

CTP Boyuna ve Enine Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışları

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 02.11.2024

Kabul/Accepted: 19.02.2025

Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams With GFRP Longitudinally Bars And Gfrp Transverse Reinforcement

Saruhan KARTAL* , Uğur GÜNDOĞAN , İlker KALKAN 

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye



© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Korozyona uğramama özellikleri sayesinde cam takviyeli polimer (CTP) donatıların kullanım alanı genişlemekte her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. CTP'den üretilmiş boyuna ve enine donatıların kullanıldığı çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. CTP donatıların bükülememesi nedeniyle CTP etriyeler 90° kanca açısına sahip olacak şekilde fabrikada üretilmektedir. Biri referans olmak üzere toplam beş adet CTP donatılı betonarme kirişin dört nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Referans kiriş CTP boyuna donatılara ve çelik etriyelere (135° kanca açısı) sahiptir. Çalışmada parametreler olarak, iki farklı a/d oranı ve iki farklı etriye aralığı tercih edilmiş ve bu parametrelerin kiriş kesme ve eğilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda ilgili parametrelerin kirişlerin kırılma modu, enerji sönmüleme kapasitesi, yük deformasyon ilişkisi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca farklı yönetmelik ve modellerce önerilen kesme ve eğilme kapasitesi ifadeleri kullanılarak tahminler yapılmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Abstract

Due to their corrosion resistance properties, the use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) reinforcement is expanding and gaining increasing attention day by day. Studies utilizing longitudinal and transverse reinforcements made of GFRP are growing in number. Since GFRP reinforcements cannot be bent, GFRP stirrups are manufactured in factories with a 90° hook angle. Four-point bending tests were conducted on a total of five GFRP-reinforced concrete beams, one of which served as a reference. The reference beam was reinforced with GFRP longitudinal reinforcements and steel stirrups (135° hook angle). In the study, two parameters were considered: two different a/d ratios and two different stirrup spacings. The effects of these parameters on the shear and flexural behavior of the beams were investigated. Within this scope, the influence of these parameters on the failure mode, energy dissipation capacity, and load-deformation behavior of the beams was determined. Additionally, shear and flexural capacity predictions were made using expressions proposed by various codes and models, and the results were compared with experimental data. The results showed a good agreement with the experimental findings.

Anahtar Kelimeler CTP Etriye; CTP Donatılı Betonarme Kiriş; Eğilme Davranışı; Kesme Davranışı

Keywords GFRP Stirrup, RC Beam with GFRP Reinforcement, Flexural Behaviour, Shear Behavior

1. Giriş

Çelik donatının korozyona uğraması, yapıların hizmet ömrünü kısaltmakta ve yüksek bakım ve onarım maliyetlerine yol açmaktadır. Bu sorunun çözümü olarak, korozyona dayanıklı özellikleriyle dikkat çeken lif takviyeli polimer (FRP) donatılar, çelik donatıya alternatif olarak ortaya çıkmıştır. FRP donatılar, üretiltikleri lif türüne göre adlandırılır ve en yaygın türleri cam elyaf (GFRP), bazalt (BFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP) olarak sıralanabilir. Ülkemizde GFRP donatılar, genellikle Cam Takviyeli Polimer (CTP) olarak da adlandırılmaktadır. Maliyetinin uygun ve kullanım alanı en geniş olan FRP donatı tipi, GFRP (CTP)'dir. Geleneksel çelik donatılara kıyasla CTP'ler oldukça farklı mekanik özelliklere sahiptir. CTP donatıların en belirgin avantajı, korozyondan etkilenmemesidir. Yüksek çekme dayanımına sahip olma

ve hafif olması da diğer önemli özellikleridir. Ancak CTP donatılar akma karakteristik özelliğine sahip olmaksızın düşük birim deformasyon değerlerinde kopmakta ve çelik donatılara nispeten düşük elastisite modülü değerlerine sahiptir. Yani süneklik ve kullanılabilirlik sınır durumu problemlerine sebebiyet vermektedir (Kartal vd., 2023). Peng vd. (2025), CTP donatılı donatılı sürekli betonarme derin kirişlerin kesme kuvveti aktarım mekanizmasını incelemişlerdir. CTP etriye oranının ve a/d oranının parametreler olarak belirlendiği çalışmada beş büyük ölçekli iki açıklıklı CTP donatılı kirişin eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Kritik kesme çatlağı oluşumunun ardından kirişlerde kesme kırılması gerçekleştiği belirtilmiştir. a/d oranının azalması veya CTP etriye oranının artırılması kesme dayanımını artırmıştır. Liang vd. (2023), enine ve boyuna donatıları CTP olan kirişlerin

kesme davranışları üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Kesme dayanımına etki eden faktörler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Betonun kesmeye katkısının önemi vurgulanmış, betonda lif kullanımı ile beton çatlama dayanımını artırarak, çatlama sonrası performansı iyileştirdiği ifade edilmiştir. Kesme dayanımına CTP etriyelerin katkısının kritik bir öneme sahip olduğu ifade edilmiştir. Ancak, CTP etriyelerin büküm noktalarındaki lif açılarındaki değişiklik nedeniyle çekme kapasitesine ulaşmadan bu noktalardan koptuğu vurgulanmıştır.

Çalışmada ayrıca; dayanıklılık, yangın dayanımı ve gelecekteki ihtiyaçlar başlıkları üzerinde durulmuştur. Al-Hamrani ve Alnahhal (2021), BFRP boyuna donatılar ve CTP etriyeler kullanarak betonarme kirişlerin kesme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında; donatı oranı, bazalt lif miktarı, a/d oranı ve etriye aralığını parametreler olarak belirlemişlerdir. Donatı ve lif oranının artmasıyla kesme dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. CSA S806-12 (2012) ile yüksek uyumlu tahminler yapılmıştır. a/d oranının 3,3'ten 2,5'a düşmesiyle yük kapasitesinin yaklaşık %46 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, kırılma türü basınç kesme kırılmasından eğik kesmeye dönüşmüştür. Enine donatı aralığının 250 mm'den 170 mm'ye düşürülmesiyle, yük kapasitesinde yaklaşık ortalama %20'lik bir artış sağlanmıştır. Tüm yönetmeliklerce hesaplanan kiriş kesme dayanımları güvenli tarafta kalmıştır. Han ve arkadaşları (2023), CTP etriyeli ancak boyuna donatıları çelik-CTP (hibrit) kompozit boyuna donatılardan üretilmiş olan kirişlerin kesme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, hibrit boyuna donatılı kirişlerin kesme kapasitesinin tahmini için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Said vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton basınç dayanımı ile CTP etriye oranı değişkenler olarak seçilmiş olup a/d oranı 2'dir. Yaklaşık 216 mm ve 150 mm etriye aralıklarına sahip olan elemanların kesme kapasiteleri etriyesiz deney elemanlarına kıyasla, sırasıyla yaklaşık %41 ve %82 oranında artış göstermiştir. Beton basınç dayanımının artışıyla, kesme dayanımları yaklaşık %49-104 oranında artış göstermiştir. Analitik çalışma neticesinde, CTP enine donatıların kesme dayanımı için yeni bir model geliştirilmiş ve bu model, önceki çalışmalarda yer alan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Jumaa ve Yousif (2019); a/d oranını sabit tuttıkları, etriye aralığını ve donatı etkili derinliğini değişken olarak seçtikleri çalışmada BFRP donatılı kirişlerde boyut etkisinin kesme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Boyutlardaki değişimin, kiriş kesme davranışı üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Ayrıca, CTP etriye birim deformasyon sınır değeri için yeni bir ifade geliştirilmiştir. Li vd. (2022), CTP etriyelerin büküm noktalarındaki lif

açısındaki değişimler ile gerilme yığılmaları nedeniyle dayanımlarının düşük olduğunu ve bu sebeple karbon kumaşların birleştirilmesi yoluyla enine donatı olarak kullanıldığı betonarme kirişler üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Li vd. (2022), beşi CTP etriyeli biri çelik etriyeli toplam altı betonarme kirişin kesme davranışını deneysel olarak irdelemişlerdir. Etriye türü, a/d oranı ve etriye aralığı gibi parametrelerin kırılma modları, kesme çatlak genişliği, kesme kapasitesi ve donatı birim deformasyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. a/d oranı artışı ile kiriş kesme dayanımının azaldığı ancak CTP etriyelerdeki birim uzamanın artış gösterdiği tespit edilmiştir. Duic vd. (2018), dört ayrı BFRP parçasını birleştirerek etriyeler oluşturmuş ve BFRP donatılı kirişler üretmiştir. Bu tipte etriyeli deney elemanlarının kesme kırılmasına maruz kaldığı ve CSA S806-12 (2012) yönetmeliği ile yapılan tahminlerin güvenli tarafta kaldığı belirtilmiştir. Issa vd. (2016), BFRP donatılı ve enine donatılı/donatısız betonarme kirişlerin kesme davranışları üzerine bir araştırma yapmışlardır. a/d oranı etriyesiz kirişler için 5,65 ve 7 olarak, etriyeli kirişler için ise 1,5; 2,5 ve 3,5 olarak belirlenmiştir. Kesme dayanımını tahmin etmek için önerilen modeller ve mevcut yönetmelikler değerlendirilmiştir. ACI 440.1R-15 (2015) ile gerçekleştirilen tahminler bütün kirişler için oldukça güvenli iken; CSA S806-12 (2012) ile, etriyesiz ve yüksek donatı oranına sahip elemanlar ile etriyeli ve düşük a/d oranına sahip elemanlarda güvenli tarafta kalan tahminler elde edilmiştir. Razaqpur ve Spadea (2015) CTP donatılı kirişlerde kesme kuvveti aktarım mekanizmalarını ve bunların Kanada yönetmeliklerinde hesaba nasıl dahil edildiğini incelemişlerdir. Çalışmada 300'den fazla CTP donatılı kirişin deneysel ve tahmini kesme dayanımı verilerini kullanılmıştır. Kanada yönetmeliklerinin kesme dayanımlarını, güvenli tarafta kalan ve deneysel verilerle yüksek uyum içinde tahmin ettiği gösterilmiştir.

Yönetmeliklerde, CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme hesaplamaları yapılırken iki temel bileşenin etkisi göz önünde bulundurulur. Bunlar betonun (V_c), enine donatıların (V_f) katkılarıdır. Çelik donatılı kirişlerde betonun kesme dayanımına katkısı CTP donatılı kirişlere göre çok daha fazladır. Bu duruma sebep olan temel faktör CTP donatılarının düşük elastisite modülü değerine sahip olmasıdır. Elastisite modülünün düşüklüğü, çatlak genişlikleri ve derinliklerini artırmaktadır. Çatlakların daha derinleşmesi, basınç bölgesinde derinliğinin azalmasına yani çatlamamış beton kısımdaki betonun kesme dayanımının azalmasına neden olur. Daha geniş çatlaklar ise agrega kenetlenmesinin zayıflamasına, çatlaklar boyunca iletilen çekme gerilmelerinin etkisini azaltmaya

ve boyuna donatının kaldıraç etkisinin düşmesine neden olur. Kirişlerde kesme kuvvetleri nedeniyle kemer etkisinin ortaya çıkması kesme açıklığının (a) donatı faydalı yüksekliğine (d) oranına (a/d) bağlıdır. Gerçekleştirilen çalışmalar; $a/d < 2,5$ olması halinde gergili kemer davranışının gözlemlendiğini, ancak $a/d > 2,5$ olması durumunda kemer etkisinin gözlemlenmediğini göstermiştir (MacGregor ve Wight, 2006).

Çelik etriyeler bükülebilme özelliğine sahip olup kancaları 135° olması durumunda maksimum sargılama etkisi elde edilir. Ancak fabrikada üretilen ve bükülebilme özelliği olmayan CTP etriyelerin 90° kanca açısına sahiptir. CTP etriyelerin dayanımı düz CTP donatısından oldukça düşüktür. Bu durum büküm noktalarındaki lif açısının değişiminden kaynaklanmaktadır. Farklı yönetmelikler büküm noktalarındaki kopma birim deformasyonu için farklı birim uzama sınır değerleri önermekte ve buna göre etriye dayanımını belirlemektedir. Bu değerler ACI 440.1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012) ve JSCE-97 (1997) yönetmeliklerinde sırasıyla 0,004; 0,005 ve 0,0025'tir.

Mevcut çalışmada, yerel üretim CTP boyuna ve enine donatıların kullanılmıştır. Ana deney parametreleri etriye aralığı ve a/d oranı olarak belirlenmiş olup CTP enine ve boyuna donatılı kirişlerin eğilme ve kesme davranışları, taşıma gücü, enerji sönümleme kapasitesi ve yük deformasyon eğrileri irdelenmiştir. Ayrıca farklı yönetmelik ve modellerin kullanılmasıyla kirişlerin eğilme ve kesme kapasiteleri tahmin edilmiş ve gerekli değerlendirmeler yapılmıştır. Yerel üretim CTP donatıların kullanılmasıyla gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların ve verilerin artışı gelecekte hazırlanacak olan yönetmelikler için büyük önem arz etmektedir.

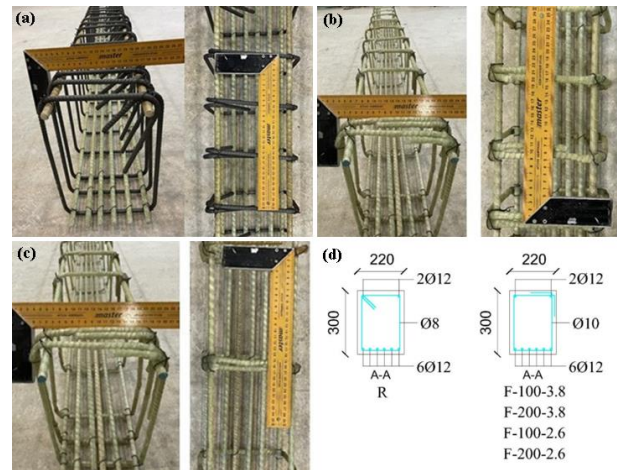
2. Deneysel Çalışma

2.1 Deney Elemanları ve Malzeme Mekanik Özellikleri

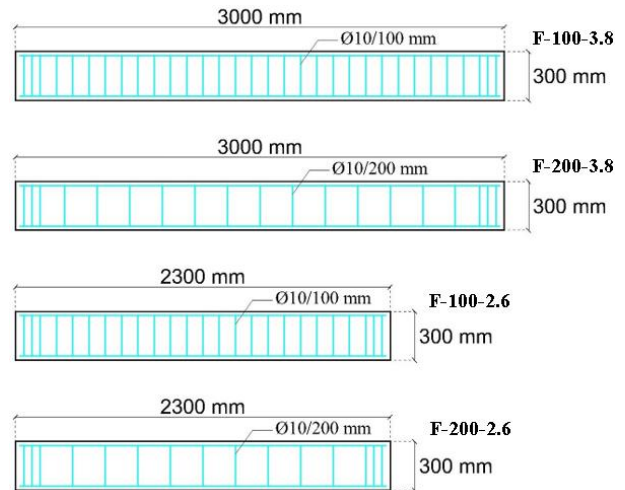
Çalışmada beş adet $\frac{1}{2}$ ölçekli kiriş yer almaktadır. Deney elemanlarının en kesit ölçüleri 220×300 mm'dir. Bu elemanlardan üçü 3000 mm, diğer ikisi ise 2300 mm uzunluğundadır. Çalışmada iki temel parametre mevcuttur ve deney elemanlarının buna göre hazırlanmıştır. Bunlar; etriye aralığı ve a/d oranı olarak belirlenmiştir. Kiriş uzunluklarının iki farklı değere sahip olması, iki farklı a/d oranına (2,6 ve 3,8) sahip kirişler üretebilmek içindir. Çalışmada 10 mm çaplı CTP fabrikasyon ve 8 mm çaplı çelik etriyeler (Şekil 1) kullanılmıştır. CTP etriyeler 90° lik kancalara sahip iken çelik etriyeler ise 135° kancalara sahip olacak şekilde imal edilmiştir. Etriye aralıkları ise 100 ve 200 mm'dir.

CTP'li deney elemanlarının tamamının kesme kırılmasına maruz kalma ihtimaline karşı $a/d = 3,8$ olan ve 100 mm

aralıkta çelik etriyeli bir referans deney elemanı (R) çalışmaya dahil edilmiştir. Ayrıca, R deney elemanında etriye kancaları 135° bükülmüştür. Deney elemanları ile ilgili detaylar Tablo 1'de, donatı detaylarına ise Şekil 2'de yer verilmiştir. Kirişlerin isimlendirmesi hususunda ilk harf (F) kirişlerde fabrikasyon CTP etriyenin kullanıldığını göstermektedir. "100" ve "200" sayıları etriye aralıklarını, "3,8" ve "2,6" sayıları ise a/d oranlarını ifade etmektedir. Bütün deney elemanlarında aynı miktarda çekme ve basınç donatısı mevcuttur. Altı adet 12 mm çaplı ve iki adet 10 mm çaplı CTP donatısı sırasıyla çekme ve basınç bölgelerinde yer almaktadır. 10 adet 100×200 mm silindirik numune ve 20 adet $150 \times 150 \times 150$ mm küp numunenin ve ortalama basınç dayanımı boyut etkisi de dikkate alınarak 21,92 MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmada CTP boyuna donatı olarak $\phi 12$, etriyelerde $\phi 10$ donatı tercih edilmiştir. Eksenel çekme testleri neticesinde CTP donatıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. $\phi 12$ ve $\phi 10$ donatıların sırasıyla, çekme dayanımları ortalama yaklaşık 924 MPa ve 787 MPa ve elastisite modülü ise ortalama yaklaşık 55 GPa ve 42 GPa'dır.



Şekil 1. (a) 100 mm aralıklı çelik, (b) 100 mm aralıklı CTP, (c) 200 mm aralıklı CTP etriyeler, (d) Çelik ve CTP etriye şemaları



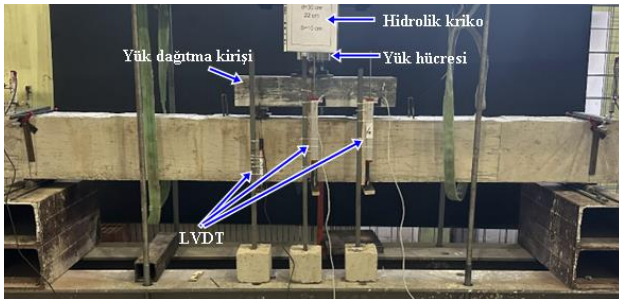
Şekil 2. Kirişlerin donatı detayı (Gündoğan, 2023)

Tablo 1. Kirişlere ait detaylar

Kiriş	Etriye Tipi	Etriye aralığı (mm)	a/d oranı	Etriye kanca açısı
R	Çelik	100	3,80	135°
F-100-3.8	CTP	100	3,80	90°
F-200-3.8	CTP	200	3,80	
F-100-2.6	CTP	100	2,60	
F-200-2.6	CTP	200	2,60	

2.2 Test Düzenegi

Kirişlerin dört nokta eğilme testleri Kırıkkale Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yer alan çerçeve kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrolik krikoyla yük sisteme aktarılmış ve yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Yük kirişe yük dağıtıcı kiriş yardımıyla iki noktadan uygulanmıştır. Bu noktalar kiriş orta noktasından 250'şer mm uzaklıkta yer almaktadır. Mesnetler ise, 3000 ve 2300 mm uzunluktaki kirişler için kiriş orta noktasına sırasıyla 1350 ve 1000'er mm uzaklıkta yer almaktadır. Sehimler, altı adet potansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Potansiyometreler kirişin orta noktasının ön/arka yüzüne, her iki yük ve mesnet noktalarına yerleştirilmiştir. Sehim ve yük değerleri veri toplayıcı ile senkronize olarak kaydedilmiştir. Test düzenegi Şekil 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 3.** Deney düzenegi

3. Bulgular

3.1 Kırılma Modları ve Yük Deformasyon İlişkisi

Çalışmada çekme donatı oranı ($\rho_f=0,011$) ACI 440.1R-15 (2015) dengeli donatı oranının (ρ_{fb}) yaklaşık 4,26 katı seçilerek kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin yüksek olması sağlanmıştır. $\rho_f > \rho_{fb}$ seçilmesiyle birlikte eğilme kapasitesine ulaşan deney elemanlarının hiçbirisi CTP donatısının kopmasıyla değil betonun ezilmesi neticesinde taşıma gücüne ulaşması sağlanmıştır.

R deney elemanında, sabit moment bölgesinde betonda ezilme başlangıcı yaklaşık 145 kN değerinde tespit edilmiştir. Yaklaşık 172 kN yük değerinde, ana kesme çatlağı derinleşmiş, aderans çatlağı belirginleşmiş ve beton basınç bölgesiyle birleşmiştir. R elemanı eğilme

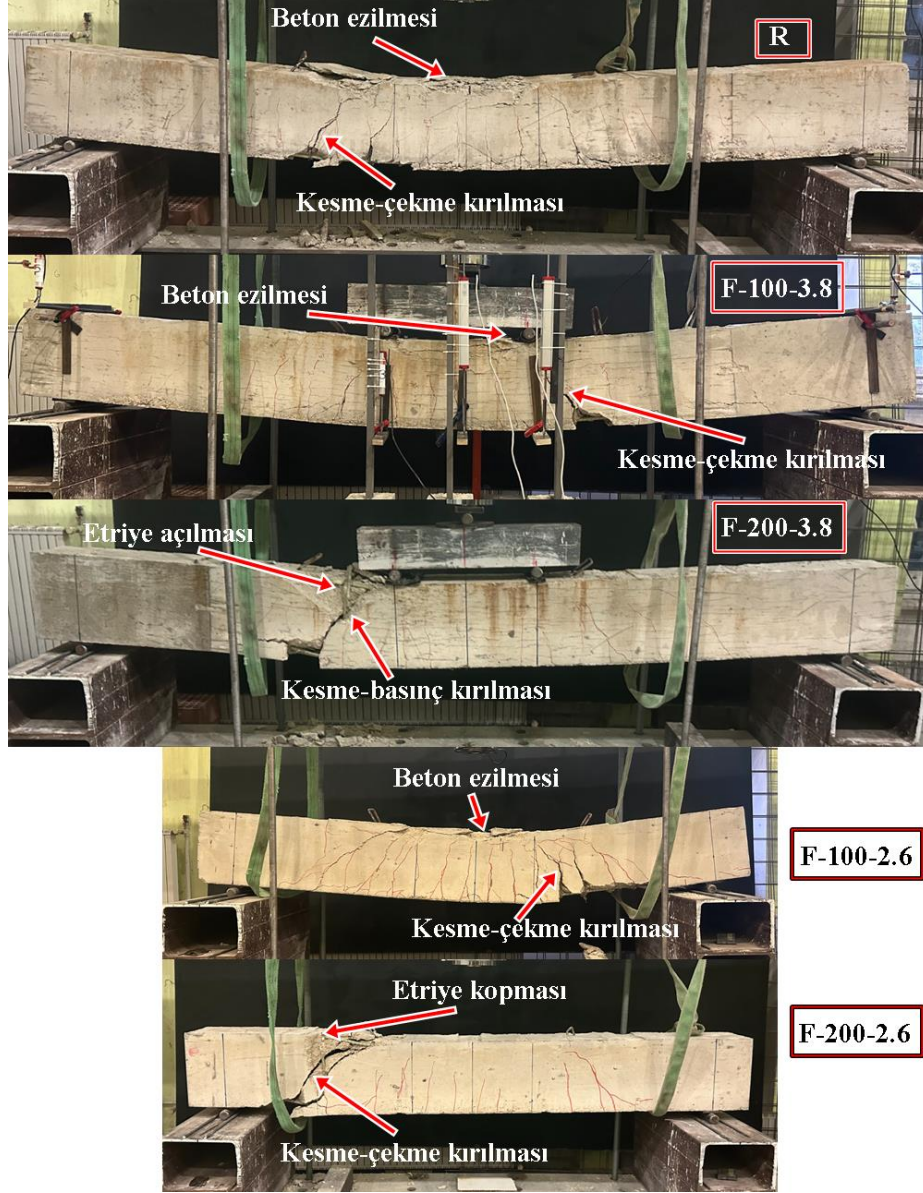
kapasitesine ulaşmıştır. Beton ezilir ezilmez kesme-çekme kırılması da gerçekleşmiştir. Eğilme taşıma gücü kapasitesine ulaşan F-100-3.8 elemanında, yük değeri yaklaşık 110 kN'a ulaştığında kesme çatlakları belirginleşip basınç bölgesine doğru derinleşmeye başlamış ve aynı zamanda yük-deformasyon eğrisi yataylaşmıştır. Yaklaşık 130 kN'a ulaştığında ise, ilk beton ezilme belirtileri başlamış ve yaklaşık 160 kN değerinde, betonun ezilmesinin hemen ardından kesme-çekme kırılması meydana gelmiş ve göçme gerçekleşmiştir. CTP donatı seviyesindeki aderans kaybı, betonda belirgin ayrışmalara yol açmış ve kesme-çekme kırılmasına neden olan ana çapraz çekme çatlağı betonun ezilmesini de tetiklemiştir. F-200-3.8 elemanında, yük yaklaşık 70 kN seviyesine ulaştığında kesme çatlakları yataylaşmış ve 125 kN civarına gelindiğinde ise kesme-basınç kırılması gerçekleşmiştir. Kesme bölgesinde yer alan ve sol yük noktasına en yakın olan etriye açılmıştır. Hemen ardından da basınç donatısı burkulmuştur. Burkulma sırasında basınç donatısı, betonun ve bağ telinin etkisiyle kesilmiştir. Düşük sertliğe sahip olan CTP malzemesi, yüksek gerilme değerlerine maruz kaldığında metalik bağ tellerinden dahi olumsuz etkilendiği sonucunu ortaya koymaktadır.

F-100-2.6 elemanında, yaklaşık 170 kN civarından itibaren beton elastikliğini yitirmeye başlamış ve yük-deformasyon eğrisi yataylaşma eğilimine sahiptir. Yük yaklaşık 215 kN seviyesine ulaştığında sabit moment bölgesinde betonda ezilme başlangıcı tespit edilmiş, yaklaşık 235 kN değerinde ise beton ezilerek eğilme kırılması meydana gelmiştir. Bunu takiben ani bir kesme-çekme kırılması meydana gelmiştir. F-200-2.6 elemanında, yük yaklaşık 105 kN seviyesine ulaştığında kesme çatlakları yataylaşmış ve yaklaşık 125 kN'a yaklaştığında etriyelerden birinin büküm noktasından kopmasıyla taşıma gücüne ulaşmıştır. Bunun ardından, etriyenin devre dışı kalmasıyla kesme yükleri betona aktarılmış ve betonda etriyenin kopmasıyla birlikte eğik çekme kırılması gerçekleşmiştir.

Tüm deney numunelerinin kırılma modları ve yük-deformasyon eğrileri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Tüm kirişler aynı kesit ebatlarına ve aynı boyuna donatı oranına sahiptir. Bu durum ilk çatlama yüklerinin ve çatlama sonrası rijitliklerin neredeyse aynı olmasının sebebidir. Eğilme taşıma gücü kapasitesine ulaşan R, F-100-2.6 ve F-100-3.8 kirişlerinin yük-deformasyon eğrileri rijitliğe bağlı olarak üç farklı bölgeden oluştuğu ifade edilmiştir. İlk çatlama ile rijitlik ani bir şekilde düşmüş, beton elastikliğini yitirene kadar rijitlik yaklaşık olarak sabit kalmış ve ardından beton elastikliğini kaybettikten sonra ise kademeli olarak azalmıştır. Ancak, F-200-2.6 deney elemanında, ilk

çatlamadan sonra rijitlik sabite yakın kalmış olup kesme kırılması sonrasında yük ani bir düşüş göstermiştir. F-200-3.8 deney elemanında ise rijitlik kademeli olarak düşmüştür. Kirişte kesme kırılması sonucu yükte ani bir düşüş meydana gelmiştir. “R” ve aynı kesme açıklığına sahip fabrikasyon CTP etriyeli deney elemanlarının (F-100-3.8) yük-deformasyon eğrilerinin son derece uyumlu

olması bu çalışmanın dikkat çeken sonuçlarından biridir. Bu durum, CTP etriyelerin de başarılı bir performans sergileyebileceğini gösterse de F-200-2.6 numunesinde etriyelerden birinin büküm noktasından kopması, CTP etriyelerin bazı durumlarda beklenenden daha düşük performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Deney elemanlarına ait kırılma modları

Tablo 2. Deney elemanlarına ait yük ve enerji sönümlleme kapasiteleri

Grup	Kiriş	a/d oranı	Yük kapasitesi (kN)	Enerji tüketim Kapasiteleri (kJ)	$P_b/P_{referans}$	$E_b/E_{referans}$
1.	R	3,80	174,72	10,65	1,09	1,09
	F-100-3.8*	3,80	159,79	9,74	1,00	1,00
	F-200-3.8	3,80	126,07	4,77	0,79	0,49
2.	F-100-2.6*	2,60	236,59	9,21	1,00	1,00
	F-200-2.6	2,60	128,3	1,74	0,54	0,19

P_b – kirişlerin yük kapasiteleri

E_b – kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri

$P_{referans}$ – referans kirişlerin yük kapasiteleri

$E_{referans}$ – referans kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri

* – her grupta yer alan referans CTP etriyeli kiriş

3.2 Yük ve Enerji Sönümleme Kapasiteleri

Çalışmada eğilme kırılma türü ile taşıma gücü kapasitesine ulaşan; R, F-100-3.8 ve F-100-2.6 deney elemanları yük ve enerji sönümleme kapasitesi bakımından en iyi kirişlerdir.

F-100-3.8 kirişi, R kirişine benzer olarak eğilme kapasitesine ulaşmış olmasına rağmen hem yük ve hem de enerji sönümleme kapasiteleri R elemanına göre yaklaşık %9'ar daha düşüktür. Bu durum kesme sıfır bölgesinde CTP etriye çapının çelik etriyeninkine göre daha büyük olmasına rağmen sargılama etkisinin çelik etriyeye göre daha düşük olması ile ilişkilidir. Ayrıca CTP etriyelerinin kancalarının 135° bükülememesi de sargılama etkisinin azalmasına neden olan bir diğer önemli faktördür.

3.3 CTP Etriye aralığı

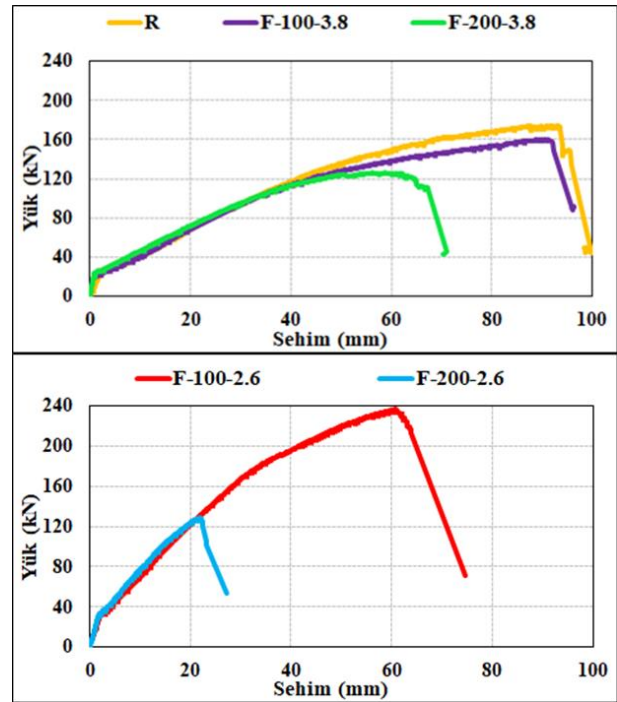
Şekil 5' te, a/d oranı bakımından aynı ancak etriye aralığı farklı deney elemanlarının yük-deformasyon eğrilerine yer verilmiştir. Etriye aralığının 200 mm'den 100 mm'ye düşüşü ile, kırılma modu kesmeden eğilmeye dönüşmüş ve yük ile enerji sönümleme kapasiteleri büyük oranda artış göstermiştir. F-100-3.8 kirişinin F-200-3.8 kirişine göre, yük ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %21 ve %51 daha yüksektir. F-100-2.6 kirişinin yük ve enerji sönümleme kapasiteleri ise, F-200-2.6 kirişine göre ilgili değerlerinden sırasıyla yaklaşık %46 ve %81 daha büyüktür. F-200-2.6 elemanında meydana gelen bu önemli farklılık, etriyenin beklenmedik bir şekilde düşük birim deformasyon değerlerinde kopmasından kaynaklanmaktadır.

3.4 a/d oranı

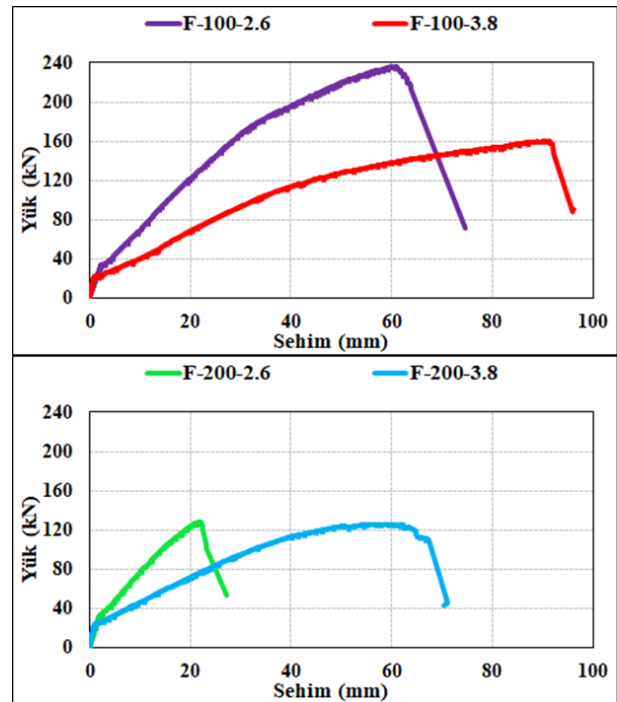
Kartal (2024), kemerlenme etkisinin $a/d < 2,5$ olan kirişlerde etkin olduğunu ifade etmektedir. Ancak $a/d > 2,5$ büyük olan kirişlerde bazı model ve yönetmeliklere göre a/d oranının artışıyla beton kesme dayanımının azaldığını ancak bazı modellere göre ise a/d oranının kesme dayanımı üzerindeki etkisinin ihmal edildiğini ifade etmiştir.

Şekil 6'da aynı etriye aralığına sahip ancak farklı a/d oranına sahip olan kirişlere ait yük-deformasyon eğrileri birlikte verilmiştir. Bu bölümde a/d oranı deneysel kesme dayanımları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ancak kesme dayanımının değişiminde moment kolu uzunluğunun değişiminin de etkisi olduğu unutulmamalıdır. 100 mm etriye aralığına sahip olan CTP etriyeli kirişler eğilme kapasitesine ulaşmış olduklarından yani kesme dayanımları tam olarak belirli değildir. Ancak 200 mm etriye aralığına sahip CTP etriyeli kirişlerde yaklaşık a/d oranının 2,6'dan 3,8'e artması ile kesme dayanımında yaklaşık %2'lik bir azalış gözlemlenmektedir.

Bu azalışın genellikle V_c (beton kesme dayanımı) azalışından kaynaklandığı ifade edilmiştir.



Şekil 5. Deney elemanlarına ait yük deformasyon eğrileri



Şekil 6. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük deformasyon eğrileri (a/d oranı parametresi) (Gündoğan, 2023)

4. Analitik Çalışma

4.1 Kesme Dayanımı

Kirişlerin kesme dayanımları farklı yönetmelik ve modellerde betonun (V_c) ve CTP etriyenin katkısı (V_f) olmak üzere iki temel bileşene sahiptir. CTP enine donatılar büküm noktalarında liflerdeki açı değişimi nedeniyle düz CTP donatılara göre kapasitesinden daha

düşük birim uzama değerlerinde ani olarak kopmaktadır. CSA S806-12 (2012), ACI 440.1R-15 (2015), JSCE-97 (1997) yönetmelikleri CTP etriyeler için sırasıyla 0,005; 0,004 ve 0,0025 gibi farklı birim uzama sınır değerleri önermektedir. Bu bölümde, kesme dayanımı hesaplamalarında sıkça kullanılan yönetmelikler ele alınmıştır.

4.1.1 ACI 440.1R-15 (2015)

Tureyen and Frosh (2003) tarafından önerilen betonun kesmeye olan katkısı (V_c), ACI 440.1R-15 (2015)'te de önerilmektedir (Denklem (1)). Boyuna donatı eksenel rijitliğinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi, elastik tarafsız eksen derinliğinin (kd) ile Denklem (1)'e dahil edilmiştir. Bu ifadede k çatlamış dönüştürülmüş kesit tarafsız eksen derinliğinin donatı faydalı yüksekliğine (d) oranıdır. Dikdörtgen kesitlerde k Denklem (2) yardımıyla hesaplanmaktadır. f_c , b_w , n_f ($n_f = E_f/E_c$) ve ρ_f sırasıyla beton basınç dayanımını, kiriş genişliğini, elastisite modülleri oranını ve boyuna donatı oranını simgelemektedir.

$$V_c = 0,4\sqrt{f_c}b_wd(kd) \quad (1)$$

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

ACI 440.1R-15 (2015) CTP etriyelerin kesmeye olan katkısı (V_f) için Denklem (3)'ü önermektedir. Bu ifadelerde A_{fv} etriye donatısı kesit alanını, f_{fv} etriye donatı gerilmesini ve s etriye aralığını ifade etmektedir.

ACI 440.1R-15 (2015); f_{fv} 'nin Denklem (4)'e göre hesaplanmasını önermektedir. Bu ifadeye göre, CTP etriye sınır birim uzama değeri 0,004'tür. Ayrıca CTP etriyenin elastisite modülü E_{fv} ile simgelenmiştir.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (3)$$

$$f_{fv} = 0,004E_{fv} \leq f_{fu} \quad (4)$$

4.1.2 CSA S806-12 (2012)

CSA S806-12 (2012), V_c 'yi, Razaqpur ve Isgor (2006) tarafından geliştirilen Denklem (5)'e göre hesaplanmasını önermektedir. Bu denklem, beton kesme dayanımını etkileyen moment-kesme etkileşimi (k_m), boyuna donatı eksenel rijitliği (k_r), boyut etkisi (k_s), ve kemer davranışı etki katsayısı (k_a) gibi kritik değişkenleri göz önünde bulundurmaktadır (Denklem (6)). ϕ_c ve λ sırasıyla beton

için dayanım ve yoğunluk katsayısını ifade etmektedir. M_f ve V_f ise sırasıyla yük katsayıları dahil edilerek hesaplanmış momenti kesme kuvvetini göstermektedir.

$$V_c = 0,05\lambda\phi_c k_m k_r k_s k_a (f_c)^{1/3} b_w d_v \quad (5)$$

$$k_m = \left(\frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/2} \leq 1$$

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

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

$$k_a = \left(\frac{2,5V_f}{M_f} d \right) \leq 1 \quad (6)$$

CSA S806-12'de (2012) V_f ve f_{fv} 'nin hesabı için sırasıyla Denklem (7-8)'i yer almaktadır. Etriye kapasitesi için bu yönetmelikte 0,005 sınır birim deformasyon değeri önerilmiştir. d_v etkili kesme derinliğini ($d_v = \max(0,9d; 0,72h)$) ifade etmektedir. Ayrıca kesme dayanımı hesaplarında deneysel ana kesme çatlağının açısı (θ) dikkate alınmıştır.

$$V_f = \frac{0,4\phi_c A_{fv} f_{fv} d_v}{s} \cot \theta \quad (7)$$

$$f_{fv} \leq 0,005E_{fv} \quad (8)$$

4.1.3 ISIS-M03-07 (2007)

ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliğine göre V_c ifadesi, Denklem (9)'daki gibi donatı etkili derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

$$V_c = \begin{cases} 0,2\lambda\phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f/E_s} & d \leq 300 \text{ mm} \\ \left(\frac{260}{1000 + d} \right) \lambda\phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f/E_s} & d > 300 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliği, V_f 'nin hesabı için ana kesme çatlağı açısını (θ) da dikkate alan Denklem (10-11)'in kullanılmasını önermektedir. Ayrıca d_v değerinin donatı etkili derinliğinin %90'ına eşit olduğu ifade edilmiştir. Etriye için ise sınır uzama değeri 0,0025'tir.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d_v \cot \theta}{s} \quad (10)$$

$$f_{fv} = 0,0025E_{fv} \quad (11)$$

4.2 Eğilme Dayanımı

CTP donatılı betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri iki farklı yönetmelik (CSA S806-12, 2012; ACI

440.1R-15, 2015) ve Todeschini beton modeli (1964) kullanılarak tahmin edilmiştir.

4.2.1 ACI 440.1R-15 (2015)

Bu yönetmelikte betonun ezilme birim deformasyonu 0,003 olup, dikdörtgen basınç bloğu derinliğinin tarafsız eksene oranı olarak tanımlanan β_1 Denklem (12)'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca denge üstü donatılı kirişlerde ($\rho_f > \rho_{fb}$) eğilme momenti kapasitesi Denklem (13)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\beta_1 = \begin{cases} f_c \leq 28 \text{ MPa} \rightarrow 0,85 \\ f_c > 28 \text{ MPa} \rightarrow 0,85 - \frac{0,05(f_c - 28)}{7} \geq 0,65 \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho_f > \rho_{fb} \rightarrow f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \quad (13)$$

$$M_u = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c} \right) b_w d^2$$

f_f boyuna CTP donatısındaki nihai gerilme değerini, ε_{cu} betonun ezilme birim deformasyonunu ve M_u eğilme momenti kapasitesini göstermektedir.

4.2.2 CSA S806-12 (2012)

Bu yönetmelikte betonun ezilme birim deformasyonu 0,0035 olup, dikdörtgen basınç bloğu derinliğinin tarafsız eksene oranı β_1 ve dikdörtgen basınç bloğu genişliği katsayısı α_1 Denklem (14)'e göre hesaplanmıştır. Tarafsız eksen derinliğine (c) bağlı olarak ve Denklem (15) kullanılarak f_f ve M_u hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,85 - 0,0015 f_c \geq 0,67 \\ \beta_1 &= 0,97 - 0,0025 f_c \geq 0,67 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 \beta_1 f_c b_w c &= A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) \rightarrow c \\ f_f &= E_f \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} < f_{fu} \\ M_u &= A_f f_f \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

4.2.3 Todeschini (1964) Beton Modeli

Bu beton modelinde betondaki gerilme ($f_c(\varepsilon_c)$) betonun birim deformasyonuna (ε_c) bağlı olarak tek bir fonksiyonla ifade edilmektedir (Denklem (16)) Maksimum basınç gerilmesi (f'_c), standart silindirik beton basınç dayanımının (f_c) %90'ına karşılık gelmektedir. $\beta_1(\varepsilon_c)$ ve $k_2(\varepsilon_c)$ ise

eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun sırasıyla genişlik ve derinlik katsayıları olup ε_c 'ye bağlı olarak Denklem (17-18) ile hesaplanmaktadır.

$$f_c(\varepsilon_c) = \frac{2 f'_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2} \quad (16)$$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right]}{\varepsilon_c / \varepsilon_o} \quad (17)$$

$$k_2(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2 \left[\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right) - a \tan \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right) \right]}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \beta_1(\varepsilon_c)} \quad (18)$$

Bu modelde betonun ezilme birim deformasyonu 0,0038 olup, Denklem (19) kullanılarak f_f ve M_u elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \beta_1(\varepsilon_{cu}) k_2(\varepsilon_{cu}) f_c b_w c &= A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) \rightarrow c \\ f_f &= E_f \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} < f_{fu} \\ M &= A_f f_f \left(d - \frac{k_2(\varepsilon_{cu}) c}{2} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

4.3 Kesme ve Eğilme Kapasiteleri

Bu bölümde farklı yönetmelik ve modellerce hesaplanan kesme ve eğilme kapasiteleri deneysel veriler ile karşılaştırılarak değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Kesme ve eğilme tahminleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4' te sunulmuştur. Taşıma gücüne kesme kırılması neticesinde ulaşan kirişlerin ilgili yönetmeliklere göre hesaplanan kesme dayanımları ($V_n = V_c + V_f$) ile deneysel kesme verileri (V_{exp}) Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. CSA S806-12 (2012) ve ISIS M03-07 (2007) yönetmelikleri için deneysel verilerden elde edilen θ değerleri kesme dayanımı hesabında kullanılmıştır (Şekil 7). Kesme dayanımları tahmin edilirken bütün malzeme katsayıları bire eşit olarak alınmıştır.

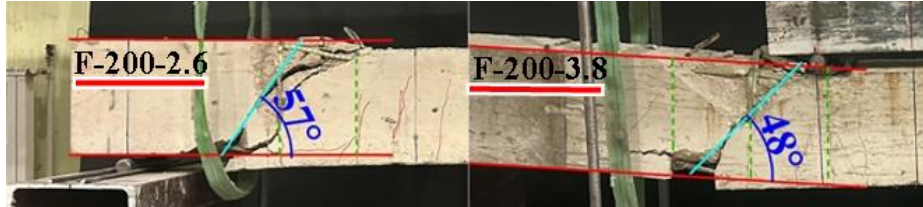
CTP etriyeli betonarme kirişlerde ACI 440-1R-15 (2015) tarafından önerilen kesme formüllerinden hesaplanan teorik değerlerle deneysel olarak belirlenen kesme kapasitelerinin büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür. Özellikle F-200-2.6 ve F-200-3.8 numunelerinin kapasiteleri yaklaşık maksimum %4'lük farkla tahmin edilmiştir. ACI 440-1R-15 (2015) güvenli tarafta kalacak şekilde tahminler gerçekleştirilmiştir. CSA S806-12 (2012) formüllerinden elde edilen değerler, CTP etriyeli

elemanların deneysel kesme değerleri genel olarak %15-20 mertebesinde altında kalmıştır. CSA S806-12 (2012) ile gerçekleştirilen tahminler ACI 440-1R-15 (2015)'e göre daha güvenli taraftadır. ISIS M03-07 (2007) ise güvenli

olmayan sonuçlar vermiştir. F-200-2.6 ve F-200-3.8 deney elemanlarının kesme dayanımları sırasıyla yaklaşık %1 ve %20 deneysel verilerden daha yüksektir.

Tablo 3. Kesme dayanımları

Kiriş	Kırılma Modu	V_{exp} (kN)	ACI 440-1R-15 (2015)		CSA S806 -12 (2012)		ISIS M03-07 (2007)	
			V_n (kN)	V_{exp}/V_n	V_n (kN)	V_{exp}/V_n	V_n (kN)	V_{exp}/V_n
F-200-3.8	Kesme	63,035	61,92	1,018	53,07	1,188	78,37	0,804
F-200-2.6	Kesme	64,150	61,92	1,036	56,80	1,129	65,11	0,985



Şekil 7. Ana kesme çatlakları (Gündoğan, 2023)

Tablo 4. Deney elemanlarının eğilme kapasiteleri

Kiriş	Kırılma Modu	P_{exp} (kN)	P_{n-ACI} (kN)	P_{n-CSA} (kN)	$P_{n-Todes.}$ (kN)	P_{exp}/P_{n-ACI}	P_{exp}/P_{n-CSA}	$P_{exp}/P_{n-Todes.}$
R	Eğilme+Kesme	174,72	128,49	138,90	137,91	1,36	1,26	1,27
F-100-3.8	Eğilme+Kesme	159,79	128,49	138,90	137,91	1,24	1,15	1,16
F-100-2.6	Eğilme+Kesme	236,59	188,45	203,72	202,26	1,26	1,16	1,17

P_{exp} – kirişlerin deneysel yük kapasiteleri

P_{n-ACI} – ACI 440.1R-15'e göre kirişlerin yük kapasiteleri

P_{n-CSA} – CSA S806 -12'ye göre kirişlerin yük kapasiteleri

$P_{n-Todes.}$ – Todeschini modeline göre kirişlerin yük kapasiteleri

Tablo 4'te, CTP enine/boyuna donatılı kirişlerin eğilme kapasiteleri yönetmelikler ve modeller kullanılarak tahmin edilmiş ve deneysel yük değeri (P_{exp}) ile karşılaştırılmıştır. Eğilme kapasitesine ulaşmış deney elemanları için, her iki yönetmelik ve Todeschini modeli (1964) kullanılarak gerçekleştirilen tüm tahminler deneysel verilerden düşüktür. En güvenli sonuçlar ACI 440.1R-15 (2015), deneysel verilere en yakın sonuçlar ise CSA S806-12 (2012) ile tahmin edilmiştir. F-100-3.8 deney elemanı için, analitik eğilme kapasiteleri tüm yöntemlerle deneysel verilere en yakın olacak şekilde tahmin edilmiştir. R deney elemanının deneysel eğilme kapasitesi çelik etriyenin ve kanca açısının sargılama etkisini artırması nedeniyle daha büyüktür. Bu durum sargılama etkisini göz önünde bulundurmeyen yönetmelik ve modellere göre deneysel sonuçların en yüksek çıkmasının temel sebebidir.

5. Sonuçlar

Mevcut çalışmada CTP donatılı beş adet betonarme kirişin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve kesme davranışları irdelenmiştir. Çelik etriyeli bir referans kiriş de çalışmaya dahil edilmiştir. Değişkenler olarak CTP etriye aralığı ve a/d oranının belirlendiği çalışmada bu

değişkenlerin; yük ve enerji sönmüleme kapasiteleri ile kırılma modu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elemanların deneysel kesme değerleri, ACI 440-1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012), ISIS M03-07 (2007) yönetmeliklerinde yer alan analitik ifadeler; deneysel eğilme kapasiteleri ise ACI 440-1R-15 (2015), CSA S806-12 (2012) ve Todeschini beton modeli (1964) kullanılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Aynı a/d oranına sahip olan ve eğilme taşıma gücüne ulaşan F-100-3.8 ve R elemanlarının yük ve enerji sönmüleme kapasiteleri arasında yaklaşık %9'luk bir fark mevcuttur. Bu durum CTP etriyenin çelik etriyeye göre düşük sargılama etkisi ile açıklanabilir. Ayrıca CTP etriye kanca açısının 90° olması da bu sargılama etkisinin azalmasının bir diğer nedenidir.
- F-100-3.8 gibi F-100-2.6 kirişi de eğilme taşıma gücüne ulaşmıştır. Bu elemanlarda, CTP etriyelerin etkinliği neticesinde beton ezilmeden önce kesme kırılmalarının gerçekleşmesi engellenmiştir.
- Etriye aralığının artışıyla (100 mm yerine 200 mm), eğilme kırılma türü yerini kesme kırılma türüne

bırakmıştır. Etriye aralığının artışı aynı zamanda, kirişlerin süneklik, yük ve enerji sönümleme kapasitesinde büyük miktarda azalmalara neden olmuştur.

- F-200-2.6 kirişi, kesme bölgesinde yer alan etriyelerden birinin büküm noktasından kopması neticesinde taşıma gücüne ulaşmıştır. Bu durum bu kirişteki düşük yük ve enerji sönümleme kapasitesinin nedeni olarak gösterilmiştir.
- ACI 440-1R-15 (2015) ile hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin, deneysel kesme dayanım değerleri ile önemli ölçüde uyumludur. Ancak CSA S806-12 (2012) ile hesaplanan kesme dayanımı değerleri, deneysel değerlerin yaklaşık %15-20 altında olup daha güvenli tarafta kalmıştır.
- Eğilme kapasite tahminlerinin tamamı güvenli tarafta kalmıştır. En güvenli sonuçlar ACI 440.1R-15 (2015), deneysel verilere en yakın sonuçlar ise CSA S806-12 (2012) kullanılarak elde edilmiştir. F-100-3.8 deney elemanı için, analitik eğilme kapasiteleri tüm yöntemlerle deneysel verilere en yakın olacak şekilde tahmin edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Prof. Dr. İlker KALKAN ve Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL danışmanlığında 2023 yılında tamamladığımız “Ayrık Çubuk ve Kapalı Etriye Şeklinde FRP Kesme Donatısı Bulunduran FRP Boyuna Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışları” başlıklı yüksek lisans tezi (Tez no: 831657) esas alınarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Araştırma, Deney, Deney Tasarımı, Yazma/orijinal taslak, Danışmanlık, Doğrulama

Yazar 2: Araştırma, Kaynaklar, Deney, Biçimsel analiz, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak,

Yazar 3: Denetleme, Analiz, Danışmanlık, Yazma –orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Çalışmanın gerçekleşmesinde altyapı imkanlarından yaralandığımız Kırıkkale Üniversitesine teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

ACI-440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP), 2015: ACI 440. 1R-15, American Concrete Institute, Farmington, Hills, MI.

Al-Hamrani, A., & Alnahhal, W., 2021. Shear behavior of basalt FRC beams reinforced with basalt FRP bars and glass FRP stirrups: Experimental and analytical investigations. *Engineering Structures*, **242**, 112612. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112612>

CSA, 2012, Code for the Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, in CAN/CSA/S806-12, Canadian Standard Association, Toronto, Ontario, Canada, , 198.

Duic, J., Kenno, S., & Das, S., 2018. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. *Construction and Building Materials*, **176**, 470-481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.208>

Gündoğan, U., 2023. Ayrık çubuk ve kapalı etriye şeklinde FRP kesme donatısı bulunduran FRP boyuna donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, 69.

Han, S., Fan, C., Zhou, A., & Ou, J., 2023. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups. *Engineering Structures*, **278**, 115520. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115520>

ISIS, Reinforced Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers – Design Manual No. 3, ISIS Canada Corporation: University of Manitoba, Manitoba, Canada, 2007.

Issa, M. A., Ovitigala, T., & Ibrahim, M., 2016. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. *Journal of Composites for Construction*, **20(4)**, 04015083. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000638](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638)

JSCE, 1997, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series 23, A. Machida, ed., Tokyo, 325.

Jumaa, G. B., & Yousif, A. R., 2019. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*, **209**, 77-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.076>

Kartal, S., 2024. Etriyersiz FRP Boyuna Donatılı Betonarme Kirişlerin ($a/d > 2.5$) Kesme Davranışları. *International Journal of Engineering Research and Development*, **16(1)**, 416-431. <https://doi.org/10.29137/umagd.1404776>

Kartal, S., Kalkan, I., Mertol, H. C., & Baran, E., 2023. Influence of the proportion of FRP to steel reinforcement on the strength and ductility of hybrid reinforced concrete beams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **27(12)**, 3546-

3565.

<https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2143429>

Li, W., Tang, S., Huang, X., Liu, W., Yang, X., & Shi, T., 2022. Carbon fiber-reinforced polymer mesh fabric as shear reinforcement in reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, **53**, 104433.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104433>

Li, W., Huang, W., Fang, Y., Zhang, K., Liu, Z., & Kong, Z., 2022. Experimental and theoretical analysis on shear behavior of RC beams reinforced with GFRP stirrups. *Structures*, **46**, 1753-1763.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.138>

Liang, X., Peng, J., & Ren, R., 2023. A state-of-the-art review: Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, **364**, 129996.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129996>

MacGregor, J. G. and Wight, J. K., 2006. *Reinforced concrete: Mechanics and design (Vol. 3)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall

Peng, F., Cai, Y., & Yi, W., 2025. Shear mechanism and strength of large-scale continuous concrete deep beams reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*, **326**, 119524.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119524>

Razaqpur, A. G., & Isgor, O. B., 2006. Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups. *ACI Structural Journal*, **103(1)**, 93.

Razaqpur, A. G., & Spadea, S., 2015. Shear strength of FRP reinforced concrete members with stirrups. *Journal of Composites for Construction*, **19(1)**, 04014025.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000483)

Said, M., Adam, M. A., Mahmoud, A. A., & Shanour, A. S., 2016. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, **102**, 574-591.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.185>

Todeschini, C. E., Bianchini, A. C., & Kesler, C. E., 1964. Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. *Journal Proceedings*, **61(6)**, 701-716.

<https://doi.org/10.14359/7803>

Tureyen, A. K., & Frosch, R. J., 2003. Concrete shear strength: Another perspective. *Structural Journal*, **100(5)**, 609-615