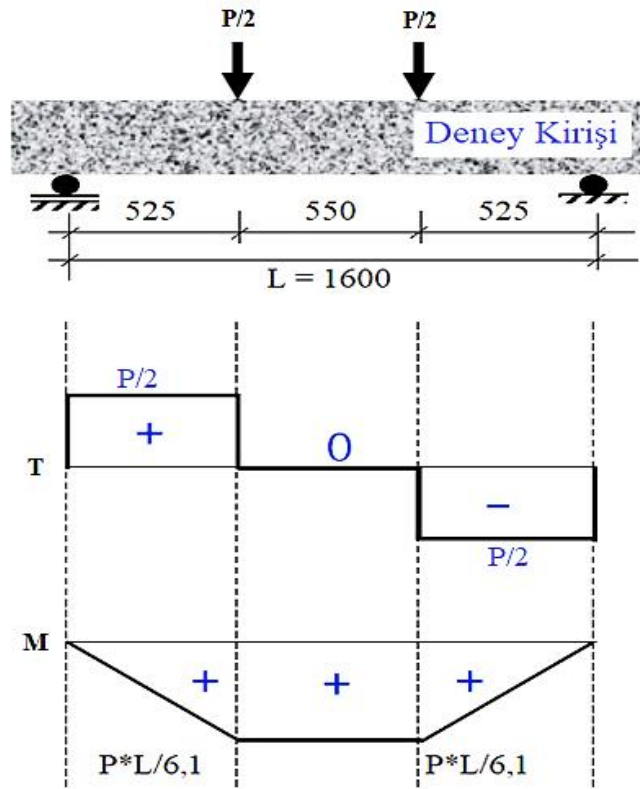


Şekil 3.23. A) Deplasman ölçme cetveli, B) Çatlak genişliği ölçme cetveli

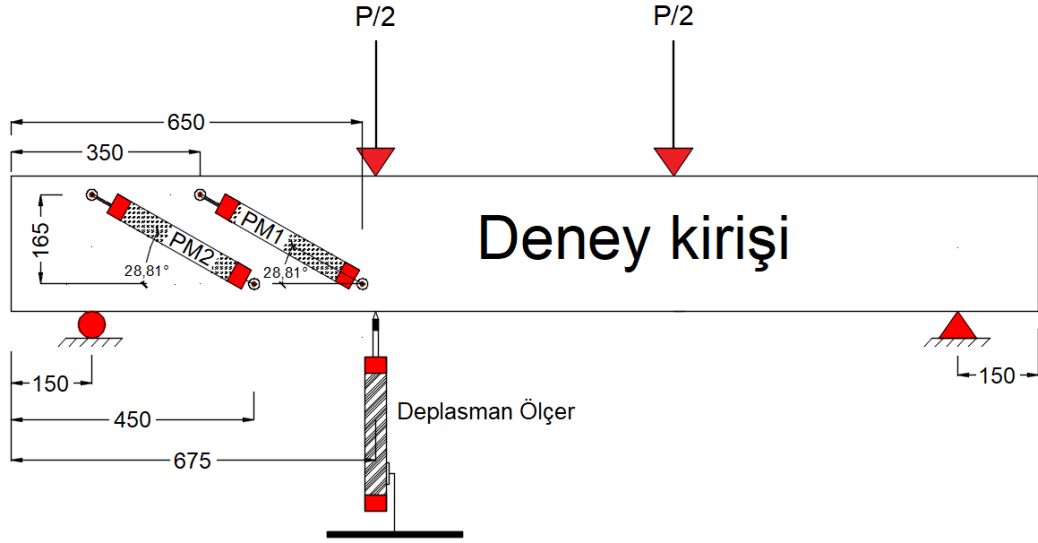




Şekil 3.24. Yükleme düzeneği ve ölçüm aletlerinin yerleşimi



Şekil 3.25. Yükleme sistemine göre T ve M grafikleri



Şekil 3.26. Yükleme sisteminde ölçüm aletlerin yerleşim detayları

### 3.2.3.2. Gerçek çatlak açıklığı hesabı

Deney kirişlerine çatlak ölçmek amacıyla yerleştirilen potansiyometrelerin olan doğrultusu, deney esnasında olan gerçek çatlak açısına dik olarak doğrultusu ile oluşan açının elde edip (Şekil 3.27.) kesme yüküne karşılık gelen gerçek çatlak açıklıkları bağıntı 3.1 ile hesaplanmıştır.

nı ifade etmektedir.

$$R_t = t \times \cos \alpha ; \alpha = 90 - (\beta + \theta) \quad (3.1)$$

Burada;  $R_t$ : Gerçek çatlak açıklığı,  $t$ : Ölçülen çatlak açıklığı,  $\alpha$ : Kesme çatlakının doğrultusuna dik olarak potansiyometrenin doğrultularının arasında olan açı,  $\beta$ : Çatlak açısı,  $\theta$ : Potansiyometrinin montaj edildiği açını ifade etmektedir.

Deney verilerine her kiriş numunesi kesme çatlakın dorultusu ile kiriş uzun ekseni arasındaki kesme açısı elde edip gerçek çatlak hesapları ve düzeltilmeleri yapılmıştır.



## BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI VE TEORİK ANALİZ

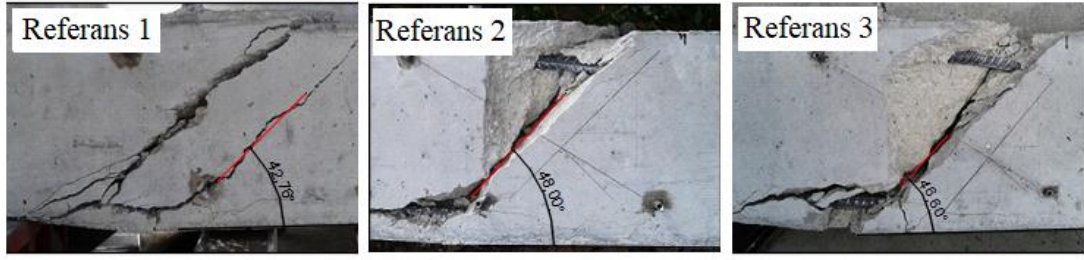
Bu çalışmada GFRP kompozitlerin betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı üzerine deneysel ve teorik analiz çalışmaları yapılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen 15 adet kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme ile dört nokta eğilme deneyinde test edilmiştir. Kirişlerin kesme davranışları, kesme dayanımları, etriye aralıklarının etkisi, kumlu yüzey etkisi incelendiği ve hesap yöntemlerle karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Deney kiriş grublarında her kiriş için maksimum kesme yüküne karşılık gelen yükün altındaki deplasman ve çatlak genişliği bulunmuştur. Ayrıca kirişlerin kesme dayanımları yönetmelik ve araştırmacılar önerdiği hesap sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 4.1. Referans Kiriş Numunelerinin Eğilme Deneyi Sonuçları

Hazırlanan üç adet referans kiriş numunesi dört nokta eğilme deneyinde test edilmiştir (Şekil 4.1.). Referans kirişlerin kırılma şekli ve kesme çatlak açısı Şekil 4.2.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Referans kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi



Şekil 4.2. Referans kirişlerin kırılma şekli ve kesme çatlak açısı

Deneyin sonucunda kesme yükü-çatlak açıklığı, kesme yükü-deplasman ve çatlak açısı değerleri elde edilmiş olup Tablo 4.1.'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Referans kirişlerin mekanik özellikleri

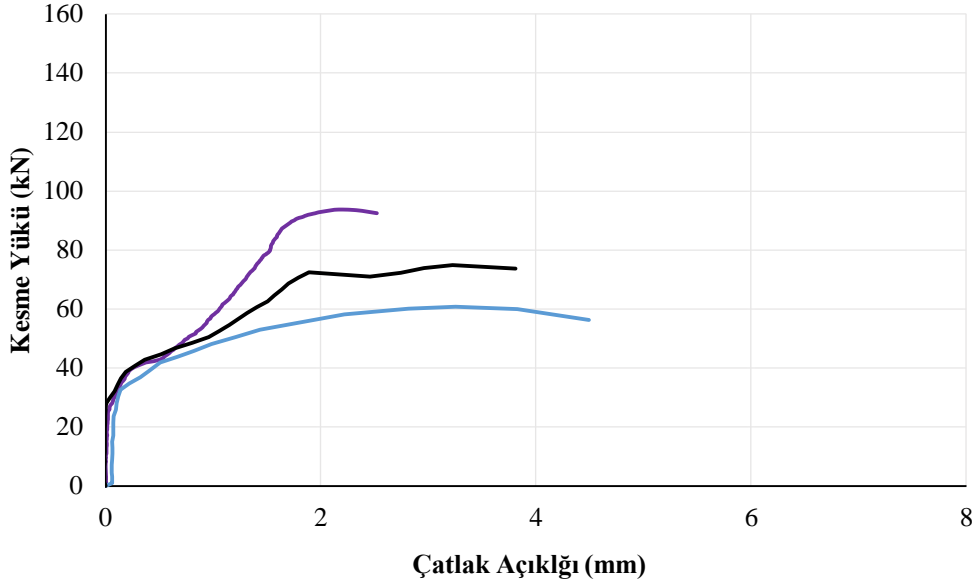
Referans	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ PM2 (mm)	$R_t$ PM1 (mm)	$\beta$ (derece)	$\Delta$ (mm)	$\alpha$ (derece)
1	74,89	-	3,22	42,76	9,23	18,43
2	60,76	3,55	3,25	48,00	7,78	13,19
3	93,72	0	2,17	46,60	8,51	14,59
<b>Ortalama</b>	<b>76,46</b>	<b>3,55</b>	<b>2,88</b>	<b>45,79</b>	<b>8,51</b>	<b>15,40</b>

Tabloda;  $V_{exp}$ : Deneysel kesme yükü,  $R_t$ : Gerçek çatlak açıklığı, PM1: Potansiyometre numara 1, PM2: Potansiyometre numara 2,  $\Delta$ : Maksimum yükün altındaki deplasman,  $\beta$ : Çatlak açısı,  $\alpha$ : Kesme çatlaklarının doğrultusuna dik ve potansiyometrenin doğrultularının arasında olan açı ifade eder.

Referans kirişler (Kirişin zayıf kesme bölgesinde yalnızca çelik boyuna donatılar) kesme davranışı incelendiğinde, maksimum kesme yüklerinin ortalaması 76,46 kN, referans kirişteki kesme çatlak potansiyometre No.2 alt tesbit noktasından geçtiğinden dolayı potansiyometrenin konumu bozulması sebebiyle çatlak okuması iptal edilmiştir. PM2 ve PM1 'de ortalama çatlak açıklıkları sırasıyla 3,55 mm ve 2,88 mm bulunmuştur. Referans 3'te PM2'in kapsadığı kesme bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir. Zayıf kesme dayanımı bölgesindeki (A tarafı) hareketli mesnete yakın uygulanan P/2 tekil yükün hemen altında oluşan ortalama deplasman 8,51 mm alınmıştır. Maksimum kesme yüküne eriştikten sonra kirişler taşıma gücünü kaybetmiş ve kirişler ani kesme kırılmasıyla göçmüştür.

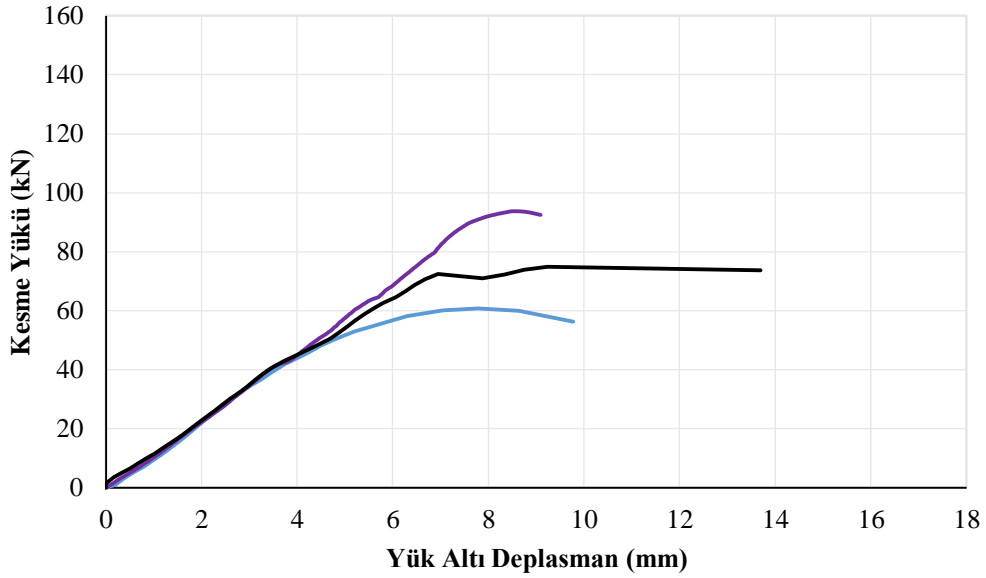
Kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği Şekil 4.3.'te sunulmuştur. Grafikten yaklaşık 31 kN kesme yükünün civarında ilk beton çatlak oluştuğu ve yüklemeye devam edince kesme yükü ile çatlak açıklığı arasındaki orantısı değiştiği anlaşılmaktadır. Kesme

yükü-çatlak açıklığı grafiği tepe noktasında yük artmazken deformasyonun arttığı ve sonrasında kiriş yenilmeye başlamıştır.



Şekil 4.3. PM1 ile referans kirişlerin kesme yüküne karşılık gelen çatlak açıklığı grafiği

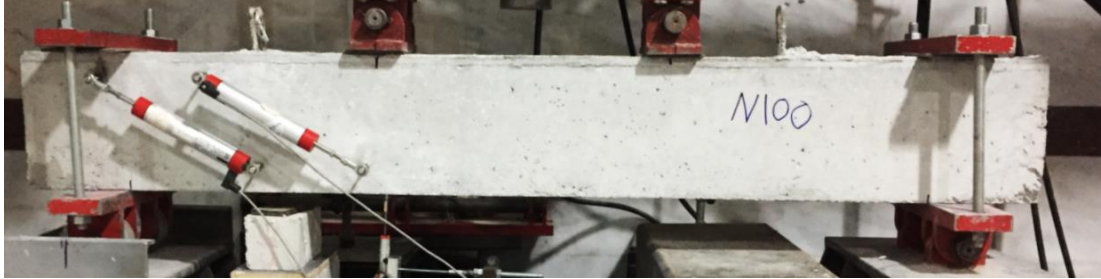
Kesme yükü-yük altı deplasman grafiği incelendiğinde kesme yükü ile oluştuğu deplasman arasında orantılı bir davranış gösterdiği olup kirişlerin kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın bozulmaya başladığı ve göçme dayanımlarında farklı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Referans kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği

#### 4.2. GN100 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

Üç adet nervürlü GFRP etriye 100 mm aralıkla kiriş numunesi (GN100) eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. GN100 kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi

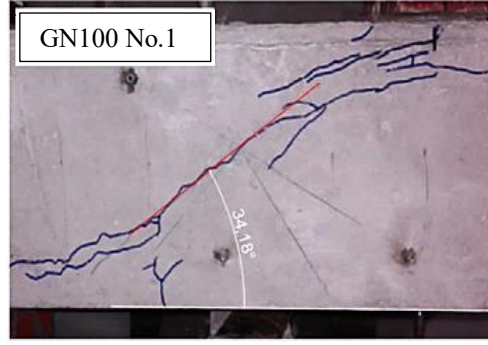
Maks. kesme yüküne karşılık gelen ortalama çatlak, deplasman ve çatlak açısı değerleri bulunmuştur (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. GN100 kirişlerin mekanik özellikleri

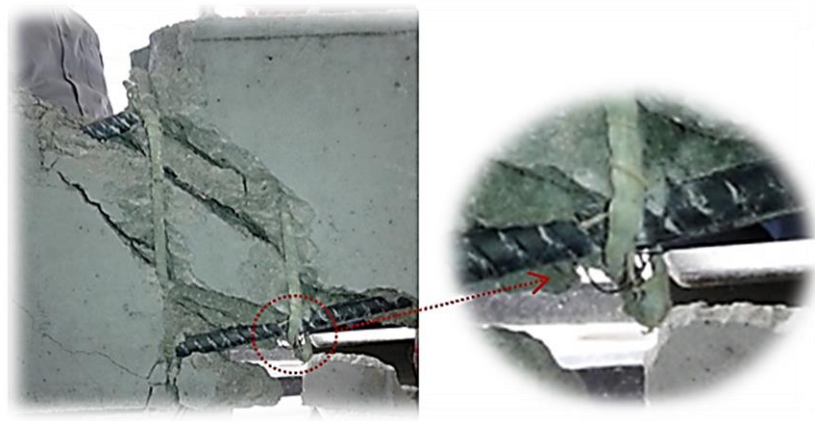
Numune	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ PM2 (mm)	$R_t$ PM1 (mm)	$\beta$ (derece)	Deplasmanı $\Delta$ (mm)	$\alpha$ (derece)
GN100 (1)	123,86	1,23	1,19	35,05	6,78	26,14
GN100 (2)	124,13	1,53	1,17	38,75	8,64	22,44
<b>Ortalama</b>	<b>124,00</b>	<b>1,38</b>	<b>1,18</b>	<b>36,90</b>	<b>7,71</b>	<b>24,29</b>

Kiriş numunelerinden GN100 No.3 kirişi deney hatasına uğradığı nedeniyle tabloya eklenmemiştir. 1. Ve 2. deney kirişin etriyelerin alt köşelerinden kopma yenilmesi meydana gelmiştir (Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.). Kirişlerin ani kesme yenilmesi ile göçmüş olduğundan dolayı deney sona erdirilmiştir. PM2 ve PM1’de ortalama çatlak açıklıkları sırasıyla 1,38 mm ve 1,18 mm bulunmuştur. Zayıf kesme dayanımı bölgesindeki (A tarafı) hareketli mesnete yakın uygulanan P/2 tekil yükün hemen altında oluşan ortalama deplasman 7,71 mm alınmıştır.





Şekil 4.6. Deney esnasında GN100 No1 deney kiriş numunesinde kılcal çatlak şekli



(a) GN100 No.1 kiriş numunesinin kopma biçimi ve detayı



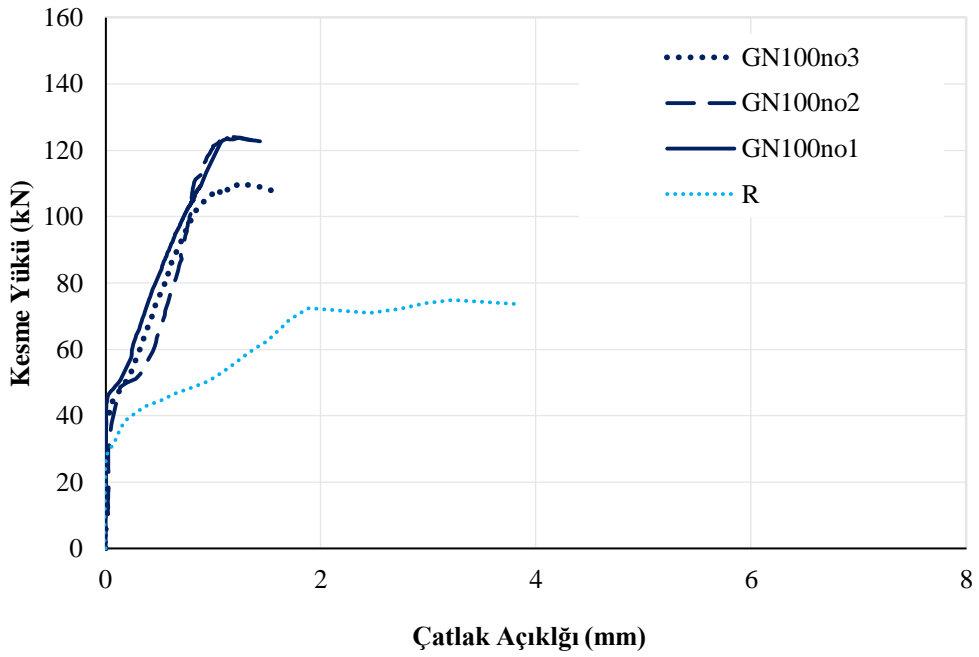
(b) GN100 No.2 kiriş numunesinin kopma biçimi ve detayı

Şekil 4.7. GFRP etriyelerinin yenilme ayrıntıları

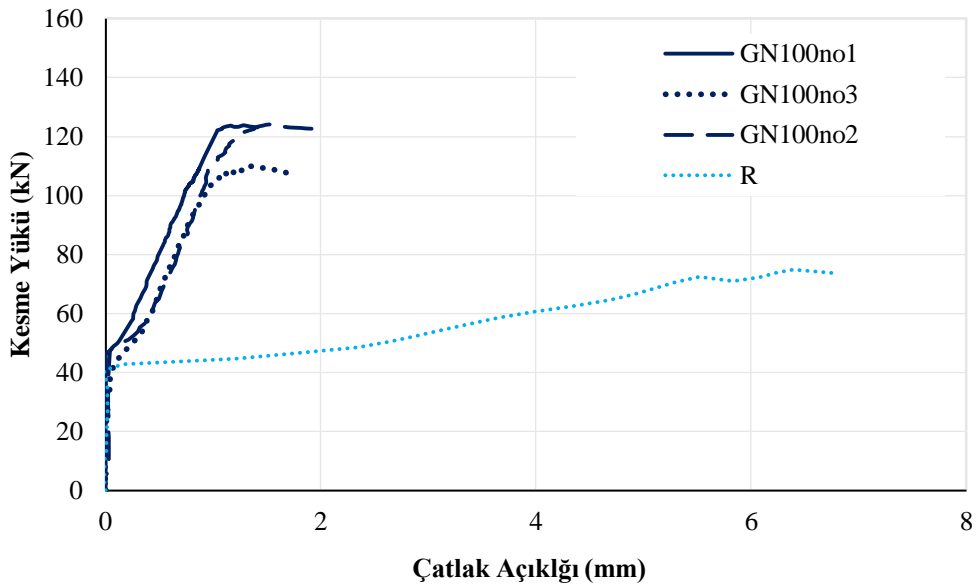
Kiriş numunelerin kesme yükü ile çatlak açıklığı ve deplasman (Sehim) grafikleri çizilmiştir. GN100 kirişlerin kesme davranışı incelendiğinde, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. GN100 kiriş



numuneleri maksimum kesme dayanımına kadar birbirine oldukça yakın davranış göstermişlerdir. Kesme yükü-çatlak açıklığı grafiğinden yaklaşık 47 kN kesme yüküne kadar sadece kılcal çatlak oluştuğu ve bu yükten sonra çatlaklar genişliği daha hızlı artmaya başladığı ve kirişler maks. kesme yüküne doğru orantılı bir davranış göstermiştir. GN100 kirişler kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın değişmeye başladığı ve nihai dayanımdan sonra kirişler yük taşıma gücünü ani olarak kaybetmiştir (Şekil 4.8. ve Şekil 4.9).

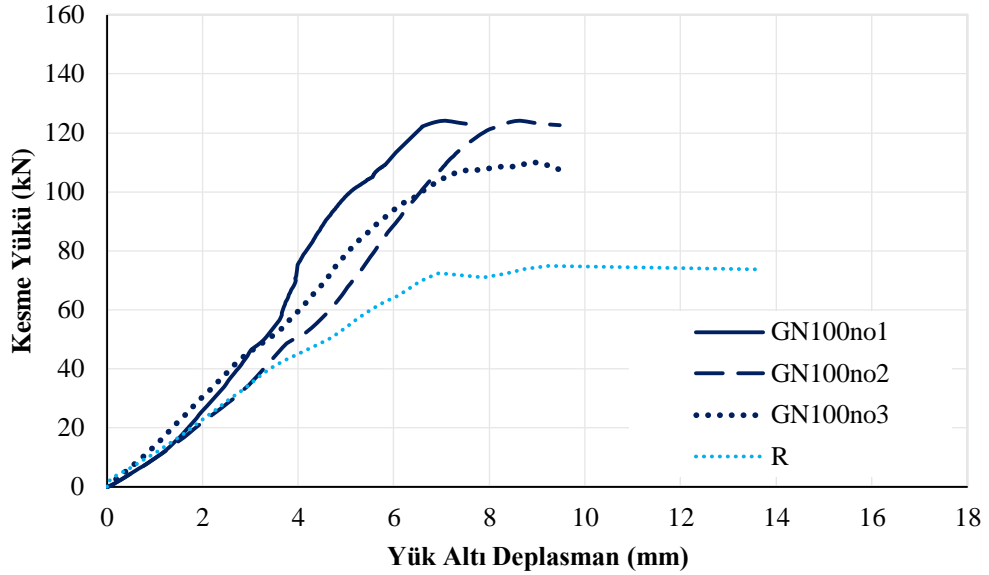


Şekil 4.8. GN100 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği



Şekil 4.9. GN100 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği

Kesme yükü-yük altı deplasman grafiği incelendiğinde referans kirişlere göre GN100 kiriş numunelerinin eğilme rejitliklerinde artış görülmektedir. Kirişlerin kesme yükü deplasman grafikleri incelendiğinde kirişler orantılı bir davranış göstermiş ve kirişler kesme dayanımına yaklaştığında bu davranış bozulmaya başlamıştır (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. GN100 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği

### 4.3. GN75 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

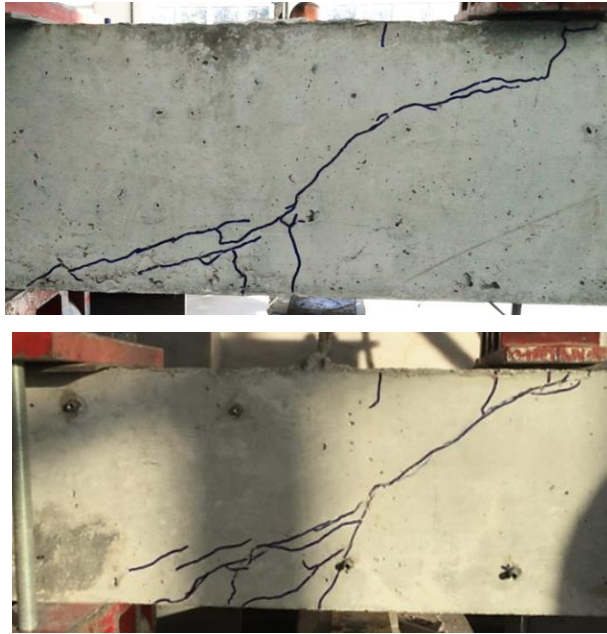
Üç adet nervürlü GFRP etriye 75 mm aralıkla kiriş numunesi eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.11.).



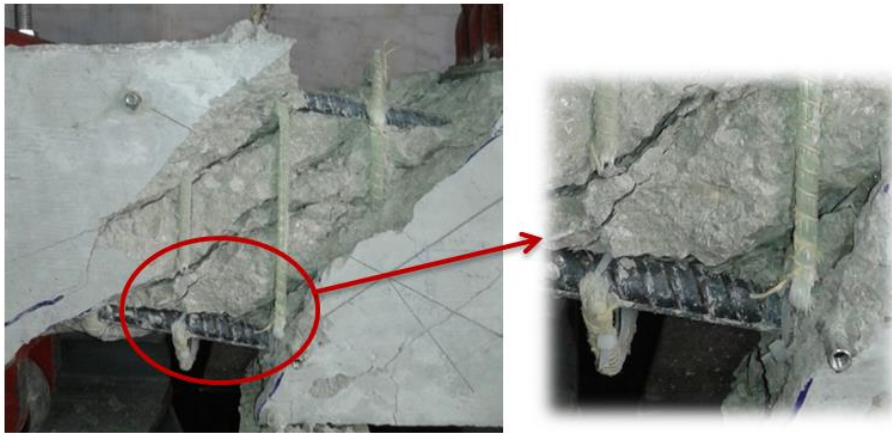
Şekil 4.11. GN75 kiriş dört nokta eğilme deneyinde test edilmesi

Deneylerde kiriş numuneleri kırılmasına kadar yükü sıfırdan başlayıp sabit hızda artırılmıştır. İlk çatlaklar kirişin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine

uygulanan yükleme işlemine devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Deney kirişlerin hepsinde kesme yenilmesi gerçekleşmiştir. 1. Ve 3. nolu GN75 deney kirişin etriyelerin alt köşelerinden kopma yenilmesi meydana gelmektedir. İkinci kiriş numunesi (GN75 No.2) keme yükü karşılarken GFRP etriyelerin bindirmesinden açılması olduğu ile ani ve gevrek yenilme meydana gelmiştir (Şekil 4.12.a. ve Şekil 4.12.b.). Bunun nedeni beton basınç bölgesinde kırılma meydana geldiğinde nervürlü GFRP etriyelerin birleşim bölgelerinden ayrılmasıdır (Şekil 4.12.c.).



(a) GN75 No.1 numunesi deney esnasında kılcal kesme çatlağın yayılımı



(b) GN75 No.1 numunesindeki GFRP etriyelerin alt kösesinden kopması ve detayı



(c) GN75 No.2 numunesinde etriyelerin üstten açılması

Şekil 4.12. (a) Kılcal çatlak oluşumu, (b ve c) Etriyelerin kırılma durumları

Maks. kesme yüküne karşılık gelen ortalama çatlak, deplasman ve çatlak açısı değerleri elde edilmiş olup Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

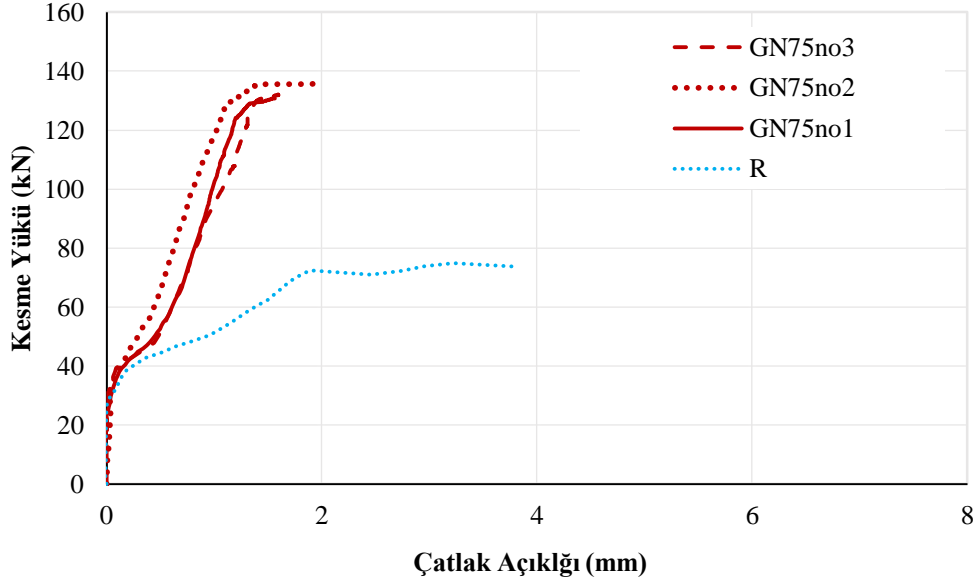
Tablo 4.3. GN75 kirişlerin mekanik özellikleri

Numune	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ PM2 (mm)	$R_t$ PM1 (mm)	$\beta$ (derece )	$\Delta$ (mm)	$\alpha$ (derece )
GN75 (1)	130,70	1,87	1,53	34,18	9,77	27,01
GN75 (2)	135,72	2,61	1,95	30,40	8,78	30,79
GN75 (3)	132,12	1,31	1,59	-	9,05	-
<b>Ortalama</b>	<b>132,85</b>	<b>1,93</b>	<b>1,69</b>	<b>32,29</b>	<b>9,20</b>	<b>28,90</b>

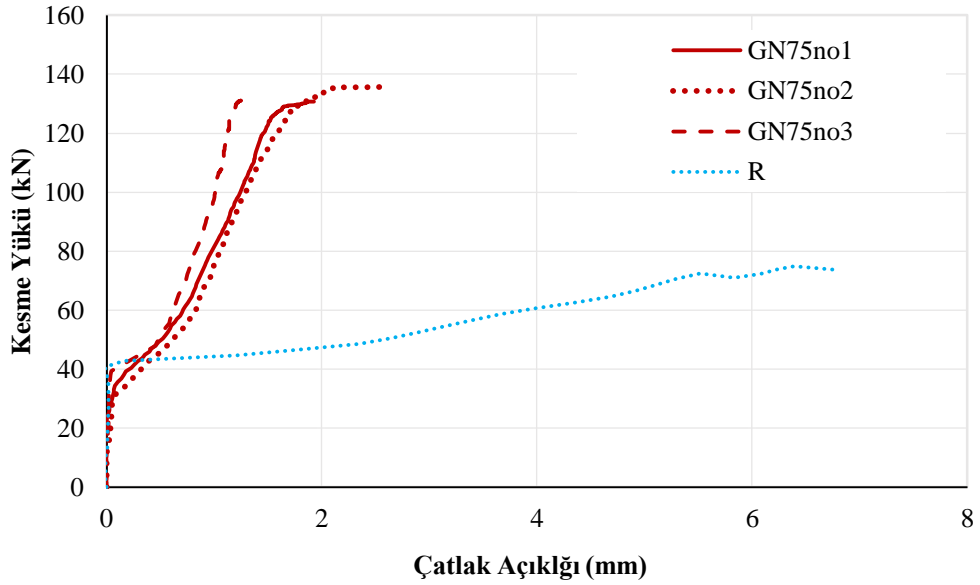
GN75 kirişlerinde maksimum kesme yüklerinin ortalaması 132,85 kN ve referans kiriş dayanımından %73,8 artış tespit edilmiştir. PM2 ve PM1'nin kapsadığı bölgelerde sırasıyla 1,93 ve 1,69 mm ortalama çatlak açıklığı bulunmuştur. Zayıf kesme dayanımı bölgesindeki (A tarafı) hareketli mesnete yakın uygulanan P/2 tekil yükün hemen altında oluşan ortalama net deplasman 9,20 mm alınmıştır. Nihai kesme yüküne eriştikten sonra kirişler yük taşıma gücünü kaybetmiş ve kirişler ani kesme kırılmasıyla göçmüştür.

Kesme yükü-çatlak açıklığı grafiğinden kirişler yaklaşık 35 kN'a kadar kılcal çatlaklar düzeyinden sonra orantılı bir davranış göstermekte ve kiriş maks. kesme

dayanımına yaklaştığında bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kiriş yenilmeye başlamıştır (Şekil 4.13., Şekil 4.14.).



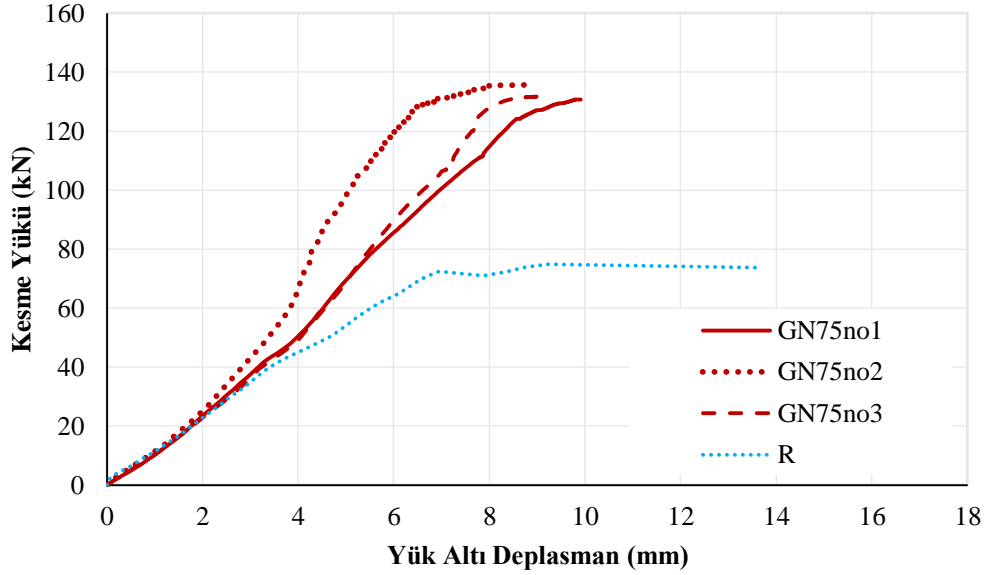
Şekil 4.13. GN75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği



Şekil 4.14. GN75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği

Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, 1. Ve 3. nolu GN75 kiriş numuneleri nihai kesme dayanımına kadar birbirine oldukça yakın davranış

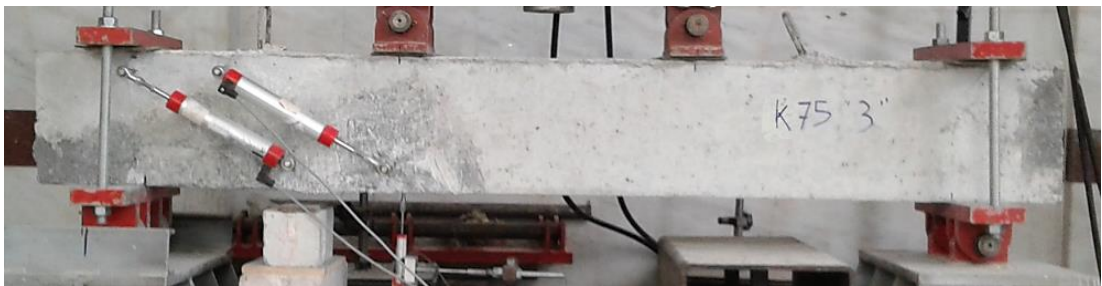
göstermişler ve 2. Nolu GN75 kiriş numunesi diğer iki kirişe göre daha rijid bir davranış göstermiştir. Genel olarak referans kirişlere göre GN75 kiriş numune grubu eğilme rejitliklerinde artışı tespit edilmiştir (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. GN75 kirişlerinde kesme yükü-deplasman grafiği

#### 4.4. GK75 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deney Sonuçları

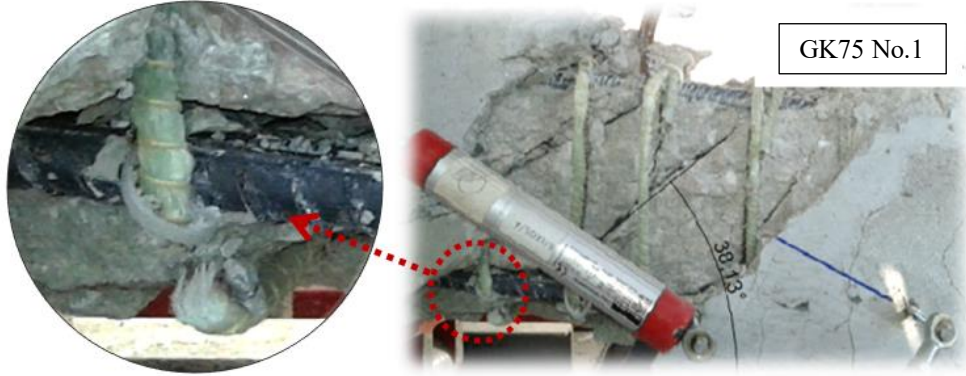
Üç adet nervürlü-kumlu GFRP etriye 75 mm aralıkla kiriş numunesi hazırlanmış ve eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. K75 kiriş dört nokta eğilme deneyine hazırlanması

Deneylerde kiriş numuneleri kırılmasına kadar yükü sıfırdan başlayıp sabit bir hızda artılmıştır. Deney kirişlerin birincisinde maksimum kesme yüküne vardığında bir nervürlü-kumlu GFRP etriyenin alt köşesinde kopma medana gelip etriyelerin dış

kum tabakası kırılan beton ile ayrılıp ani göçme gözlenmiştir. İkinci ve üçüncü kiriş numunesi kılcal kesme çatlağından sonra ve hareketli mesnete yakın alt bölgesinde beton paspayı ayrılıp düşmüş ve kirişin eksenine dik olacak şekilde çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 4.17.). İkinci deney kiriş numunesinin değerleri hatalı olduğundan dolayı Tablo 4.4.'tan silinmiştir.

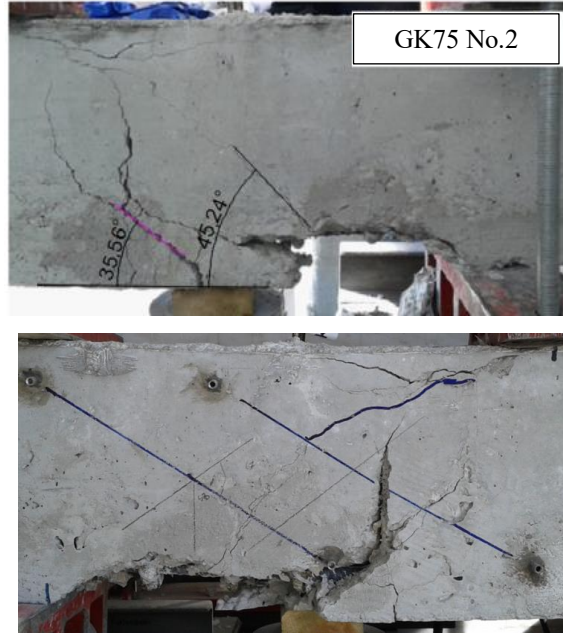


(b) GK75 No.1 numunesindeki GFRP etriyelerin alt kösesinden kopması ve detayı

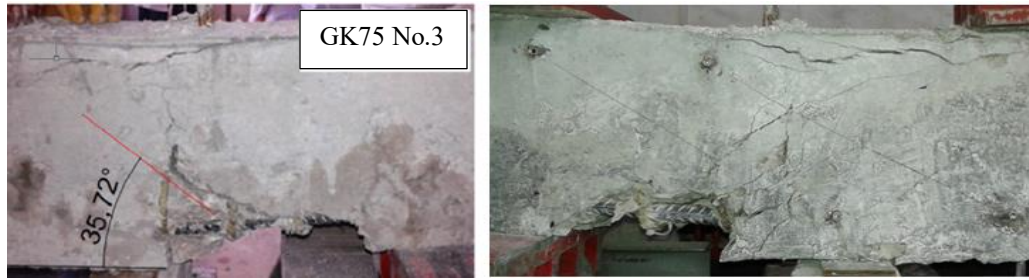


(b) GK75 No.1 numunesinde kum tabakası beton ile ayrılması





(c) GK75 No.2 kiriş numunesinin kırılma şekli



(d) GK75 No.3 kiriş numunesinin kırılma şekli

Şekil 4.17. Nervürlü-kumlu kırılma şekilleri ve kesme çatlak açısı hesabı

Maks. kesme yüküne karşılık gelen ortalama çatlak, deplasman ve çatlak açısı değerleri elde edilmiş olup Tablo 4.4.'te sunulmuştur.

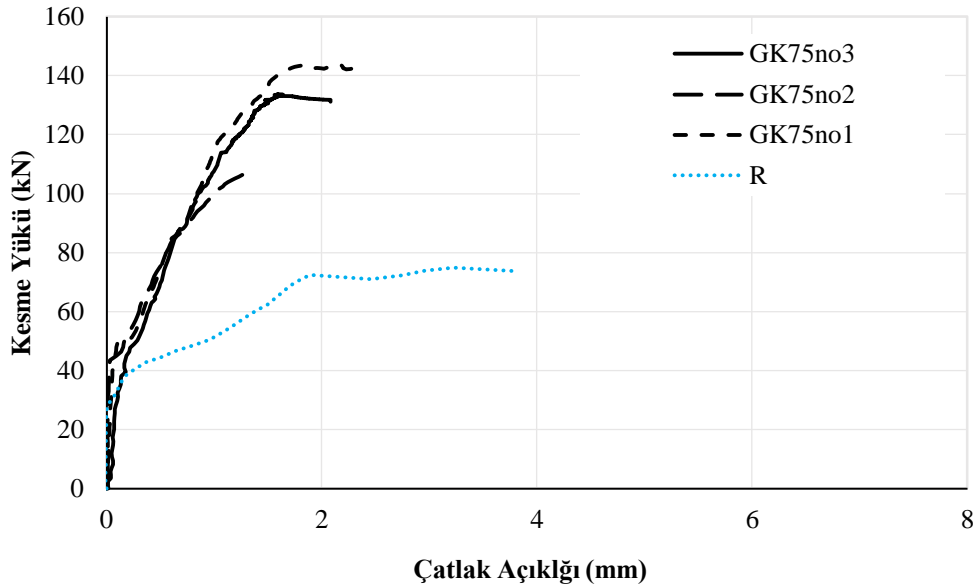
Tablo 4.4. GK75 kirişlerin mekanik özellikleri

Numune	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ PM2 (mm)	$R_t$ PM1 (mm)	$\beta$ (derece )	$\Delta$ (mm)	$\alpha$ (derece )
GK75 (1)	143,60	2,35	2,17	38,13	14,26	23,06
GK75 (3)	133,73	1,47	1,84	35,72	10,02	25,47
<b>Ortalama</b>	<b>138,67</b>	<b>1,91</b>	<b>2,01</b>	<b>36,93</b>	<b>12,14</b>	<b>24,27</b>

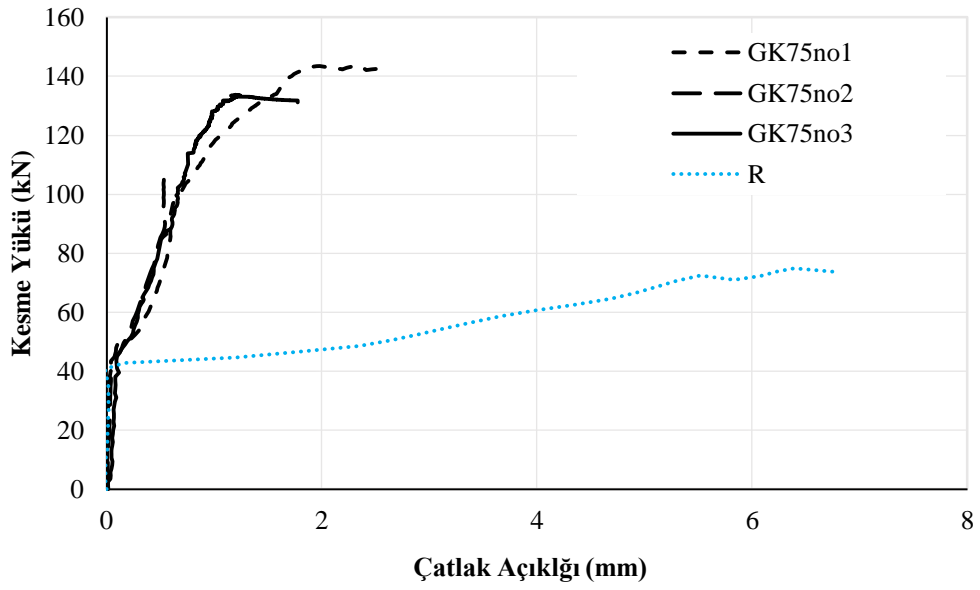


GK75 kirişlerin mekanik özellikleri incelendiğinde (Tablo 4.4.) maksimum kesme yüklerinin ortalaması 138,67 kN ve referans kirişlere göre kesme dayanımları %81,4 oranında artmıştır. PM2 ve PM1 'nin kapsadığı bölgelerde sırasıyla 1,91 ve 2,01 mm ortalama çatlak açıklığı bulunmuştur. Zayıf kesme dayanımı bölgesindeki (A tarafı) hareketli mesnete yakın uygulanan P/2 tekil yükün hemen altında oluşan ortalama deplasman 12,14 mm bulunmuştur.

GK75 kirişlerin kesme davranışı incelendiğinde, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe yük, deplasman ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Kesme yükü-çatlak açıklığı grafiğinden yaklaşık 42 kN kesme yüküne kadar sadece kılcal çatlak oluştuğu ve bu yükten sonra çatlaklar genişliği daha hızlı artmaya başladığı ve kirişler maks. kesme yüküne doğru orantılı bir davranış göstermiştir. GK75 kirişler kesme dayanımına yaklaştığında bu davranışın değişmeye başladığı ve maksimum kesme dayanımdan sonra kirişler yük taşıma gücünü kaybetmiştir. Maks. kesme dayanımlar farklılık oluştursa da maks. dayanımına kadar kirişler birbirine yakın bir davranış göstermiştir (Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.).

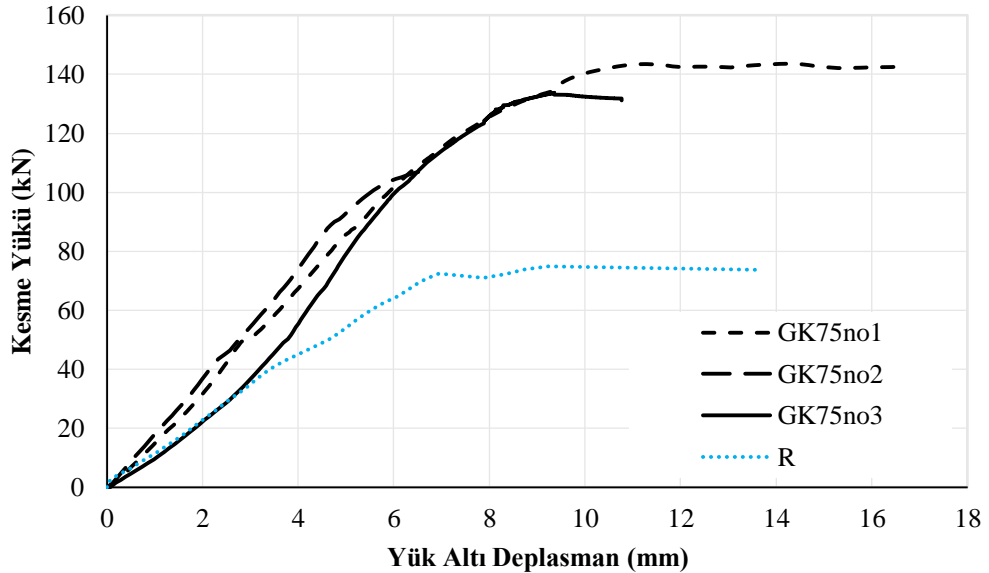


Şekil 4.18. Gk75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği



Şekil 4.19. Gk75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği

Kesme yükü-yük altı deplasman grafiği incelendiğinde referans kirişlere göre GK75 kiriş numunelerinin eğilme rejitliklerinde artış görülmektedir. Kesme yükü ile oluştuğu deplasman arasında orantılı bir davranış göstermiş ve kirişlerin kesme dayanımına yaklaştığında bu davranış bozulmaya başlamıştır (Şekil 4.20.).



Şekil 4.20. GK75 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği

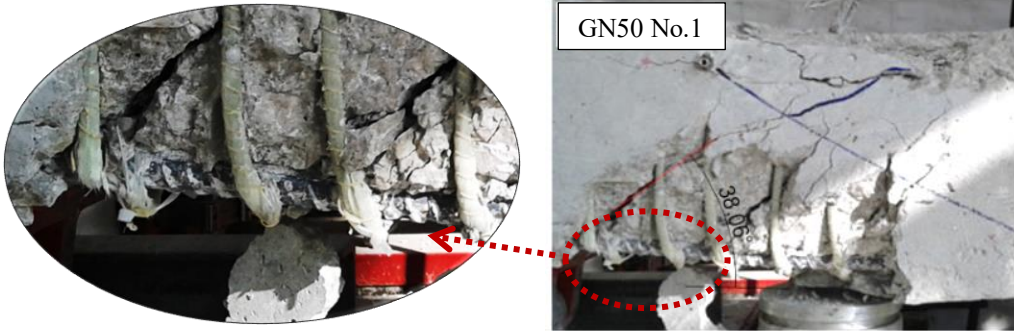
#### 4.5. GN50 Kiriş Numunelerinin Eğilme Deneyi Sonuçları

Üç adet GN50 kiriş numunesi hazırlanmış ve eğilme deneyinde test edilmiştir (Şekil 4.21.).



Şekil 4.21. GN50 kirişin test kesme bölgesi (A tarafı)

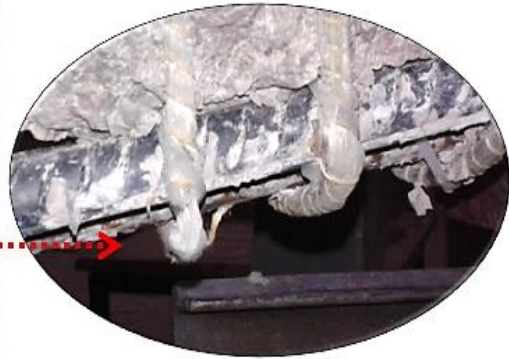
Deney kirişleri göçme oluşmasına kadar yükleme devam edilmiştir. Deney esnasında 50 mm aralıklarla olan nervürlü etriyeli kirişlerin paspayında ve çekme donatılarında kendini çevreleyen betonda boşluklar bulunması sebebiyle çelik donatısı sıyrılmış ve deney sonuçlarına önemli ölçüde olumsuz etkisi olmuştur. Çelik çekme donatısı kiriş betondan sıyrılrken GFRP etriyeleri de koparmıştır (Şekil 4.22.).



(a) GN50 No.1 kiriş numunesi yenilme şekli ve detayı



(b) GN50 no.2 kiriş numunesi yenilme şekli ve detayı



(c) GN50 no.3 kiriş numunesi yenilme şekli ve detayı

Şekil 4.22. GN50 kiriş numunelerin göçmesinde çekme donatılarının betondan sıyrılması ve GFRP etriyelere hasar edilmesi

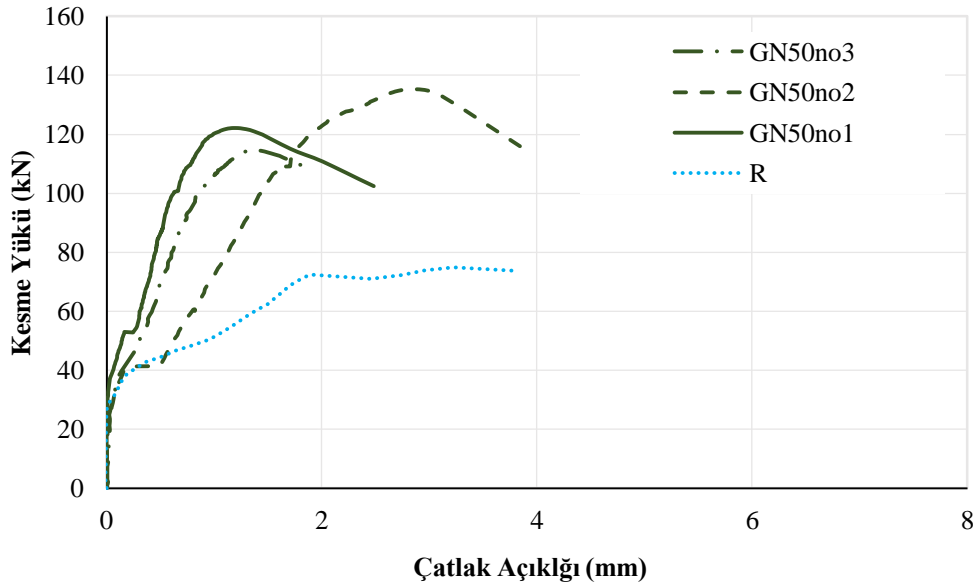
Maks. kesme yüküne karşılık gelen ortalama çatlak, deplasman ve çatlak açısı değerleri elde edilmiş olup Tablo 4.5.'te sunulmuştur.

Tablo 4.5. GN50 kirişlerin mekanik özellikleri

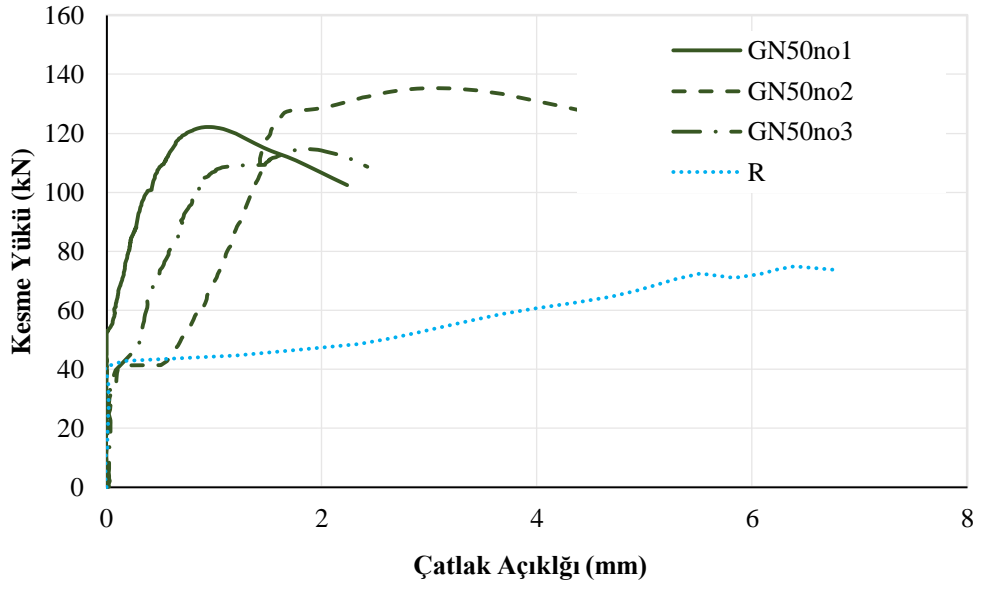
Numune	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ PM2 (mm)	$R_t$ PM1 (mm)	$\beta$ (derece)	$\Delta$ (mm)	$\alpha$ (derece)
GN50 (1)	122,13	0,94	1,18	38,06	7,25	23,13
GN50 (2)	135,29	3,00	2,83	38,69	-	22,50
GN50 (3)	114,83	1,84	1,37	37,02	9,39	24,17
<b>Ortalama</b>	<b>124,08</b>	<b>1,93</b>	<b>1,79</b>	<b>38,92</b>	<b>8,32</b>	<b>23,27</b>

GN50 kirişlerinin maks. kesme dayanımı ortalaması 124,08 kN ve referans kirişlerinkinden % 62,3 daha yüksek çıkmıştır. GN50 kirişlerinde PM2 ve PM1'nin kapsadığı bölgelerde sırasıyla kesme dayanımlarına karşılık gelen çatlak açıklığı 1,97 ve 2,01 mm oluşmuştur. Zayıf kesme dayanımı bölgesindeki (A tarafı) hareketli mesnete yakın uygulanan P/2 tekil yükün hemen altında oluşan ortalama net deplasman 8,32 mm olmuştur. Çekme donatısı sıyrıldıktan sonra kirişler yük taşıma gücünü kaybetmiştir ve GFRP alt köşeleri yırtılmasıyla deney sona erdirilmiştir.

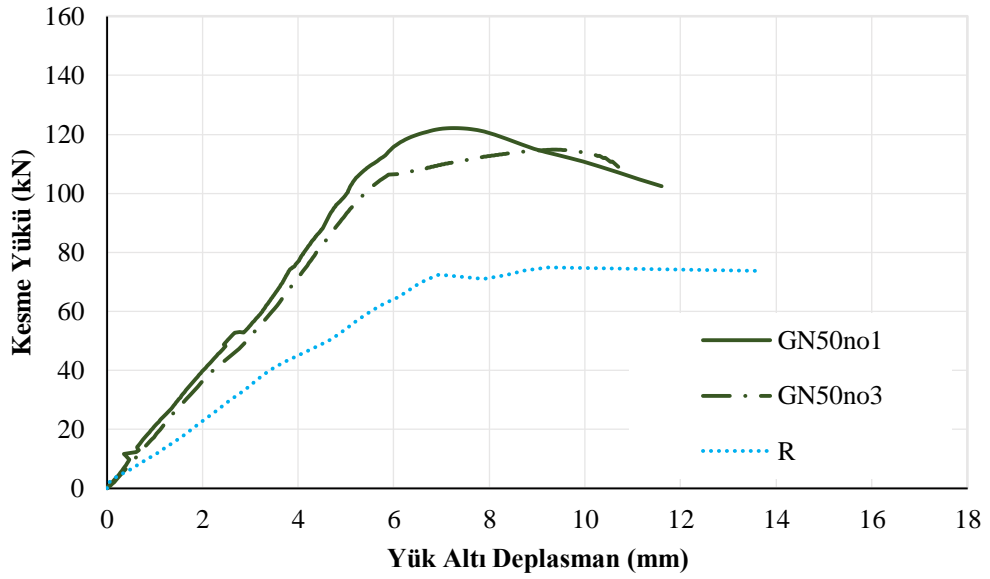
GN50 kirişleri çekme donatısı sıyrılmasından dolayı farklı kesme davranışları göstermişlerdir. GN50 kirişleri GN100 kirişlerine benzer kesme dayanımı göstermiştir (Şekil 4.23., Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.).



Şekil 4.23. GN75 kirişlerin PM1 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği



Şekil 4.24. GN75 kirişlerin PM2 ile kesme yükü-çatlak açıklığı grafiği



Şekil 4.25. GN50 kirişlerde kesme yükü-deplasman grafiği

#### 4.6. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

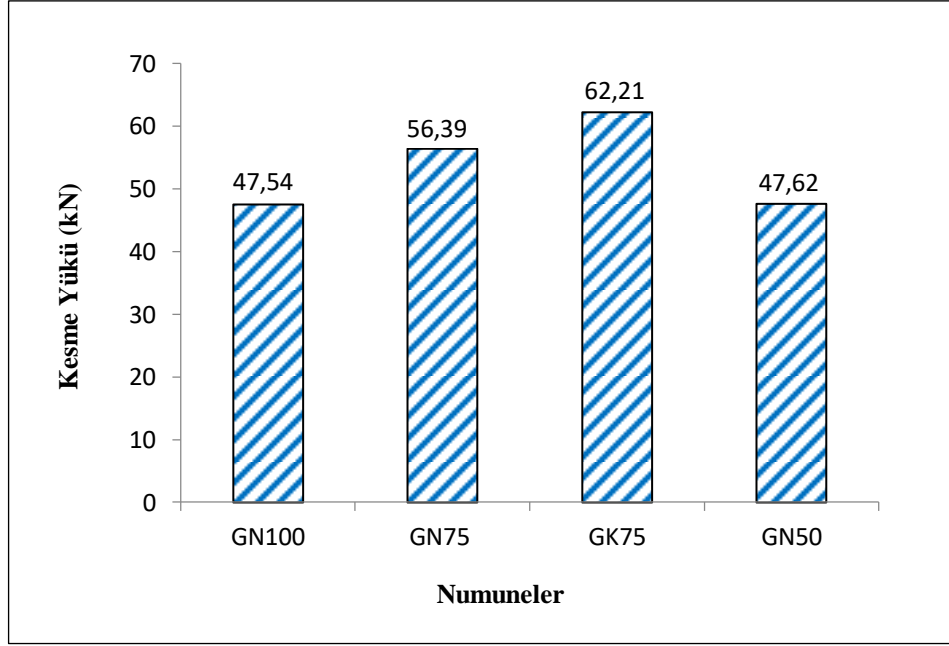
GFRP grublara ait ortalama kesme yükü, çatlak açıklığı ve yükleme altı deplasmanı sonuçları bulunarak Tablo 4.6.'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Deney kiriş numuneleri karşılaştırılması

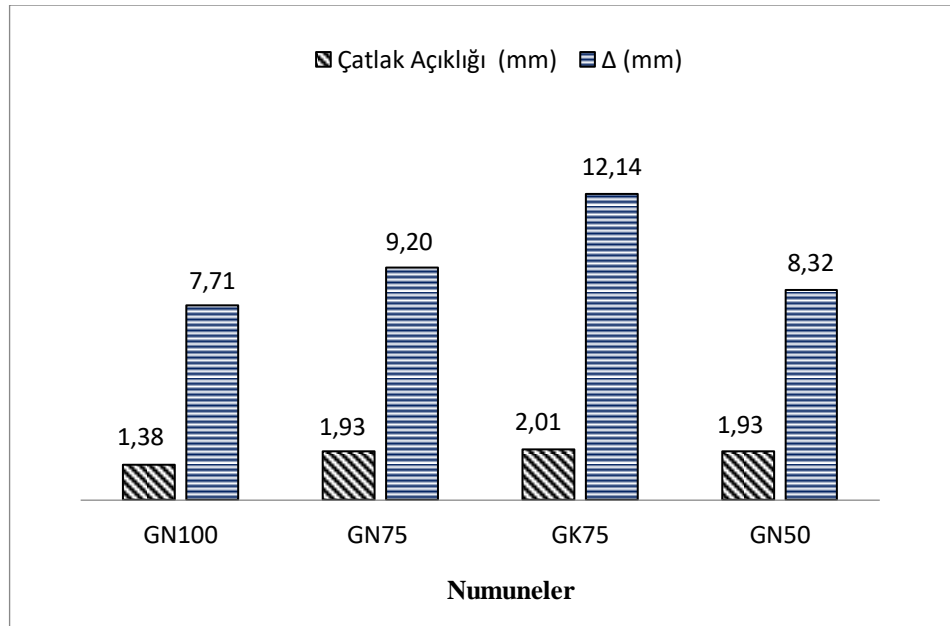
Kiriş Simgesi	$E_f/E_s$ %	Aralık (mm)	$\rho_v$ %	Kırılma Biçimi	$V_{exp}$ (kN)	$R_t$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\beta$ (derece)
R	-	-	-	E_K	76,46	2,88	8,51	45,79
GN100	24,3	100	0,67	K_K	124,00	1,38	7,71	36,90
GN75	24,3	75	0,89	K_K	132,85	1,93	9,20	32,29
GK75	24,3	75	0,89	K_K	138,67	2,01	12,14	36,93
GN50	24,3	50	1,34	K_K	124,08	1,93	8,32	37,92

$E_f$ : GFRP'nin elastisite modülü,  $E_s$ : Çelik elastisite modülü,  $\rho_v$ : kesme donatı oranı, E\_K: Eğik kesme yenilmesi, K\_K: GFRP etriyelerini koparak kesme yenilmesi,  $R_t$ : Gerçek çatlak açıklığı,  $\beta$ : Çatlak açısı ve  $\Delta$ : Maksimum yükün altındaki deplasmanı ifade eder.

GFRP etriyeli deney kirişleri tasarlandığı gibi kesme kırılmasıyla yenilmiştir. Referans kirişlerine göre GFRP etriyeli kirişlerin dayanımlarındaki artış GN100, GN75, GK75 ve GN50 kirişlerinde sırasıyla %62,2, %73,8, %81,4 ve %62,3 oranlarında olmuştur. GFRP etriyeli kirişlerde kesme çatlaklar genişliği referans kirişe göre azalmıştır. Kesme çatlak açısı  $10^\circ$  civarında da azalmıştır. GFRP etriyeli kirişler arasında en büyük kesme kuvveti, en büyük sehim ve çatlak genişliği GK75 kirişinde oluşmuştur. Kumlu-nervülü yüzeli etriyelerin olumlu etkisinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. GFRP etriyeli kirişler arasında en düşük kesme kuvveti, en az deplasman ve kesme çatlak genişliği GN100 kirişlerde gözlenmiştir (Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.). Donatı adım mesafesi kısaldıkça ve donatı yüzey aderans özelliği iyileştikçe kesme çatlak artmasına rağmen kesme dayanımında iyileşme olmuştur. Ayrıca bu özellikler kiriş deplasman değeri da artırmıştır.



Şekil 4.26. GFRP etriyenin deneysel ortalama kesme dayanımı

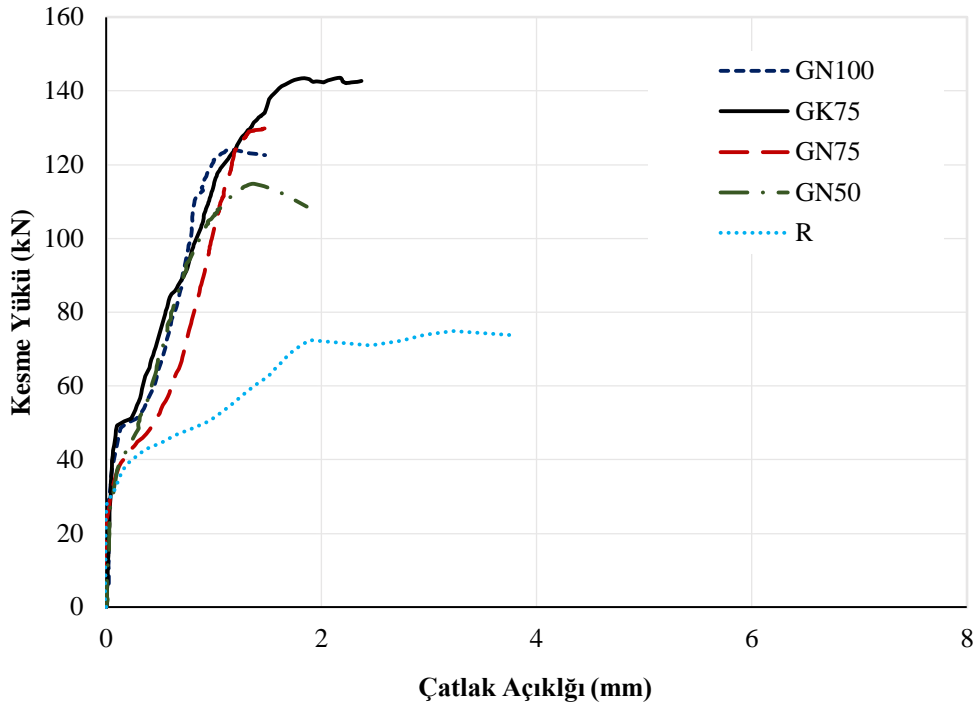


Şekil 4.27. GFRP etriyeli kiriş numunelerine ait ortalama çatlak açıklığı ve deplasman değerleri

Kirişlerin kesme yükü-çatlak açıklığı davranışları incelendiğinde, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe kesme yükü ve oluşan çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Birinci çatlak ölçen PM1 cetveli verilerinden elde edilen grafik incelendiğinde deney kirişlerde yaklaşık 35-45 kN kesme yükü aralığında ilk beton kesme çatlakları 0,1 mm

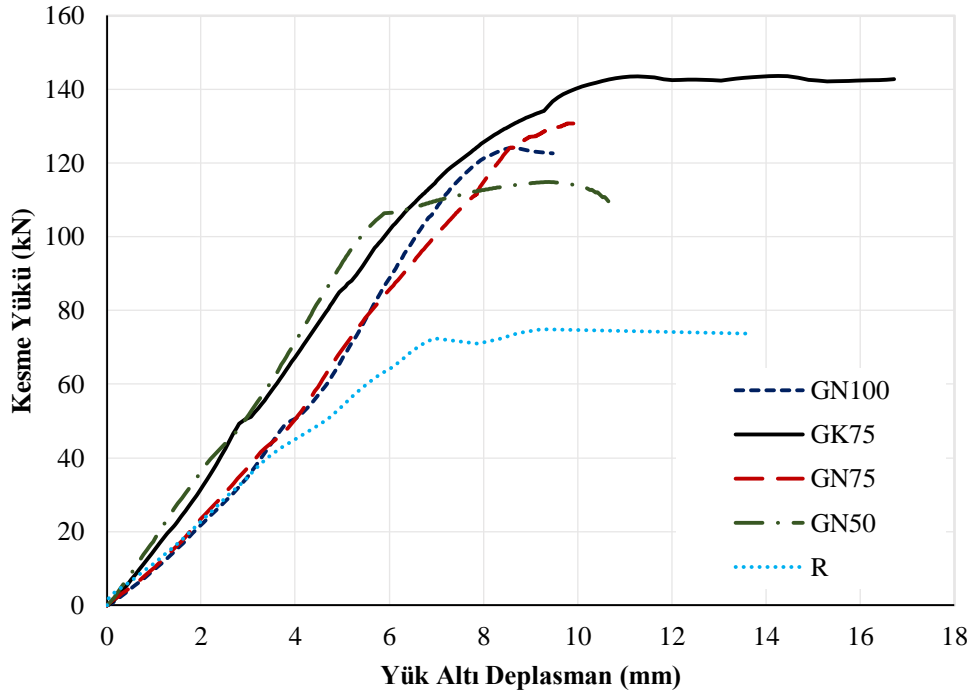


genişliğinde oluşmuştur. Bu çatlak takiben yeni bir kesme yükü-çatlak açıklığı orantısı oluşarak kiriş maksimum kesme dayanımına yaklaştığında bu orantısı bozulmaya başlamıştır. Kirişler nihai kesme dayanıma eriştikten sonra yük taşıma gücünü kaybetmesiyle göçmüştür (Şekil 4.28.).



Şekil 4.28. PM1 bölgesinde deney kiriş numunelerinin kesme-çatlak genişliği davranışları karşılaştırılması

Kirişler kendi içerisinde benzer davranış göstermiş ama kirişlerle diğer kiriş gruplarına göre davranış farklılıkları oluşmuştur. Etriye adım mesafesinin azalması ve etriye yüzeyinin iyileşmesi kirişlerin eğilme rijitliğine olumlu katkı sağlamıştır. Kirişler nihai kesme dayanımlarına eriştiklerinde ani olarak, GK75 kiriş numunesi sabit kesme yükünde bir miktar daha deformasyon yaparak göçmüştür. Beton döküm esnasında GN50 kiriş numunelerine gerekli özen gösterilmesine rağmen kesme bölgesi ve kiriş alt bölgesine beton yerleşmemesinden kaynaklı imalat hatası oluşmuş ve bu da deney sonuçlarına yansımıştır. GN50 kiriş numuneleri diğer kiriş numuneleri ile kıyaslandığında farklı davranış sergilemiş ve düşük kesme dayanımı göstermiştir (Şekil 4.29.).



Şekil 4.29. Deney kiriş numuneleri deplasman açısında karşılaştırılması

#### 4.7. Deneysel Sonuçların Teorik Hesap Sonuçları ile Karşılaştırılması

FRP etriyelerin betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini tahmin etmek üzere önerilen birçok yaklaşım ve yönetmelik bulunmaktadır. Deney kirişlerin etriyesinden gelen net kesme dayanımı yönetmeliklerde ve bazı araştırma tezlerinde önerilen denklemler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan yönetmelikler ve bazı araştırmacıların önerdiği tahmin denklemleri 2.bölüm kalem 2.3.'te açıklanmıştır. GFRP etriyeli kirişlerin kesme dayanımlarından kontrol kirişlerinin kesme dayanımı çıkarılarak GFRP etriyelerin kesmeye katkısı bulunmuştur. Elde edilen deney sonuçları ve teorik sonuçlar Tablo 4.7.'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Deney sonuçlarının yönetmelik teorik hesaplar ile karşılaştırmaları

Numune Simgesi	Etriye Oranı	Etriyenin Kesme Katkısı	ACI 440.1R-15		CAN/CSA S806-12		ISIS-M03-07		Kara denklemi <sup>(1)</sup>		Lignola denklemi <sup>(2)</sup>	
			$V_{sf,deney}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)	$V_{sf,deney}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)	$V_{sf,deney}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)	$V_{sf,deney}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)	$V_{hesap}$ (kN)
GN100	0,67	47,54	43,10	1,10	44,43	1,07	42,05	1,13	43,54	1,09	38,42	1,24
GN75	0,89	56,39	57,47	0,98	59,24	0,95	56,07	1,01	50,27	1,12	51,23	1,10
GK75	0,89	62,21	57,47	1,08	59,24	1,05	56,07	1,11	50,27	1,24	51,23	1,21

<sup>(1)</sup> 206 adet deney sonucu göz önünde bulundurularak FRP donatıları olan kirişlerin etriye kesme dayanımına olan katkısı için önerilen denklem (Kara ve ark., 2016). <sup>(2)</sup> Kendi çalışmasının sonucu, Eurocode tasarım denklemleri kafes sistemine dayanılıp deneysel verilerle kalibre edilmiştir (Lignola ve ark., 2014).

Kirişlerde kullanılan GFRP etriyenin kesme dayanımına katkısı çalışmada kullanılan tüm yönetmeliklerde yakın tahmin edilmiştir. En yakın tahmini CAN/CSA S806-12 yönetmeliği yapmıştır. CAN/CSA S806-12 yönetmeliği GN100, GN75 ve GK75 kirişlerinde sırasıyla %93, %95 ve %95 oranlarında deney sonuçlarını doğrulamaktadır. GFRP etriyeli kirişlerinin sonuçları Kara ve arkadaşlarının önermiş oldu denklem ile %88-90 oranında tahmin edilmekte ve GK75 kirişlerde bu oran azalarak tahminden uzaklaşmıştır. Lognola ve arkadaşlarının önermiş olduğu denklemde ise %10 yakınlıkla en iyi tahmin GN75 kirişlerinde elde edilmiş diğer kirişlerde deney sonuçlarından uzaklaşmıştır.

## BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye’de pultrüzyon yöntemi kullanılarak üretilen nervürlü yüzey özelliğine sahip GFRP donatıların betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı araştırılmış ve GFRP etriyeli betonarme kirişler üretilerek kirişlerin kesme davranışları incelenmiştir. Kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme ile dört nokta eğilme deneyinde test edilmiştir. GFRP kiriş numunelerin ortalama kesme dayanımları, sehim kapasiteleri, kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları literatürde yaygın olarak kullanılan GFRP etriyeli kirişlerin hesaplanmasında kullanılan yönetmelik ve bazı araştırmacıların önerdiği denklemler ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. Deneysel çalışma bulgularına göre, GFRP etriyeli deney kirişleri tasarlandığı gibi kesme kırılmasıyla yenilmiştir. GFRP etriyeler kirişlerin kesme dayanımını artırmıştır. Referans kirişlere göre 100, 75 ve 50 mm aralıklı GFRP nervürlü etriyeli kirişlerde (GN100, GN75 ve GN50) kesme dayanımı sırasıyla %62,2, %73,8 ve %62,3 artmıştır.
2. Nervürlü yüzey özelliğine sahip GFRP etriyelerin yüzeylerine kumlama yapıldığında kirişlerin kesme dayanımında %10 civarında, beton-donatı arasındaki aderansta ve kiriş davranışında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.
3. GK75 kirişlerde görülen ani kırılma sonrasında nervürlü-kumlu etriyelerde kum tabakasının etriyeden sıyrılarak beton tabakası üzerinde kaldığı görülmüştür. Buradan kumlu yüzey beton ile daha iyi aderans sağladığını anlaşılmaktadır.

4. Donatı adım mesafesinin azalması, donatı yüzey aderans özelliğinin iyileşmesi kesme dayanımını artırmaktadır. Ayrıca GFRP etriyeler kirişlerin kesme çatlaklarının büyümesini sınırlamıştır.
5. Kiriş numunelerinde GFRP etriyeler alt bükülme bölgesinden kırılmış ve kancalarından sıyrılmamıştır. GFRP etriyenin bükülen köselerin en içteki cam elyafın büküm sürecinde düzgünlüğünü kaybedip katlanmış haline gelmesi nedeniyle bu bölgedeki GFRP donatının kesmeye karşı dayanımı azalmıştır.
6. Kirişlerde kullanılan GFRP etriyenin kesme dayanımına katkısı çalışmada kullanılan tüm yönetmeliklerde yakın tahmin edilmiştir. Yönetmelikler ve son yıllarda araştırmacılar tarafından önerilen kesme teorik hesap sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen GFRP etriyeli kirişlerin kesme dayanımlarının karşılaştırmalı analizlerine göre "Canadian Standards Association CAN/CSA S806-12" yönetmelik tarafından önerilen denklemlerin en uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. CAN/CSA S806-12 yönetmeliği GN100, GN75 ve GK75 kirişlerinde sırasıyla %93, %95 ve %95 oranlarında deney sonuçlarını doğrulamaktadır.
7. GFRP etriyeli kirişlerinin sonuçları Kara ve arkadaşlarının önermiş oldu denklem ile %88-90 oranında tahmin edilmekte ve GK75 kirişlerde bu oran azalarak tahminden uzaklaşmıştır.
8. Yönetmeliklerde FRP teorik kesme dayanım hesap denklemlerinde FRP'nin donatının yüzey özellikleri hesaplamaya dahil edilmediği, yüzey özellik etkisinin denklemlere dahil edilmesi kesme dayanımı hesabında daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.
9. Çelik donatının korozyona uğrama ihtimalinin yüksek olduğu yerlerde GFRP etriyeli betonarme elemanların kullanımı avantaj sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- ACI Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-06. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006. p. 41.
- Ahmed, E., El-Salakawy, E., ve Benmokrane, B., 2010. Shear Performance of RC Bridge Girders Reinforced with Carbon FRP Stirrups. *J. Bridge Eng.*, 15(1), 44-54.
- Ali, A., Mohammed, H. ve Benmokrane, B., 2013. Shear Strength Behaviour of Full-Scale Circular Reinforced Concrete Piles with FRP Bars. CSCE 2013, the 3rd International Engineering Mechanics and Materials Conference, CSCE Annual Conference, Montreal, June 29th to 1st, Canada.
- Alkhrdaji, T., Wideman, M., Belarbi, A., and Nanni, A., 2001. Shear Strength of GFRP RC Beams and Slabs. *Proceedings of the Int. Conf. Composites in Construction-CCC 2001*, Porto/Portugal, pp. 409-414.
- ASCE-ACI Committee 426., 1973. The Shear Strength of Reinforced Concrete Members. *ASCE Proceedings*, Vol. 99, ST6, 1091-1187.
- Bakis, C. E., 1993. FRP composites: Materials and manufacturing. In *fibre-reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: Properties and applications*. *Developments in civil engineering*, ed. A. Nanni, 42, 13-58. Amsterdam Elsevier
- Bank, L. C., 1993. Properties of FRP reinforcement for concrete. In *fiber-reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: Properties and applications*. *Developments in civil engineering*, ed. A. Nanni, 42, 59-86. Amsterdam Elsevier
- Bank, L. C., 2006. *Composites for construction Structural design with FRIP materials* New York: John Wiley & Sons
- Canadian Standards Association (CSA). (2012). *Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers*. CAN/CSAS806-12, Rexdale, Ontario, Canada.
- Deak, T. ve Czigany, T., 2008. Investigation of basalt fibre reinforced polyamide composites. *Materials Science, Testing and Informatics IV (589)*: 7-12

- Di Ludovico, M., Prota, A. ve Manfredi, G., 2010. Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction* 14 (S): 541-552
- Doğangün, A. 2017. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. DBYBHY-2007 ve TS500-2000'e uygun, pp. 410–415.
- Doğan M., 2009. Betonarme Yapılardaki Deprem Hasarlarına Korozyonun Etkisi, *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt: 22, Sayı:1*, 147–168
- Duranovic, N., Pilakoutas, K., ve Waldron, P., 1997. Tests on Concrete Beams Reinforced with Glass Fibre Reinforced Plastic Bars. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, Vol.2, 479-486.
- EN 1992-1-1 Eurocode 2. Design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings; 2004
- Ersoy, U. ve Özcebe G., 2012. Betonarme. Evrim Yayınevi, İstanbul
- Foundation masters LLC., foundation and structure specialists, 2004. <http://commercial.foundationmasters.com/concrete-spalling/concrete-spalling-2/>, Erişim Tarihi: 14.04.2019
- Fukuyama, H., 1999. FRP composites in Japan. *Concrete International* 21 (10):29-32
- Günnur Yavuz, 2011. LİF TAKVİYELİ POLİMERLERİN BETONARME KİRİŞLERDE DONATI OLARAK KULLANIMI. *New World Sciences Academy*
- Guadagnini, M., Pilakoutas, K. Ve Waldron, P. 2006. Shear Resistance of FRP RC Beams. *Experimental Study*
- ISIS CANADA, Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, ISISM03-07, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Univ. of Winnipeg, Winnipeg, Man, Canada, 2007.
- Kara, İ. F., Cullazoğlu, F. ve Severcan, M. H. 2016. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Reinforced With Transverse and Longitudinal Frp Bars. 5(2), pp. 157–167
- Kaw, A. K., 2005. *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylot and Francis



- Lignola, G. P., Jalayer, F., Nardone, F., Prota, A. ve Manfredi, G. 2014. Composites : Part B Probabilistic design equations for the shear capacity of RC members with FRP internal shear reinforcement
- MacGregor, J. G., 1997. Reinforced Concrete: Mechanics and Design. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 799 p.
- Mallick, P. K., 1988. Fibre reinforced composites, materials, manufacturing, and design. New York: Marcell Dekker, Inc.
- Marco, F. ve Gallegos, C. 2014. Theoretical and experimental performance analysis of a cellular GFRP vehicular bridge deck, (June). doi: 10.13140/RG.2.1.1737.6887
- Mohammed, A. ve Ali, H. 2016. SHEAR STRENGTH AND BEHAVIOR OF CIRCULAR CONCRETE MEMBERS REINFORCED
- Nagasaka, T., Fukuyama, H. ve Tanigaki, M. 1993. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP sitrups. 1993, Detroit, Michigan
- Namita, 2018. Effects of Corrosion in Reinforcement, Signs & Preventive Measures. <https://civildigital.com/effects-corrosion-reinforcement-signs-preventive-measures/>, Erişim Tarihi: 08.04.2019
- Nanni, A., 1999. Composites: Coming on strong. Concrete Construction 44 (1): 120-124
- Nanni, A., De Luca, A. ve Zadeh, H. J., 2014. Reinforced concrete with FRP bars, Mechanics and design, international standard book no-13:978-0-415-77882-4
- Nanni, A., Rizkalla, S., Bakis, C. E., Conrad, J. O. ve Abdelrahman, A. A., 1998. Characterization of GFRP ribbed rod used for reinforced concrete construction. Proceedings of the International Composites Exhibition (ICE-98), Nashville, TN, pp. 16A/1-6
- Oller, E., Marí, A. ve Miguel, J. 2015. Shear design of reinforced concrete beams with FRP longitudinal and transverse reinforcement. 74, pp. 104–122. doi: 10.1016/j.compositesb, 2014.12.031
- Özşahin, B., Mülayim, A. ve Arkoç, O. 2015. the Use of Fiber Reinforced Polymers As the Reinforcement of Reinforced Concrete Structures
- Plecnik, J. ve Ahmad, S. H., 1988. Transfer of composite technology to design and construction of bridges. Final report to US DOT, contract no. DTRS 5683-C000043

- Razaqpur, A. G., Isgor, B.O., Greenaway, S. ve Selley, A., 2004. Concrete contribution to the shear resistance of fiber reinforced polymer reinforced concrete members. *Journal of Composite for Construction* 8(5)
- Razaqpur, A. G. ve Spadea, S. 2015. Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups. *Journal of Composites for Construction*.
- Sarıbıyık, M., Aydın, F. ve Sarıbıyık, A., 2018. Elyaf takviyeli kompozit çubukların betonda donatı olarak kullanımının araştırılması, PROJE NO: 0449.STZ.2013-2
- Shehata, E., Morphy, R. ve Rizkalla, S., 2000. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members. *Behaviour and design guidelines, Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27(5): 859-872
- Sim, J., Park, C. ve Moon, D. Y., 2005. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structure. *Composites: Part B* 36:504-512
- Taerwe, L. R. ve Matthys, S., 1999. FRP for concrete construction. *Concrete International* 21 (10):33-36
- Tamura, T., 1993. FiBRA. In fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete Concrete structures Properties and applications. *Developments in civil engineering*, ed. Nanni A., 42, 291-303. Amsterdam: Elsevier
- Vijay, P. V., Kumar, S. V., ve GangaRao, V. S., 1996. Shear and Ductility Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Re-bars. *Proceeding of the 2nd International Conference, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-11)*, Montreal, Editor: El-Badry, M.M., August 11-14, pp. 217-226
- Wang, M. C., Zhang, Z. G.ve ark., 2008. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 27 (4), 393-407
- Winter, G., ve Nilson, A., 1979. *Design of Concrete Structures*. 9th Edition, MacGraw-Hill Book Company, New York, 647p.
- Wu, W. P., 1990. Thermomechanical properties of fiber reinforced plastic (FRP) bars, PhD dissertation, West Virginia University, Morgantown, WV (1990)

## **ÖZGEÇMİŞ**

Muhammed Eymen Ahmad KADI, 02.01.1992'de Suriye'nin Halep şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Halep'te tamamladı. 2009 yılında Bassam Elömer Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında Halep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Bölümüne girdi, Yapı Bölümü'nden 2014 yılında pek iyi derecede mezun oldu. 2015 yılında Türkiye'ye taşındı ve 2016 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda öğrenimine devam etmektedir.