



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**AYRIK ÇUBUK VE KAPALI ETRİYE ŞEKLİNDE FRP KESME
DONATISI BULUNDURAN FRP BOYUNA DONATILI
BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞLARI**

**UĞUR GÜNDOĞAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlker KALKAN
Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL**

KIRIKKALE-2023



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**AYRIK ÇUBUK VE KAPALI ETRİYE ŞEKLİNDE FRP KESME
DONATISI BULUNDURAN FRP BOYUNA DONATILI
BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞLARI**

**UĞUR GÜNDOĞAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlker KALKAN
Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL**

KIRIKKALE-2023

Prof. Dr. İlker KALKAN ve Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL danışmanlığında, tarafından hazırlanan ‘AYRIK ÇUBUK VE KAPALI ETRİYE ŞEKLİNDE FRP KESME DONATISI BULUNDURAN FRP BOYUNA DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞLARI’ adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İlker KALKAN

İmza.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Ortak Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL

İmza.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şule BAKIRCI ER

İmza.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Prof. Dr. Alper BÜYÜKKARAGÖZ

İmza.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Cem YILMAZ

İmza.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 28./07/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- o Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- o Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- o Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- o Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- o Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)
(Adı Soyadı)
(Tarih)

ÖZET

AYRIK ÇUBUK VE KAPALI ETRİYE ŞEKLİNDE FRP KESME DONATISI BULUNDURAN FRP BOYUNA DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞLARI

GÜNDOĞAN, Uğur

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL

Danışman: Prof. Dr. İlker KALKAN

Temmuz 2023, 69 sayfa

Yüksek korozyon dayanımı avantajı nedeniyle cam takviyeli polimer (CTP) donatılar gün geçtikçe popülerlik kazanmaktadır. Bu nedenle CTP'den üretilmiş boyuna ve enine donatıların betonarme elemanlarda kullanıldığı çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. CTP donatıların bükülememesi nedeniyle CTP etriyelerin fabrikada kapalı formda üretildiği bilinmektedir. Fabrikada farklı ebatlar için farklı üretim kalıplarının hazırlanması gerekmekte ve kapalı CTP etriye üretimi hızlı ve ekonomik olarak gerçekleştirilememektedir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmalarda bu etriyelerin çekme kapasitesine ulaşmadan büküm noktalarından koptuğu gösterilmiştir. Kapalı etriyelerin bu dezavantajlarından hareketle mevcut çalışmada dört ayrık çubuğun bağ teli ile birleştirilmesiyle oluşturulmuş yapma CTP etriyelerin etkinliği araştırılmak istenmiştir. Bu kapsamda, cam takviyeli polimer (CTP) donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları incelenmiştir. Biri referans olmak üzere toplamda 11 adet betonarme kirişin dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada CTP etriye tipi, etriye aralığı ve a/d oranı parametre olarak belirlenirken deney elemanlarının tamamı aynı oranda boyuna donatı ile aynı beton dayanımına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışmada iki farklı a/d oranı (yaklaşık 2.60 ve 3.80), iki farklı etriye aralığı (100 mm ve 200 mm) ve üç farklı etriye tipi kullanılmıştır. Kullanılan CTP etriyelerden ilki 10 mm çap değerine sahip, 90° kancalı kapalı formdadır (fabrikasyon). İkincisi ise 10 mm çapa sahip dört ayrık çubuğun bağ teli ile birleştirilmesi ile oluşturulmuş etriye çeşididir. Üçüncüsü ise 10 mm çapa sahip iki ayrık düşey çubuğun boyuna donatılara bağ teli ile birleştirilmesi neticesinde oluşturulmuştur. Referans deney elemanı ise a/d oranı yaklaşık 3.80 olan ve çalışmada CTP etriye tipinin etkinliğinin ortaya koyulabilmesi bakımından çelik etriyeli olarak üretilmiş elemandır. Çalışmada yapma etriyeli deney elemanlarının kesme kapasitelerinin, eşdeğer kapalı etriyeli numunelerin ilgili değerlerinin yaklaşık %54'ü kadar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 90° kanca uçu açısı dezavantajına rağmen, kapalı CTP etriyeli elemanların yük-sehim davranışlarının kapalı çelik etriyeli betonarme elemanların ilgili davranışlarına oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CTP etriye, CTP yapma etriye, kesme davranışı, CTP donatılı betonarme kiriş

ABSTRACT

SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH FRP LONGITUDINAL BARS AND FRP TRANSVERSE REINFORCEMENT IN THE FORM OF CLOSED STIRRUPS AND INDIVIDUAL BARS

GÜNDOĞAN, Uğur

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL

Supervisor: Prof. Dr. İlker KALKAN

July 2023, 69 pages

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) reinforcement rebars are gaining popularity day by day due to the advantage of high corrosion resistance. For this reason, many studies have been carried out using FRP longitudinal and transverse reinforcement. It is known that FRP stirrups are produced in closed form in the factory due to the inability of the FRP reinforcement to be bent into stirrups. Different production molds have to be prepared for different sizes in the factory, and closed FRP stirrup production cannot be carried out quickly and economically. In addition, studies have shown that these stirrups rupture at the bending points before reaching the tensile capacity. For these reasons, in the present study, it was aimed to investigate the effectiveness of segmental FRP stirrups formed by combining four separate rods with tie wires. Within this scope, shear behavior of reinforced concrete beams with GFRP rebars was investigated. A total of 12 beams, including a reference specimen, were tested under four-point bending. In the study, while the FRP stirrup type, stirrup spacing and a/d ratio were determined as test parameters, all of the test beams had identical amount of longitudinal reinforcement and concrete strength. Two different a/d ratios (approximately 2.60 and 3.80), two different stirrup spacing values (100 and 200 mm) and three different stirrup forms were used in the study. The first FRP stirrup type is in the closed form (fabrication) with a diameter of 10 mm and a hook of 90°. The second is the segmental form, obtained by combining four separate bars with a diameter of 10 mm with tie wires. The last one, on the other hand, was produced by fixing two vertical and parallel (transverse) FRP bars to the longitudinal reinforcement with wires. The reference specimen was produced with steel stirrups with a a/d ratio of approximately 3.80 and in order to demonstrate the effectiveness of the FRP stirrup type. In the study, it was determined that the shear capacities of the beams with segmental stirrups were approximately in the order of 54% of the respective values of specimens with conventional closed stirrup specimens. Furthermore, despite the problem related to the 90° hook angle of the stirrups, the load-deflection behavior of RC beams with closed GFRP stirrups was determined to be close to the related behavior of the RC beams with closed steel stirrups.

Keywords: GFRP stirrup, GFRP segmental stirrup, shear behavior, RC beam with GFRP reinforcement

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca derin bilgisinden faydalandığım, tezimin hazırlanma sürecinde yardımını esirgemeyen, tüm sorularıma ve sorunlarıma sabırla çözüm üreten, karşılaştığım bütün olumsuzluklara karşı beni cesaretlendirip motive eden, fikirleriyle bana her daim ışık olan, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum kıymetli danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Saruhan KARTAL' a ve Prof. Dr. İlker KALKAN' a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her anında her konu hakkında istişare ettiğim, bana yol gösteren, mesleğe girmeme vesile olup ve ömrüm boyunca emeğini ödeyemeyeceğim, maddi-manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, evlatları olmaktan gurur duyduğum babam Bayram GÜNDOĞAN' a ve biricik annem Hatice GÜNDOĞAN' a çok teşekkür ederim. Yine emeklerini ödemeyeceğim ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen babaannem Satı GÜNDOĞAN' a çok teşekkür ederim. Kardeşlerim Gülден DAĞDELEN' e ve Merve AKÇADAĞ' a içten destekleri için çok teşekkür ederim. Evlendiğimizden itibaren, özellikle mesleğim başta olmak üzere her konuda bana destek olan, hem eşim hem yol arkadaşım Merve Sümeyye GÜNDOĞAN' a çok teşekkür ederim. Doğumundan itibaren evimizin neşe kaynağı olan, hayattaki en büyük motivasyonum canım kızım Elif Defne GÜNDOĞAN' a çok teşekkür ederim.

Bu süre zarfında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kayınbabam Ali GÖZÜAK' a ve kayınvalidem Canan GÖZÜAK' a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımında emekleri geçen, desteğini her zaman hissettiğim dostlarım ve değerli kardeşlerim Burak KAÇAR' a, Aziz KESKİN' e, Ali AKTUĞ' a, Yaşar Şahin ÖZEN' e, İsmail PAPAKER' e, Tanju ÇELİK' e ve Yahya Barışcan SERT' e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. CTP DONATILAR	7
2.1. Lifli Polimer Donatıların İç Yapısı.....	7
2.1.1. Cam Lifler.....	7
2.1.2. Karbon Lifler	7
2.1.3. Polimer Lifler.....	8
2.1.4. Matris	8
2.2. CTP Üretimi	9
2.2.1. El Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi	9
2.2.2. Püskürtme (Sprey Up) Yöntemi	10
2.2.3. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) – Reçine Enjeksiyonu Yöntemi.....	10
2.2.4. Hazır Kalıplama (Compressing Molding) Yöntemi	10
2.2.5. Islak Sistem Pres Kalıplama Yöntemi	11
2.2.6. Vakum Bonding (Vakum Bagging) Yöntemi.....	11
2.2.7. Otoklav (Autoclave Bagging) Yöntemi.....	11
2.2.8. Devamlı Levha Üretimi Yöntemi	12
2.2.9. Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi.....	12
2.2.10. Profil Çekme – Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi	12
2.3. CTP Donatı Başlıca Avantajları	13
2.4. CTP Donatı Dezavantajları.....	13
2.5. CTP Donatı Kullanım Alanları.....	14
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	15

3.1. Deney Elemanları	15
3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri	17
3.3. Deney Düzeneği	19
3.4. Deney Elemanlarının Hazırlanışı	20
3.5. Deneyler	22
3.5.1. R Elemanı Deneyi	22
3.5.2. F-100-3.8 Elemanı Deneyi	24
3.5.3. F-200-3.8 Elemanı Deneyi	26
3.5.4. F-100-2.6 Elemanı Deneyi	28
3.5.5. F-200-2.6 Elemanı Deneyi	30
3.5.6. S-100-3.8 Elemanı Deneyi	32
3.5.7. S-200-3.8 Elemanı Deneyi	34
3.5.8. S-100-2.6 Elemanı Deneyi	35
3.5.9. S-200-2.6 Elemanı Deneyi	37
3.5.10. T-100-2.6 Elemanı Deneyi	39
3.5.11. T-200-2.6 Elemanı Deneyi	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. Kırılma Şekilleri	43
4.2. Yük Deformasyon İlişkisi	45
4.3. Taşıma Gücü ve Enerji Sönümlenme Kapasiteleri	45
4.4. Deney Sonuçlarının Deney Değişkenlerine Göre Değerlendirilmesi	46
4.4.1. Etriye Tipi	46
4.4.2. Etriye Aralığı	48
4.4.3. Kesme Açıklığının Faydalı Yüksekliğe (<i>a/d</i>) Oranı	49
5. ANALİTİK ÇALIŞMA	51
5.1. Yönetmelikler ve Modeller	51
5.2. Yönetmelikler	51
5.2.1. ACI 440.1R-15 [3]	51
5.2.2. CSA S806-12 [2]	52
5.2.3. ISIS-M03-07 [24]	53
5.2.4. CNR DT203-06 [25]	54
5.3. Modeller	54
5.3.1. Nehdi et. al. [26]	55
5.3.2. Kara [27]	55

5.3.3. Ali et. al. [1].....	55
5.4. Kesme Kapasitesinin Tahmini.....	56
5.5. Enine Donatı için Hesaplanan Birim Deformasyon	60
5.5.1. CTP Etriye Tipi.....	61
5.5.2. CTP Etriye Aralığı.....	62
5.5.3. Kesme Açıklığının Kiriş Faydalı Yüksekliğine (a/d) Oranı.....	62
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	67



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1. Deney elemanları	16
2. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Silindir Beton Numunelerinin Basınç Dayanımları	18
3. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Küp Beton Numunelerinin Basınç Dayanımları.....	19
4. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Kare Prizma Beton Numunelerinin Eğilmede Çekme Dayanımları	19
5. Deney elemanlarına ait taşıma gücü ve enerji sönümleme kapasitesi değerleri ...	46
6. Kesme kırılmasına uğrayan deney elemanlarına ait karşılaştırmalı kesme hesapları	58
7. CTP donatıların karşılaştırmalı deneysel gerilme değerleri.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1. CTP donatı.....	9
2. Profil çekme yöntemini oluşturan ekipmanlar	13
3. Deney kirişlerinin a/d oranları	16
4. CTP etriye tipleri	16
5. Kirişlerin donatı detayı.....	17
6. Eksenel basınç ve eğilme deney düzenekleri	18
7. Deney düzeneği	20
8. Donatı yerleşmiş kalıp resmi	21
9. Donatı iskeleti.....	21
10. Referans deney elamanı ve elemanın donatı detayları	23
11. Referans deney elemanı kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	24
12. F-100-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	25
13. F-100-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	26
14. F-200-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	27
15. F-200-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	28
16. F-100-2.6 Deney elamanı ve elemanın donatı detayları.....	29
17. F-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	30
18. F-200-2.6 Deney elamanı ve elemanın donatı detayları.....	31
19. F-200-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	32
20. S-100-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	33
21. S-100-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	33
22. S-200-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	34
23. S-200-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	35
24. S-100-2.6 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	36
25. S-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	37
26. S-200-2.6 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	38
27. S-200-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi	39
28. T-100-2.6 deney elamanı ve elemanın donatı detayları	40

29. T-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi.....	41
30. T-200-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları	42
32. Deney elemanlarına ait kırılma modları	44
33. Deney elemanlarına ait yük-sehim eğrileri	45
34. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (Etriye tipi değişkeni)	48
35. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (Etriye aralığı değişkeni)	49
36. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (a/d değişkeni)	50
37. Deney elemanlarına ait ana kesme çatlağı açıları	57



SİMGELER LİSTESİ

a	Kesme açıklığı
A_{fv}	Enine donatı kesit alanı
b_w	Kiriş genişliği
d	Donatı etkili derinliği
E_b	Kirişlerin enerji sönümlene kapasitesi
$E_{reference}$	Referans kirişinin enerji sönümlene kapasitesi
f_c	Beton basınç dayanımı
f_{fv}	Enine donatı gerilmesi
f_t	Betonun karakteristik çekme dayanımı
k	Çatlamış dönüştürülmüş kesit tarafsız eksen derinliği
k_a	Kemer davranışı etki katsayısı
kd	Elastik tarafsız eksen derinliği
k_m	Moment-kesme etkileşimi
k_r	Boyuna donatı eksenel rijitliği
k_s	Boyut etkisi
P_b	Kirişlerin yük kapasitesi
$P_{reference}$	Referans kirişinin yük kapasitesi
s	Etriye aralığı
V_c	Betonun katkısı
V_{cp}	Tahmin edilen beton kesme dayanımı
V_{exp}	Deneysel kesme kuvveti
V_f	Enine donatıların katkısı
$V_{f,exp}$	Deneysel kesme kuvveti
V_{frp}	CTP enine donatısının kesme dayanımına katkısı
V_n	Kesme Dayanımı
λ_a	Kesme mekanizması faktörü
λ_{sh}	En kesit şekil faktörü
ρ_f	Boyuna donatı oranı
τ_r	Tasarım kesme gerilmesi

1. GİRİŞ

Korozyona uğramama özellikleri nedeniyle çelik donatıya alternatif olarak ortaya çıkan lif takviyeli polimer donatıların (FRP) kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Üretildiği lif tipine göre en sık kullanılan türleri cam elyaf (GFRP), bazalt (BFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP)'tir. Ülkemizde GFRP donatılar, sıklıkla Cam Takviyeli Polimer (CTP) ismi ile de anılmaktadır. Maliyeti en düşük ve kullanım alanı en fazla olan FRP donatı tipi, GFRP'dir. GFRP'ler geleneksel çelik donatılardan oldukça farklı mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek çekme ve dayanım, hafif olma gibi avantajları bulunmaktadır. Ancak akma özelliği göstermeksizin düşük birim deformasyon değerlerinde kopması süneklik problemlerine, düşük elastisite modülü değerlerine sahip olması ise kullanılabilirlik sınır durumu problemlerine yol açmaktadır. Ancak çelik donatının korozyonu yapıların kullanım ömrünü kısaltmakta ve önemli bakım onarım maliyetlerine sebebiyet vermektedir. Korozyona uğramama özellikleri CTP donatıların en önemli avantajı olarak gösterilebilir.

Son yıllarda CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları birçok araştırmanın konusu olmuştur. Literatürde yer alan çalışmalar farklı kategorilerde sınıflandırılabilir. Bu kısımda çalışmalar CTP boyuna donatılı kirişlerde CTP etriyeli ve etriyesiz olmak üzere iki başlık altında değerlendirilmiştir.

Aşağıda CTP donatılı kiriş (etriyesiz) çalışmaları yer almaktadır.

Ali et. al. [1] 67 farklı deneysel çalışmadan toplamda 510 adet CTP donatılı kiriş test verisini kullanarak mevcut yönetmelikler ve önerilmiş modeller ile kesme dayanımlarını tahmin etmiştir. Ayrıca çok değişkenli doğrusal olmayan gerilme analizi ile kapsamlı yeni bir model önermiştir. Dikdörtgen kesitli ve $a/d > 2.5$ olan deney elemanlarının kesme dayanımları yönetmelikler içinde en iyi CSA S806-12 [2] yönetmeliği ile tahmin edilmiştir. ACI 440.1R-15 [3] ise oldukça güvenli tarafta kalan tahminlerle deneysel verilerden oldukça düşük kesme dayanımı hesaplamıştır. Mukhtar and Deifalla [4] CTP donatılı ve $a/d < 2.5$ olan kirişlerin mevcut yönetmeliklerle kesme dayanımlarını değerlendirmiştir. Kritik kesme çatlağı teorisini

kullanarak yeni mekanik bir model önermiştir. Değerlendirme için literatürde yer alan 23 farklı çalışmadan toplam 121 CTP donatılı kiriş verisi kullanılmıştır. CSA S806-12 [2] yönetmeliğinin a/d oranı 2.5 tan büyük olması durumunda oldukça iyi tahminler yapıldığını ancak a/d oranının 2.5 tan küçük olması durumunda tahminlerin deneysel verilerden oldukça farklı olduğu ifade edilmiştir. Elghandour et. al. [5] CFRP donatılı kirişlerin kesme davranışlarını numerik olarak araştırmıştır. Numerik model literatürde yer alan deneysel çalışma verileri ile geçerliliği gösterildikten sonra, parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. a/d oranı, boyuna donatı oranı ve beton basınç dayanımının etkileri araştırılmıştır. CTP donatılı kirişlerin kesme dayanımlarının tahmini için yeni bir denklem önerilmiştir. El Zareef et. Al. [6] literatürde yer alan 386 CTP donatılı kiriş deney verisini kullanarak mevcut yönetmelikleri değerlendirmiş ve kesme dayanımı için yeni ifade önermiştir. En doğru ve güvenilir tahminleri CSA S806-12 [2] yönetmeliği ile elde etmiştir. Ancak bu yönetmelikle yapılan tahminlerin $d > 300$ mm ve $a/d < 2.5$ olması durumunda daha güvenli tarafta kalacak şekilde (deneysel verilerden daha düşük) olduğu sonucuna ulaşmıştır. ACI 440.1R-15 [3] yönetmeliğinin ise tahminlerde büyük oranda güvenli tarafta olduğu ifade edilmiştir. Kara and Ashour [7] boyut etkisinin kesme dayanımı üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için CFRP boyuna donatılı ancak etriyesiz 6 adet betonarme kiriş test etmiştir. Ayrıca literatürde yer alan ve $a/d > 2.5$ olan deney elemanlarından 134 farklı test sonucu yardımıyla mevcut kesme tasarım ifadelerini değerlendirmiş ve yeni bir ifade önermiştir. Alguhi and Tomlinson [8] literatürde yer alan ve $a/d > 2.5$ olan toplam 147 CTP donatılı deney verisi kullanılarak mevcut yönetmelik ve modellerin kesme dayanımlarını değerlendirmiştir. Kesme dayanımı etkileyen her parametre çalışmada değerlendirilmiştir. CSA S806-12 [2] yönetmeliği ile Park and Choi [9] modeli ile gerçekleştirilen tahminlerin deneysel verilerle en uyumlu olduğu gösterilmiştir. Alam and Gazder [10] $a/d > 2.5$ olan CTP donatılı kirişlerin kesme dayanımlarının tahmin edilebilmesi için 196 deney elemanına ait deney verisi kullanılarak geliştirilmiş gerilme sinir ağı modeli (generalized regression neural network (GRNN)) geliştirmiştir. Yönetmelikler içerisinde CSA S806-12 [2] en iyi sonuçları verirken, ACI 440.1R-15 [3], JSCE-97 [11] ve BISE-99 [12] ile gerçekleştirilen tahminlerin deneysel verilerden oldukça farklı olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Aşağıda FRP boyuna ve enine donatılı kiriş çalışmaları yer almaktadır.

Liang et. al. [13] CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları ile kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada kesme performansı, kesme kapasitesi, durabilitesi, yangın dayanımı ve gelecekteki ihtiyaçlar üzerinde durulmuştur. Kesme kapasitesini etkileyen parametreler ve hesap yöntemleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Betonun kesmeye olan katkısının önemi vurgulanmıştır. (Betonun dayanımı ve çatlamamış bölgenin derinliği bunlardan en önemlileridir) Lif kullanımının beton çatlama dayanımı ve çatlama sonrası performansı artıracağından kesmeye katkısının önemi vurgulanmıştır. Betonun yanı sıra CTP etriyelerin katkısının da kesme dayanımı için kritik önem arz etmektedir. Ancak CTP etriyelerin büküm noktaları nedeniyle dayanımlarının düştüğü ifade edilmiştir. CTP etriyeler yerine CTP gridlerin kullanımı önerilmiştir. Al-Hamrani and Alnahhal [14] BFRP boyuna donatılar ve GFRP etriyeler kullandığı çalışmada betonarme kirişlerin kesme davranışlarını irdelemiştir. Parametreler olarak; donatı oranı, bazalt makro lif miktarı, a/d oranı ve etriye aralığı seçilmiştir. Donatı oranı ve lif katkısı oranının artışıyla kesme dayanımının arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan 178 deney verisi kullanılarak mevcut modeller ve yönetmelikler değerlendirilmiştir. CSA S806-12 [2] ile iyi bir korelasyon sağlanmıştır. a/d oranının 2.5 tan 3.3 e çıkmasıyla yük kapasitesi 46%'ya düşmüştür. Ayrıca kırılma modu eğik kesmeden basınç kesme kırılmasına dönüşmüştür. Etriye aralığının 250 mmden 170 m ye düşürülmesi ile yük kapasitesi ortalama 20% artış gerçekleşmiştir. Eğik çatlak genişliği ve ilerlemesi azalmıştır. Etriyesiz CTP donatılı deney elemanı ile gerçekleştirilen kesme dayanımı tahminleri ACI 440.1R-15 [3] ile en güvenli tarafta sonuçlar elde edilmiştir. Etriyeli CTP donatılı kirişlerin yönetmeliklerce hesaplanan kesme dayanımlarının tamamının güvenli tarafta olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Han et. al. [15] steel-CTP (hibrit) kompozit boyuna donatılardan ve GFRP etriyeli kesme davranışlarını araştırmıştır. Hibrit boyuna donatılı kirişlerin kesme kapasitesi tahmini için yeni bir yöntem önerilmiştir. Said et. al. [16] CTP boyuna ve enine donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışları ile ilgili deneysel ve analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada a/d oranı 2'ye eşit olup, beton basınç dayanımı ve GFRP etriye oranı parametre olarak seçilmiştir. Etriyesiz deney elemanına göre, 215.8 mm ve 150 mm etriye aralığına sahip olan deney elemanlarının kesme kapasiteleri sırasıyla 41% ve 82% artış göstermiştir. Beton basınç dayanımının 25 MPa dan, 45'e ve 70 MPa değerine artmasıyla birlikte kesme

dayanımları sırasıyla 49% ve 104% artmıştır. Gerilme analizi sonucunda CTP etriyelerin birim deformasyon ifadesi revize edilerek yeni bir model önerilmiştir. Ayrıca bu ifade önceki çalışmalarda yer alan deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Jumaa and Yousif [17] büyük ölçekli ve $a/d=2.6$ olan BFRP boyuna ve enine donatılı kirişleri test etmiştir. Donatı etkili derinliği ve etriye aralığı parametreler olarak tercih edilmiştir. Boyut etkisinin kesme kırılması üzerindeki etkisinin tamamen elimine edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Normalize kesme dayanımı ve etriye birim deformasyon değerlerinin etkili derinlikle ilişkisi tespit edilmiştir. Literatürde yer alan verilerde kullanılarak CTP etriye birim deformasyon limit değeri için bir ifade önerilmiştir. Li et .al. [18] CTP etriyelerin büküm noktalarındaki lif açısının değişimi ve gerilme birikimleri nedenleriyle dayanımlarının düşük olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada karbon kumaşların boyuna ve enine yönde birleştirilerek etriye olarak kullanıldığı betonarme kirişler ile ilgili deneysel ve analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. CFRP kumaş konfigürasyonu ve bindirme detayları parametreler olarak seçilmiştir. Duicet. Al. [19] BFRP donatılı (yapma etriyeli-4 parça) kirişleri test ederek eğilme ve kesme davranışlarını irdelemiştir. BFRP etriyeli deney elemanlarının kesme kırılması neticesinde taşıma gücüne ulaştığı ve CSA S806-12 [2] yönetmeliği ile güvenli tarafta kalan tahminler yapıldığı ifade edilmiştir. Issa et. al. [20] BFRP boyuna donatılı ve BFRP etriyeli/etriyesiz betonarme kirişlerin kesme davranışları üzerine gerçekleştirilmiştir. Etriyesiz kirişler a/d oranı 5.65 ve 7, etriyeli olanların ise 1.5, 2.5 ve 3.5 tur. Kesme dayanımı tahminleri için önerilmiş modeller ve yönetmelikler değerlendirilmiştir. Etriyesiz deney elemanları a/d oranı 5.65 ve 7 olmasına rağmen kesme-çekme kırılması meydana gelmiştir. Donatı oranının artmasına bağlı olarak daha gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Tüm deney elemanları için ACI 440.1R-15 [3] oldukça güvenli tarafta kalan sonuçlar verirken, CSA S806-12 [2] ise etriyesiz ve düşük donatı oranına sahip deney elemanları ile etriyeli ve yüksek a/d oranına sahip deney elemanlarında deneysel verilerden daha yüksek tahminler gerçekleştirmiştir.

Yönetmeliklerde ve önerilen modellerde CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme hesapları yapılırken iki temel bileşenin katkısı dikkate alınmaktadır:

- Betonun katkısı (V_c)
- Enine donatıların katkısı (V_f).

Etriyesiz CTP donatılı kiriş kesme dayanımı yalnızca V_c 'ye göre, CTP etriyeli kiriş kesme dayanımı ise $V_c + V_f$ dikkate alınarak hesap edilmektedir. FRP donatılı kirişlerde kesme kuvveti öncelikle yalnızca beton tarafından karşılanır. Betonda diyagonal çatlama meydana geldikten sonra enine donatıların da kesme katkısı vermeye başlamasıyla kesme tesiri iletim mekanizması oluşur. Bu durumda, beton basınç dayanımı ve CTP enine donatıların dayanımları, kiriş kesme dayanımını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerdir.

Betonun kesme katkısı üzerinde beş temel faktörden bahsedilebilir:

- 1) Basınç bölgesindeki çatlamaş betonadaki kesme gerilmeleri
- 2) Agrega kenetlenmesi
- 3) Çatlaklar boyunca doğrudan iletilen artık çekme gerilmeleri
- 4) Boyuna donatının kaldıraç etkisi
- 5) kemer etkisi

CTP donatıların elastisite modülü değerlerinin çelik donatılara göre düşük olması sebebiyle, CTP donatılı kirişlerdeki çatlak genişlikleri ve derinlikleri çelik donatılı kirişlere göre daha büyük olmaktadır. Çatlakların daha fazla ilerlemesi basınç bölgesinin daralmasına yani çatlamaş bölgedeki beton kesme dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca daha geniş çatlaklar agrega kenetlenmesini, çatlaklar boyunca doğrudan iletilen artık çekme gerilmelerini ve boyuna donatıdaki kaldıraç etkisini azaltmaktadır. Bahsedilenlerin tamamı, CTP boyuna donatıların düşük aksel rijitliğinin kiriş kesme dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini göstermektedir.

Kirişlerde kemer etkisinin ortaya çıkması kesme açıklığının (a) donatı etkili derinliğine (d) oranı ile ilişkilidir. a/d oranı 2.5'tan küçükse gergili kemer davranışı (arc action) gözlemlenmekte, ancak a/d oranı 2.5'tan büyükse kemer etkisi gözlemlenmemektedir [21].

CTP donatılar çelik donatılar gibi bükülememektedir. Bu sebeple CTP etriyeler fabrikada üretilmekte ve kanca açıları 90° olmaktadır. Fabrikasyon üretimde; farklı ebatlar için farklı kalıplara ihtiyaç duyulmakta ve üretim işlemleri zaman almaktadır. Ayrıca CTP etriye üretimi maliyetli hale gelmektedir. CTP donatılardan etriye üretilmesi esnasında, CTP etriyelerin büküm noktalarında dayanım azalması problemi ortaya çıkmakta ve bu kısımdaki dayanım düz kısımların çekme dayanımından düşük

olmaktadır. Büküm noktalarındaki lif açısının değişimi ve gerilme birikmeleri dayanımın düşmesine sebep olmaktadır. Bu azalma sebebiyle, CTP etriyelerin tam kapasiteleri kullanılamamaktadır. CTP büküm noktasındaki dayanım zayıflığı nedeniyle farklı yönetmelikler bu etriyeler için farklı birim deformasyon sınır değerleri önermektedir. ACI 440.1R-15 [3], CSA S806-12 [2] ve JSCE-97 [11] sırasıyla 0.004, 0.005 ve 0.0025 birim deformasyon değerlerini önermektedir.

CTP etriyelerin ekonomik ve pratik olmayan fabrikasyon üretimleri ile etriyelerdeki dayanımın düz donatı dayanımına göre düşük olması, bu etriyelerin betonarme kirişlerde yaygınlaşması önündeki en büyük engeller olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak; CTP donatılı betonarme kirişlerde kullanılan kesme donatısı, CTP düz donatıdan kesilmiş dört ayrık çubuğun bağ teli ile birleştirilmesi ve iki düşey ayrık çubuğun enine donatı olarak kullanılması neticesinde oluşturulmuştur. Ayrıca etriye tipi etkinliğinin anlaşılabilmesi adına çalışmaya fabrikasyon (kapalı) üretim tipi CTP etriyeli kirişler de dahil edilmiştir. Ana deney parametrelerinin CTP etriye tipi, etriye aralığı ve a/d oranı olarak belirlendiği çalışmada CTP donatılı kirişlerin kesme davranışları irdelenmiştir. Ayrık CTP etriyeli elemanların eğilme davranışlarının, taşıma gücü ve enerji sönmüleme kapasitesi değerlerinin kapalı CTP etriyeli betonarme kirişlerle kıyaslanması ile ayrık etriye kullanımının etkin olup olmadığına karar verilmesi hedeflenmiştir.

2. CTP DONATILAR

Cam elyaf takviyeli (CTP) polimer donatı, yüksek dayanımlı cam elyaf liflerinin polimer reçinesi içerisine gömülerek oluşturulan bir donatı çubuğudur. CTP donatı, lifli yapıya sahip bir malzeme olması nedeniyle genellikle çekme gerilmelerini karşılamakta etkindir. CTP donatılar yüksek korozyon ve çekme dayanımına sahip olmalarının yanında hafif bir yapı malzemesi olmaları nedeniyle, klasik çelik donatılara önemli bir alternatif ortaya çıkmış ve son yıllarda kullanımları oldukça yaygınlaşmıştır. CTP donatı Şekil 1’te gösterilmiştir. CTP donatı üretiminde E- ve S- tipi çelik liflerin yanı sıra, epoksi, polyester ve vinilester reçine çeşitleri kullanılmaktadır.

2.1. Lifli Polimer Donatıların İç Yapısı

2.1.1. Cam Lifler

Cam lifler, lifli polimer donatıların üretiminde kullanılan en yaygın malzemelerden biridir. Cam liflerinin diğer liflere oranla maddi değerinin düşük olması yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebeplerindedir. Cam lifleri içerisinde silika (SiO_2) ve düşük miktarda diğer inorganik oksitler bulunmaktadır. Cam lifleri esnek ve dayanıklı olmalarına karşılık bazı inşaat uygulamaları için gerekli dayanıma sahip değildir. Cam liflerinin kendilerine has dayanım özelliklerinden ve ekonomik olmaları sebeplerinden dolayı inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan lif tipi olmuştur.

2.1.2. Karbon Lifler

Karbon lifler havasız ortamda poliakrilonitril’ in ısıtılması ($1000-1500^0 \text{ C}$) ile üretilmektedir. Karbon lifler boyutsal açıdan kararlı olması, neme ve birçok kimyasallara direnç göstermesi sebepleri uygulamalardaki en önemli avantajları arasındadır. Karbon lifleri güçlü ve hafif bir malzeme olmasına karşın en önemli dezavantajı yüksek maliyetli olmasıdır.

2.1.3. Polimer Lifler

Polimer lifler geneli istenilen dayanımı verememektedir. Polimer liflerin arasında bulunan aramid lifleri ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifler yüksek mekanik özelliklerine sahiptirler. Aramid, aromatik liflere verilen genel bir isimlendirmedir ve ticari adı ise kevlar olarak bilinmektedir. Aramid liflerin mekanik özellikleri genellikle düşük yoğunlukta, sert ve darbe direnci yüksektir. Aramid lifler cam liflere karşılık olarak dayanımları daha yüksek ve elastisite modülleri daha fazladır. Böylece içerisinde bulunduğu donatının darbe direncini artırarak daha yüksek gerilme dayanımı gösterirler.

2.1.4. Matris

Kompozit yapı içerisindeki lifleri bir arada tutarak dayanımını artıran yapıya matris adı verilir. Kullanım yerlerine göre farklı tipte matrisler seçilir. Vinilester reçineler su emme özellikleri çok düşük ve kimyasallara karşı dirençleri daha yüksektir. Bu durum cam liflerin kullanımında olumlu sonuçlar vermektedir. Fakat yüksek sıcaklık uygulamalarında vinilester ve poliester-stiren sistemleri uygun olmamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda en uygun matris olarak epoksi reçineleri karşımıza çıkmaktadır. Epoksi reçineleri ise 160⁰C' ye kadar kullanılması uygun olabilmektedir. Bu sıcaklık değeri ise geçek manada yüksek bir sıcaklık değeri olarak kabul edilememektedir.

Kompozit yapıyı bir arada tutarak mekanik özelliklerine katkı sağlayan malzemeye reçine denir. Donatıya istenen özelliklerin sağlanması için dolgu malzemeleri ve katkı malzemeleri kullanılır.

CTP donatılarının kullanım alanlarına göre üretim metotları değişiklik göstermektedir. CTP (GFRP) donatı profil çekme (Pultruzyon) Metodu kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntem ile klasik çelik donatıların bir alternatifi olarak kullanılan CTP (GFRP) kompozit donatı; cam elyaf fitillerinin bir çekme düzeneği barındıran proseste reçine banyosundan geçirilerek profiller halinde kalıplanması yapılarak üretimi gerçekleştirilmektedir. CTP donatı içerisinde mekanik özelliklerini iyileştirmesi görevini gören cam elyafı ve çevresel etkilere ve yük altında oluşabilecek deformasyonlara karşı önleyici olarak matristen oluşmaktadır. CTP donatı matrisi içerisinde polyester, dolgu malzemesi, boya ve kimyasal reaksiyonlar için gerekli hammaddelerden oluşmaktadır.



Şekil 1. CTP donatı

2.2. CTP Üretimi

CTP donatıların üretiminde kullanılan teknikler işçilik maliyetlerine, üretim sürecine, gerekli donanım yatırımlarına ve işçilik kalitesi gibi faktörlere bağlı olarak şekillenmektedir. CTP donatının mekanik özelliklerini etkileyen faktörler içerisinde kullanılan lif türüne, matris çeşidine, lif/matris oranına ve lif yönlerine göre farklılıklar göstermektedir. CTP üretimi için kullanılan başlıca yöntemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- El Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi
- Püskürtme (Sprey Up) Yöntemi
- Reçine Transfer Kalıplama (RTM) – Reçine Enjeksiyonu Yöntemi
- Hazır Kalıplama (Compressing Molding) Yöntemi
- Islak Sistem Pres Kalıplama Yöntemi
- Vakum Bonding (Vakum Bagging) Yöntemi
- Otoklav (Autoclave Bagging) Yöntemi
- Devamlı Levha Üretimi Yöntemi
- Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi
- Profil Çekme – Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi

2.2.1. El Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi

Bu yöntem geniş yüzeye sahip CTP' nin kalıplanabilmesi için en uygun yöntemler arasında bulunmaktadır. Bu yöntemde kalıp ayırıcı kalıp yüzeyine uygulandıktan sonra polyeester reçine türü olan jelkot, yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve elyafın

görünürlüğünü kaybetmek amacı ile kalıp yüzeyine ince bir tabaka oluşturacak şekilde sürülerek veya püskürtülerek uygulanmaktadır. Jelkot tabakasının sertleşmesinin hemen ardından keçe veya dokuma tipi elyafı ve polyester bağlayıcı fırça veya rulo yardımı ile uygulanmaktadır. Düşük maliyetli bir kalıplama yöntemi olan El Yatırma yönteminin üretim kapasitesi kalıp sayısına, işçilik yoğunluğuna ve işlem karmaşıklığına göre değişkenlik göstermektedir. Bu yöntem ile günde ortalama 2 ürün alınabilmektedir.

2.2.2. Püskürtme (Sprey Up) Yöntemi

El yatırması metodunun seri olarak uygulanabilirliğini sağlayan açık kalıplama metodudur. Bu yöntem ile iç boşluk ve karışım oranı hataları oldukça azaltılmaktadır. Bu yöntemde kalıp üzerine polyester ve elyaf özel bir tabanca yardımı ile beraber püskürtülmektedir. Bu yöntemde kullanılan püskürtme tabancası basınçlı hava ile çalışan bir pompa sisteminden oluşmaktadır. Geniş yüzeylere sahip CTP malzemelerin seri üretimine olanak sağlarken işçilik maliyetlerinde önemli ölçüde azalma sağlamaktadır.

2.2.3. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) – Reçine Enjeksiyonu Yöntemi

Geniş yüzeye sahip malzemelerin üretiminde el yatırması ve püskürtme yöntemlerinin hız ve ürün kalitesinde yetersiz kalması sebepleri sonucunda geliştirilmiş olan bir yöntemdir. Bu üretim yönteminde iç içe geçebilen iki ayrı kalıp sistemi kullanılarak her iki yüzeyin düzgün ve istenilen şekilde malzemenin üretimine olanak sağlamaktadır. Reçine enjeksiyonu için üretilmiş olan özel keçe elyaf kalıp yüzeyine yerleştirildikten sonra kalıplar kapatılmaktadır. Daha önceden hazırlanmış olan kanallar yardımı ile bağlayıcı kalıp içerisine basınçlı olarak enjekte edilmektedir. Özetle bu yöntem ile el yatırması ve muadili yöntemlere kıyasla oldukça seri üretim yapılabilmekte olup, üretimi gerçekleştirilen malzemenin işçilik kalitesi yüksek ve daha ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2.4. Hazır Kalıplama (Compressing Molding) Yöntemi

Üretimi gerçekleştirilecek malzemenin boyutu ve et kalınlıklarına göre 3-6 dakikalık kalıplama süresi sağlayan oldukça hızlı ve seri üretime olanak sağlayan bir yöntemdir. Kalıpları Reçine enjeksiyonu yönteminde de kullanılabilir. Bu yöntemde

kullanılan bağlayıcılar yüksek reaksiyon veren ve kimyasal olarak viskozitesi yüksek, izoftalik veya ortoftalik polyester reçineler kullanılmaktadır.

2.2.5. Islak Sistem Pres Kalıplama Yöntemi

Bu yöntem seri olarak üretim yapma ve her iki yüzeyide düzgün ürünler elde etmek için kullanılan bir kalıplama yöntemidir. Dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp hazırlanarak üretim gerçekleştirilmektedir. İki kalıp arasında ürün kalınlığı kadar boşluklar bırakılarak basınç uygulanması sırasında reçinenin kalıp içerisinde ilerleyebilmesi için hava tahliye kanalları bulunması gerekmektedir. Bu yöntemde kalıbın dışarısından ısıtılmasına gerek yoktur. İlk kalıplama esnasında meydana gelen egzotermik reaksiyon sayesinde kalıp içi ısınarak kalıplama süresini kısaltmaktadır. Basıncın kalıp yüzeylerine eşit bir şekilde yayılması için genellikle ahşap, çelik veya beton takviyeler kullanılmaktadır.

2.2.6. Vakum Bonding (Vakum Bagging) Yöntemi

Vakum Bonding yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak vakum pompası, vakum torbası ve sızdırmazlık bantlarıdır. Bu yöntem ile üretimi gerçekleştirilecek kompozit malzeme önce bir kalıba konur daha sonra vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. Vakum torbası içerisindeki havanın tahliye edilmesi ile malzeme üzerine 1 atmosferlik basınç uygulanarak tüm birleşim bir fırın içerisine yerleştirilip ısıtılarak reçinenin kürlenmesi sağlanır. Bu yöntem genellikle elyaf sarma ve el yatırma teknikleri ile birlikte kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin tamiratından sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2.7. Otoklav (Autoclave Bagging) Yöntemi

Bu yöntem boru, tank ve direk gibi silindirik ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. Elyaf sarma yönteminden farklı olarak cam elyafın sürekli olmayışı ve parçacık şeklinde bağlayıcı ile beraber püskürtülmesi ile üretilmesidir. Kalıbın döndürülmesi ile elde edilen merkez kaç kuvveti, kompozitin kalıp yüzeyine her iki yüzeyde de homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem genellikle çapı 5 m' ye kadar olan boruların üretiminde kullanılmaktadır. Üretimi gerçekleştirilen borular da her iki yüzeyi düzgün olmakta ve yüzeylerinde hava kabarcıkları bulunmamaktadır. Kalıbın dönüş hızı kalıp çapına göre değişkenlik göstermektedir. Kalıbın döndürülmesi kalıp içerisindeki ürünün sertleşmesine kadar devam etmektedir.

2.2.8. Devamlı Levha Üretimi Yöntemi

Bu yöntem sadece her iki yüzü düzgün oluklu veya oluksuz şeffaf ya da opak levha üretiminde kullanılmaktadır. Üretimi gerçekleştirecek malzemenin takviye, bağlayıcı ve katalist malzeme karışımı film tabakaları arasına yerleştirilir ve ardından preslenerek bağlanmaktadır. Sonrasında fırın içerisinde ısıtılarak istenilen formda malzeme üretilmektedir. Işığı geçiren bir yapı elde edebilmek için cam takviyesinin toz bağlayıcılı bir keçe olarak ya da kırılmış demet olarak kullanılması gerekmektedir. Ayrıca polyester reçine ile elyafın ışık kırılma indisi eşdeğer olması gerekmektedir.

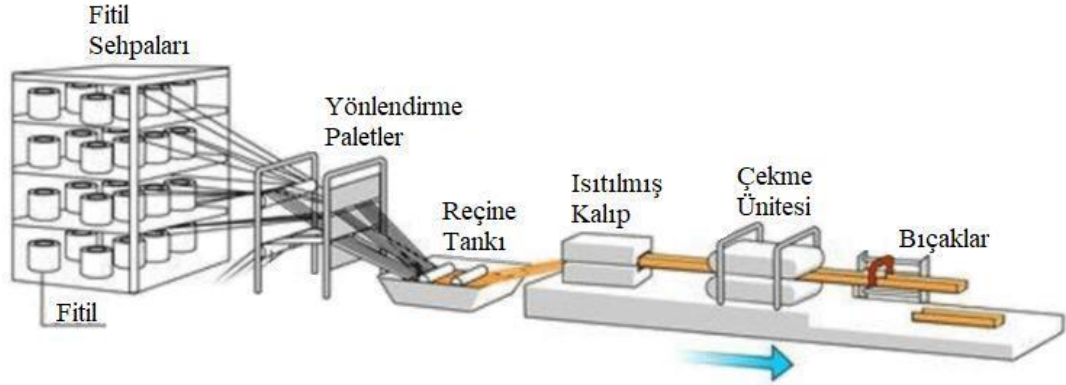
2.2.9. Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi

Bu yöntem genellikle boru ve silindirik tank gibi ürünlerin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Elyaf sarma yönteminde takviye olarak sürekli cam elyaf lifler kullanılmaktadır. Bu yöntemde bağlayıcı olarak genellikle polyester ya da epoksi reçineleri kullanılmaktadır. Ayrıca özel amaçlı üretilmesi istenen ürünün özelliklerine uygun olarak silikon, fenolik, düşük yoğunluklu hidrokarbonlar ve polimide reçinelerde kullanılabilir. Sürekli cam elyafından fitillerin bağlayıcı banyosunda ısıtılmasının ardından dönen bir kalıp yüzeyine belirli açılarda sarılması tekniği ile üretimi gerçekleştirilmektedir. Sarım işlemi kompozit malzemenin karşılaması gereken yüklerin büyüklüklerine göre farklı açılarda ve çok katmanlı olarak üretilmesine imkan sağlamaktadır. Sarım işlemini gerçekleştiren manuel ve bilgisayarlı makineler mevcuttur.

2.2.10. Profil Çekme – Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi

Sürekli fitil cam elyafın bağlayıcı reçine içerisinden geçirilerek 120-150 °C' ye ısıtılmış kalıp içerisinden çekilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. İçerisindeki elyaf takviyesinin yönünde çok dayanıklı bir ürün elde edilmektedir. Üretilen profillerin yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra kolaylıkla işlenebilir olmasıyla birlikte sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem ile karmaşık geometriye sahip şekiller kolaylıkla üretilebilmekte ve istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için uygun farklı elyaf katmanları ve kombinasyonları kullanılarak CTP üretimine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemde ayrıca genellikle izoftalik polyester bağlayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemde ortoftalik, teraftalik polyester, vinilester ve termoplastik bağlayıcılar da kullanılabilir. Söz konusu bu yöntem ile elyafın

büyük bir kısmı çekme dayanımı doğrultusunda yerleştirildiğinden eksenlerine dik gelen yükleri karşılamaları oldukça zayıftır. Profil çekme yöntemini oluşturan ekipmanlar Şekil 2’te gösterilmiştir.



Şekil 2. Profil çekme yöntemini oluşturan ekipmanlar

2.3. CTP Donatı Başlıca Avantajları

Çelik donatı korozyona uğraması nedeniyle yapı ömrü oldukça kısalmakta ve bakım onarım maliyetleri ortaya çıkmaktadır. CTP donatılar yüksek korozyon ve çekme dayanımına sahip olduklarından çelik donatıların en önemli alternatifi olarak görülmektedir. CTP donatısını oluşturan bileşenlerin tamamı paslanmaya ve çürümeye karşı dayanımları oldukça fazladır. CTP donatılar asitlerin, tuzların ve alkalilerin etkisi altında fiziksel ve kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. CTP donatıların bir diğer avantajı da çelik donatılara göre oldukça hafif bir yapı malzemesi oluşudur. Bu hafiflik, mevcut yapının ölü yükünü azaltmakta olup, nakliye ve işçilikte kolaylık sağlamaktadır. CTP donatıların manyetik olmama ve elektriği iletmeme özellikleri düşünüldüğünde bazı yapılarda (elektrik direkleri, trafolar, santraller ve alt yapı vb.) kullanımı önemli avantaj sağlamaktadır. (hastane MRI) Nervürlü olarak üretilebilen CTP donatılar beton ile yeterli aderansa sahip olup beton ile uyumlu çalışmaktadırlar. Kullanılacak özel tip reçine ve kimyasal katkıları ile kimyasal ve yanma dirençleri artırılabilir.

2.4. CTP Donatı Dezavantajları

CTP donatılar lifli yapıda olmaları nedeniyle basınç dayanımları çok düşüktür. Bu sebeple genellikle eğilme elemanlarında tercih edilirler. CTP donatılar akma özelliği göstermeden düşük birim deformasyon değerlerinde ani olarak kopmaktadırlar. Sünek

malzemeler, darbe veya sismik davranışlarda enerjinin dağılmasına, olası bir yapısal sorunu bildirecek bu kuvvetlerin pozitif bir şekilde yeniden dağılmasına olanak sağlamasıdır. CTP malzemelerinin sünek olmaması tasarımında aşırı deformasyonlarla güvenli ve yavaş ilerleyen bir hasar oluşumu olacak şekilde bir dizi hasar mekanizmaları oluşturularak tasarlanabilir. Bu nedenle tasarımlarda denge üstü donatılı olarak tasarlanırlar. CTP donatıların bir diğer önemli dezavantajı da elastisite modülünün çelik donatılara nispeten oldukça düşük oluşudur. Elastisite modülünün düşük olması, aynı yükler altında daha büyük deformasyonların ve çatlakların oluşmasına neden olur. Yapıların kullanım sınır durumlarında bu durum dikkate alınmalıdır. CTP donatıların bir diğer dezavantajı da çelik donatılar gibi bükülememesidir. Bu sebeple özellikle enine donatıların (etriye) üretimi fabrikasyon üretimi zorunludur. Bu da özel kalıp ve işçilik gerektirdiğinden maliyetleri artırmaktadır.

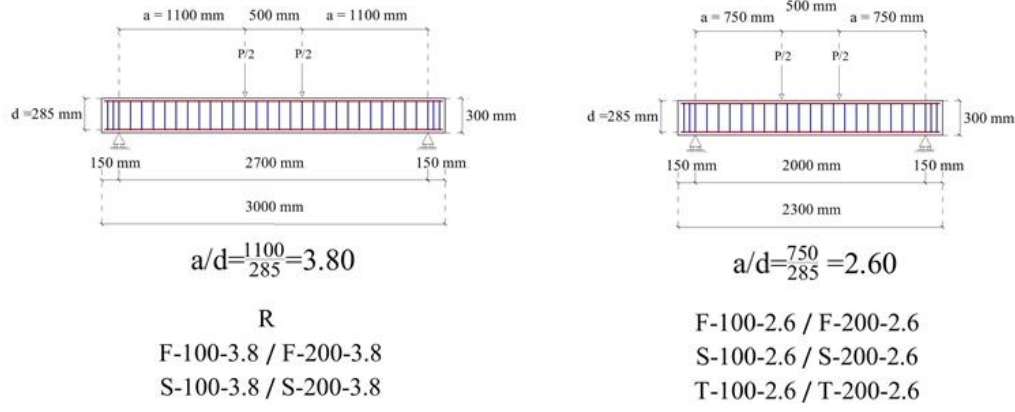
2.5. CTP Donatı Kullanım Alanları

Cam elyaf takviyeli polimer donatılar betonarme yapı elamanlarının tamamında donatı olarak kullanılabilir. Örneğin temel, kolon, kiriş, perde ve döşemelerde kullanılabilir. Ayrıca su ile temasta olan bütün yapılarda (iskele, kıyı koruma yapılarında, barajlarda, sahillerde, dalga kıranlarda, sulama kanallarında, seralarda v.b.) kullanılabilir. CTP donatıların manyetik geçirgenliği olmaması nedeniyle elektrik direkleri, trafolar ve elektrik santrallerinde de kullanılabilir.

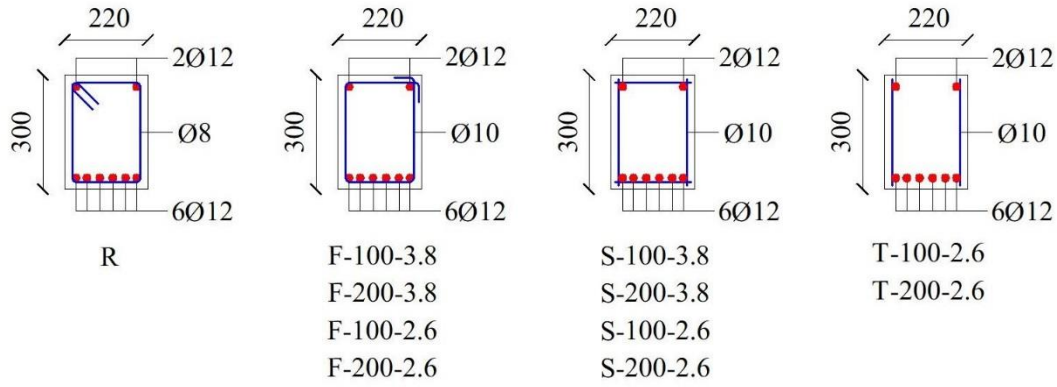
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Elemanları

Çalışmada yer alan 11 deney elemanın tamamı 220 mm genişlik ve 300 mm yükseklik değerlerine sahiptir. Bu elemanlardan beş tanesi 3000 mm (2700 mm net açıklıklı), altı tanesi ise 2300 mm (2000 mm net açıklıklı) uzunluktadır. Çalışmada üç temel deney değişkeni mevcuttur ve deney elemanları bu değişkenler esas alınarak hazırlanmıştır. Bu değişkenler; a/d (kesme açıklığı-faydalı yükseklik) oranı, etriye tipi ve etriye aralığıdır. 3000 mm ve 2300 mm olan kiriş uzunlukları, iki farklı a/d oranına (sırasıyla yaklaşık 3.8 ve 2.6) karşılık gelecek şekilde seçilmiştir (Şekil 3). Çalışmada 10 mm çaplı üç farklı tipte CTP etriye (Şekil 4) kullanılmıştır. İlk etriye tipi, fabrikasyon üretim olan kapalı etriye; ikincisi dört ayrık çubuğun bağ teli ile birleştirilmesinden oluşturulmuş olan ayrık çubuk etriye tipidir. Sonuncusu ise yalnızca iki düşey çubuğun kullanıldığı iki çubuklu etriye tipidir. Etriye aralıkları 100 mm ve 200 mm olarak seçilmiştir. a/d oranı yaklaşık 3.8 olan ve çelik etriyeli (100 mm aralıklı) bir referans eleman, CTP etriyeli tüm deney numunelerinin eğilme kapasitesine ulaşamaması ihtimaline karşı çalışmaya dahil edilmiştir. Deney elemanları ile ilgili detaylar Çizelge 1’de, donatı detayları ise Şekil 5’de yer verilmiştir. Eleman isimlendirmelerinde ilk büyük harf elemanın etriye tipini göstermektedir. Kapalı etriye “F”, ayrık çubuklu etriye “S”, düşey iki çubuk etriye “T” ve çelik etriyeli referans numune ise “R” ile gösterilmiştir. “100” ve “200” sayıları etriye aralıklarını milimetre cinsinden ifade ederken “3.8” ve “2.6” sayıları ise kirişlerin a/d oranlarını simgelemektedir. Tüm deney elemanlarında çekme bölgesinde ve basınç bölgesinde sırasıyla altışar ve ikişer adet 12 mm çaplı CTP donatı kullanılmıştır.



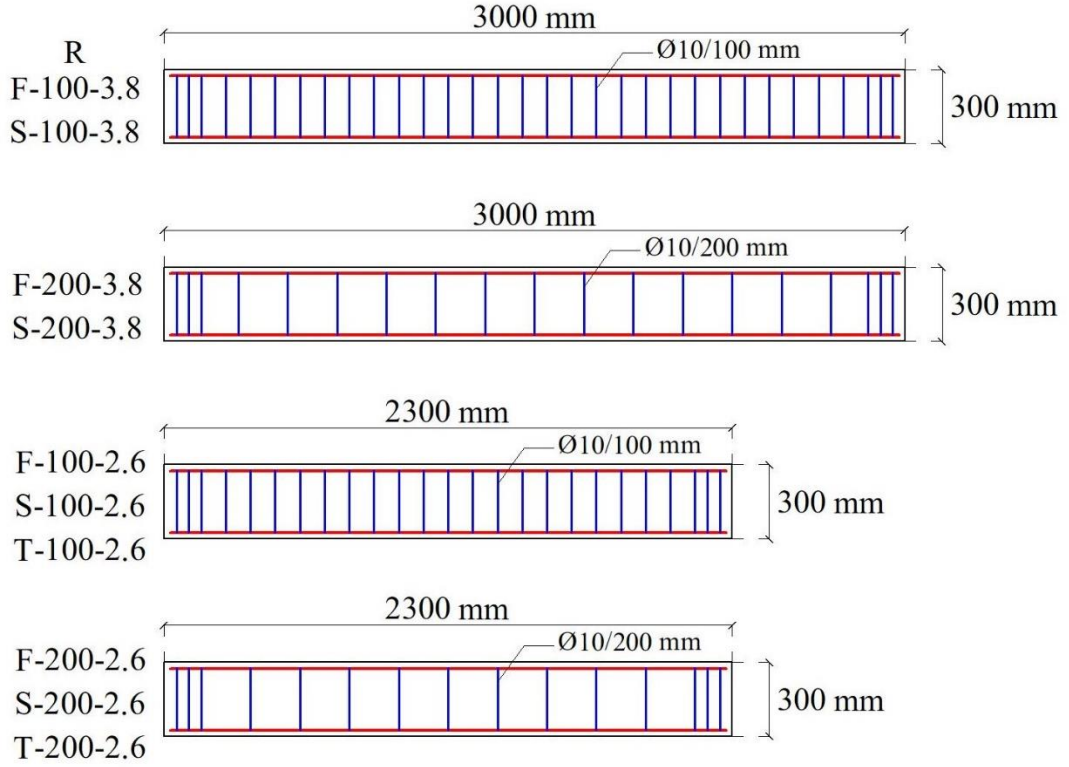
Şekil 3. Deney kirişlerinin a/d oranları



Şekil 4. CTP etriye tipleri

Çizelge 1. Deney elemanları

Kiriş	Etriye tipi	Etriye aralığı (mm)	a/d oranı
R	Çelik Kapalı	100	3,80
F-100-3.8	CTP Kapalı	100	3,80
F-200-3.8	CTP Kapalı	200	3,80
F-100-2.6	CTP Kapalı	100	2,60
F-200-2.6	CTP Kapalı	200	2,60
S-100-3.8	CTP Ayırık Çubuk	100	3,80
S-200-3.8	CTP Ayırık Çubuk	200	3,80
S-100-2.6	CTP Ayırık Çubuk	100	2,60
S-200-2.6	CTP Ayırık Çubuk	200	2,60
T-100-2.6	CTP Düşey İki Çubuk	100	2,60
T-200-2.6	CTP Düşey İki Çubuk	200	2,60



Şekil 5. Kirişlerin donatı detayı

3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri

Tüm deney elemanlarının betonu tek seferde dökülerek hazırlanmıştır. Taze betondan alınan 20 adet 150 x 150 x 150 mm küp numunenin ortalama dayanımı 26.73 MPa ve 10 adet 100 x 200 mm silindir numunenin ortalama basınç dayanımı ise 21.33 MPa'dır. Tüm deney elemanlarının ortalama silindir basınç dayanımı 21.92 MPa olarak hesaplanmıştır. 100x200 mm boyutlu silindir numunelerin ortalama dayanımını, standart (150x300 mm) silindir dayanımına dönüştürülürken 1.05 katsayısına bölünmüştür. Ayrıca küp numune dayanımları standart silindir dayanımına dönüştürülürken 0.85 katsayısı ile çarpılmıştır. Çalışmada ayrıca altı adet 150x150x600 mm ebatlı kare prizma numunenin iki noktalı yükleme testleri gerçekleştirilerek, betonun ortalama eğilmede çekme dayanımının 3,55 MPa olduğu belirlenmiştir. Şekil 6'da küp/silindir eksenel basınç test düzeneği ile prizma numune eğilme deney düzeneklerine yer verilmiştir. Çizelge 2'de silindir, Çizelge 3'de küp ve Çizelge 4'de ise kare prizma deney elemanlarının sonuçlarına yer verilmiştir. CTP donatılı elemanlarda Ø12 boyuna donatı ile Ø10 etriye tercih edilmiştir. Firmadan

alınan katalog değerlerine göre CTP donatıların çekme dayanımı yaklaşık 1300 MPa ve elastisite modülü yaklaşık 55 GPa'dır.



Şekil 6. Eksenel basınç ve eğilme deney düzenekleri

Çizelge 2. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Silindirik Beton Numunelerinin Basınç Dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Boyut Etkisi	f_c (MPa)
1. Test	100 x 200 mm	1,05	19,90
2. Test	100 x 200 mm	1,05	20,26
3. Test	100 x 200 mm	1,05	22,07
4. Test	100 x 200 mm	1,05	18,54
5. Test	100 x 200 mm	1,05	20,51
6. Test	100 x 200 mm	1,05	20,04
7. Test	100 x 200 mm	1,05	21,59
8. Test	100 x 200 mm	1,05	22,62
9. Test	100 x 200 mm	1,05	19,06
10. Test	100 x 200 mm	1,05	18,57

Çizelge 3. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Küp Beton Numunelerinin Basınç Dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Geometri Etkisi	f_c (MPa)
1. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,21
2. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	20,71
3. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	21,55
4. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	21,27
5. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	24,58
6. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,87
7. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	21,22
8. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,04
9. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,71
10. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,41
11. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,87
12. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,46
13. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,46
14. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,51
15. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,24
16. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,40
17. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	22,48
18. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,00
19. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,66
20. Test	150 x 150 x 150 mm	0,85	23,83

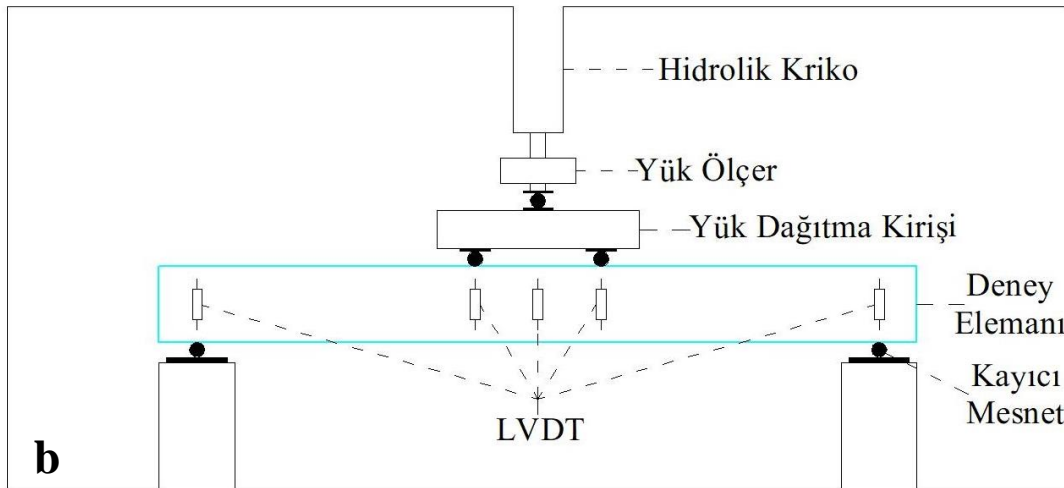
Çizelge 4. Deney Elemanlarının Dökümü Esnasında Beton Karışımından Alınan Kare Prizma Beton Numunelerinin Eğilmeye Çekme Dayanımları

Test No	Numune Ebatları	Momet (kN.m)	f_{ctf} (Mpa)
1. Test	150 x 150 x 600 mm	2600,33	4,62
2. Test	150 x 150 x 600 mm	1754,36	3,12
3. Test	150 x 150 x 600 mm	1779,81	3,16
4. Test	150 x 150 x 600 mm	1980,63	3,52
5. Test	150 x 150 x 600 mm	1881,63	3,35
6. Test	150 x 150 x 600 mm	1984,87	3,53

3.3. Deney Düzeneği

Deneyler, Kırıkkale Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarında yer alan deney çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yük, sisteme hidrolik kriko yardımıyla iletilmiş ve yük hücresi ile ölçülmüştür. Yük dağıtma kirişi aracılığı ile deney kirişlerine iki noktalı yükleme (dört noktalı eğilme) uygulanmıştır. Yükleme noktaları, açıklık ortasından

250'şer mm uzaklıkta yer almaktadır. Düşey sehim ölçümleri için altı adet potansiyometre kullanılmıştır. Sehim ölçümleri kirişin orta noktasının ön ve arka yüzünden, her iki mesnet hizasından ve her iki yük noktasından alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 7(a-b)'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Deney düzeneği

3.4. Deney Elemanlarının Hazırlanışı

Kontraplak kalıpları temin edilerek, deney elemanlarının tasarlanan ölçülerde oluşturabilmek için taban, yan kanatlar ve başlık kalıpları bu kalıpların belirli ölçülerde kesilmesi ile oluşturulmuştur. Kalıpların birleştirilmesinde köşebent levha ve lama birleştirme malzemeleri kullanılmıştır. Kalıplara beton yerleştirilmesi esnasında kalıpların açılmaması için donatı iskeletleri yerleştirildikten sonra üst sıralara ahşap kuşaklar vidalanmıştır. Donatı yerleştirilmiş kalıp resmi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Donatı yerleşmiş kalıp resmi

Donatı iskeletleri etriyelerin basınç ve çekme donatılarını sargılaması şeklinde kılavuz olarak kullanılmış ve bağ teli yardımı ile tasarımda belirlenen yerlerine sabitlenmiştir. Kalıpsız donatı iskeleti Şekil 9’te gösterilmektedir.



Şekil 9. Donatı iskeleti

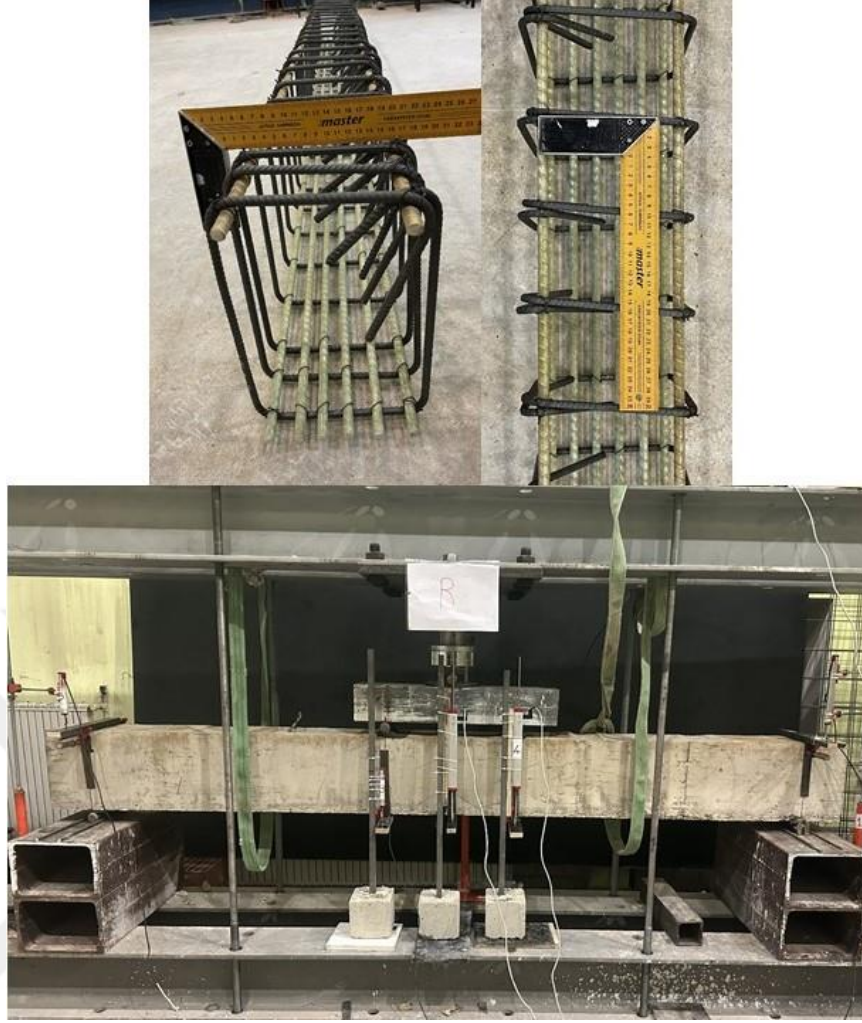
Deney elemanlarının betonu hazır beton firmasından alınmış ve tek seferde dökümü gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları ve beton numunelerinin tamamı aynı ortamda bulundurulmuş ve aynı çevresel etkilere ve kür koşullarına maruz kalmaları sağlanmıştır. Deney elemanları ve beton numunelerinin tamamı yedi gün boyunca sabah akşam sulanmıştır. Kalıplar beton dökümünden yedi gün sonra açılmıştır.

3.5. Deneyler

Beton dökümünden 28 gün sonra deney elemanlarının eğilme testlerine başlanmıştır. Deney elemanlarının her biri deney düzeneğine simetrik ve merkezi olarak yerleştirilmiş ve her deney öncesi test için gerekli ölçüm cihazlarının kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Kirişlerin deney düzeneğine yerleştirilmesinden hemen sonra meydana gelebilecek olumsuz durumlara karşı, kirişler çerçeveye halatlar ile gergin olmayacak şekilde bağlanmış ve deney güvenliği sağlanmıştır. Testlerin başlamasından itibaren yük ve yer değiştirme verileri eş zamanlı olarak veri toplayıcı ile elde edilmiştir. Ayrıca deneyler esnasında kiriş üzerinde oluşan çatlaklar gözlemlenmiş ve oluşan her çatlak kiriş üzerine kalem yardımı ile işaretlenmiştir. Deneylerde gözlemlenen eleman davranışları ve alınan ölçümler aşağıda özetlenmiştir.

3.5.1. R Elemanı Deneyi

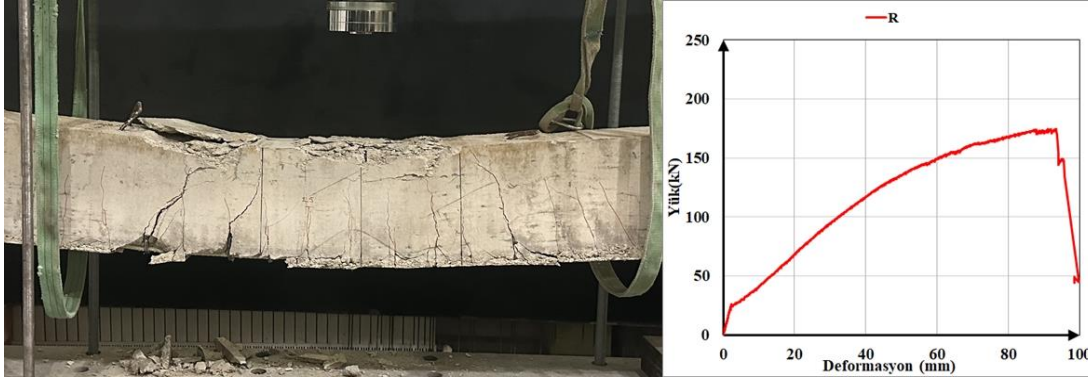
R deney elemanı çelik etriyeli ($\emptyset 8/100$ mm) referans kiriştir. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi 6 $\emptyset 12$ CTP donatı mevcuttur. Kapalı CTP etriyeli deney elemanlarının eğilme kapasitelerine ulaşamaması ihtimaline karşı hazırlanmıştır. Bu eleman, etriyenin beton ve boyuna donatı üzerindeki sargılama etkisinin maksimum olduğu durumdaki kiriş eğilme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla deney programına dahil edilmiştir. Bu kiriş, 3 metre uzunluğa ($a/d=3.8$) sahiptir. Referans deney elemanı ve bu elemanın donatı detayları Şekil 10'da gösterilmiştir. İlgili elemandaki bütün etriye kancaları 135° bükülerek, maksimum sargılama etkisine ulaşılması amaçlanmıştır.



Şekil 10. Referans deney elemanı ve elemanın donatı detayları

R elemanının deneyinde ilk eğilme çatlakı yaklaşık 20-22 kN ve kesme bölgesindeki ilk çatlak ise yaklaşık 35 kN yük değerinde ortaya çıkmıştır. Yük değerleri arttıkça kesme çatlakları yük noktasına doğru ilerlemeye devam etmiştir. Yaklaşık 130 kN değerinde yük-sehim eğrisi yataylaşmaya başlamıştır. Yaklaşık 145 kN değerine ulaşıldığında ise iki yük noktası arasında betonda ilk ezilme ibareleri görülmeye başlamıştır. Yük değeri yaklaşık 172 kN değerine ulaştığında ana kesme çatlakı ve aderans çatlakı derinleşerek beton basınç bölgesiyle birleşmiştir. Eğilme kapasitesine ulaşan R elemanında kesme-çekme kırılmasının da meydana gelmesiyle teste son verilmiştir. R deney elemanına ait kırılma şekli ve yük-deformasyon eğrisi Şekil 11’de gösterilmiştir. Aslında kesme açıklığının faydalı yüksekliğine oranı 3 ila 7 arasında olan elemanlarda beklenildiği üzere çapraz çekme kırılmasına yakın bir göçme şekli ortaya çıkmıştır. Çekme donatısı hizasındaki aderans çatlakları fazla genişlememiş ve ana çapraz çatlak neredeyse kirişin alt yüzüne kadar ilerlemiştir. Yük noktalarının

altındaki beton ezilmesi ile çapraz çekme çatlama, kirişin nihai kapasitesine ulaşmasında etkili olmuştur.



Şekil 11. Referans deney elemanı kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

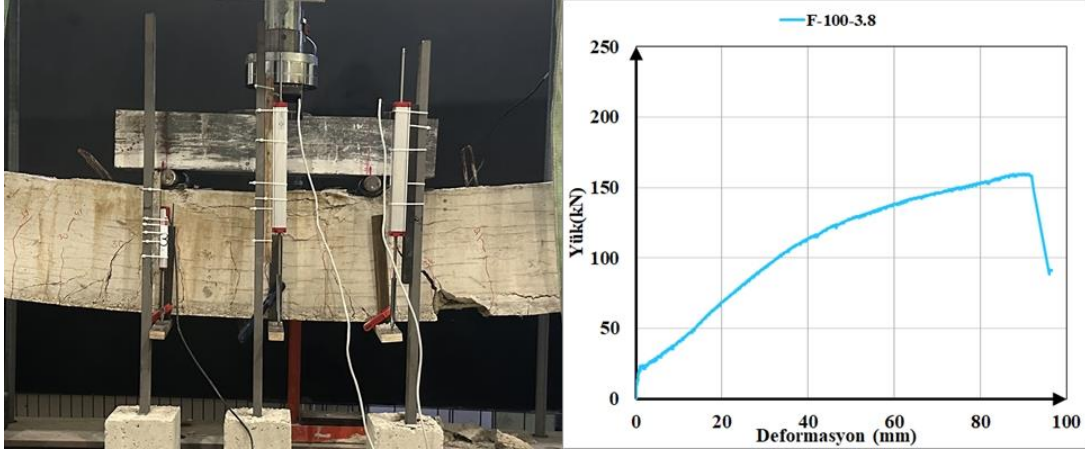
3.5.2. F-100-3.8 Elemanı Deneyi

F-100-3.8, kapalı (tam) CTP etriyeli ($\text{Ø}10/100$ mm) deney elemanıdır. Bilindiği üzere, CTP etriye uçlarını 135° bükme mümkün olmadığı için CTP etriye uçlarındaki büküm açısı 90° olarak bırakılmıştır. Bu durum, 135° kancalı kapalı çelik etriyelere nazaran sargılama etkisinde azalmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu elemanın çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. 3 metre uzunluğa ($a/d=3.8$) sahiptir. F-100-3.8 deney elemanı ve bu elemanın donatı detayları Şekil 12'de gösterilmiştir.

F-100-3.8 elemanı deneyinde ilk eğilme çatlama yaklaşık olarak 24 kN yük değerinde gerçekleşmiştir. Kesme bölgesinde ilk çatlak ise yaklaşık 30 kN yük değerinde ortaya çıkmıştır. Yük değeri yaklaşık olarak 110 kN değerine ulaştığında ise kesme çatlakları belirginleşerek derinleşmeye başlamıştır. Ayrıca bu yük değerine ulaşıldıktan sonra yük-sehim eğrisi yataylaşmaya başlamıştır. Yük değeri yaklaşık olarak 130 kN değerine ulaştığında ise iki yük noktası arasında ilk beton ezilme ibareleri görülmüştür. Yük değeri yaklaşık olarak 160 kN değerine ulaştığında ise basınç bölgesindeki betonun ezilmesinden sonra kesme-basınç kırılması ile göçme gerçekleşmiştir. Bu deney elemanı da eğilme kapasitesine ulaşmıştır. F-100-3.8 deney elemanı kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 13'te gösterilmiştir. Bu elemanın CTP donatı seviyesinde betondaki aderans çözülmesinin etkisiyle betonda önemli ayrışmalar ortaya çıkmış ve kiriş nihai davranışı çapraz çekme kırılmasından ziyade kesme-basınç kırılmasına dönmüştür.



Şekil 12. F-100-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 13. F-100-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.3. F-200-3.8 Elemanı Deneyi

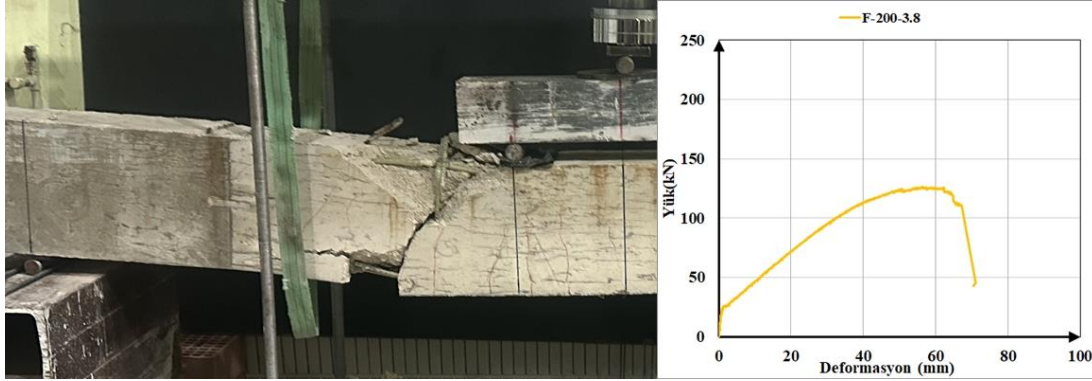
F-200-3.8 kapalı (tam) CTP etriyeli ($\text{Ø}10/200$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. 3 metre uzunluğa ($a/d=3.8$) sahiptir. F-200-3.8 deney elemanı ve elemanın donatı detayları Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. F-200-3.8 deney elemanı ve elemanın donatı detayları

F-200-3.8 elemanı deneyinde ilk eğilme ve ilk kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 22 kN ve 30 kN yük değerlerinde oluşmuştur. Yük değeri yaklaşık olarak 70 kN değerine ulaştığında ise kesme çatlakları yataylaşarak kendilerine en yakın yük noktalarına doğru ilerlemeye başlamıştır. Yaklaşık 125 kN değerinde kesme-basınç kırılması meydana gelmiştir. Aynı zamanda sol yük noktasının hemen solunda yer alan etriye açılmış ve basınç donatısı burkulmuştur. Bu esnada basınç donatısı beton ve bağ telinin etkisi nedeniyle kesilmiştir. Bu durum, CTP donatılı elemanlarda çelik bağ tellerinin donatıları kesme etkisine sahip olduğunu göstermiştir. CTP malzemesinin düşük sertliği, bu donatıların yüksek gerilme değerleri altında metalik bağlayıcı tellerden

dahi olumsuz etkilenmelerine neden olmaktadır. F-200-3.8 deney elemanı kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 15’de gösterilmiştir.



Şekil 15. F-200-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

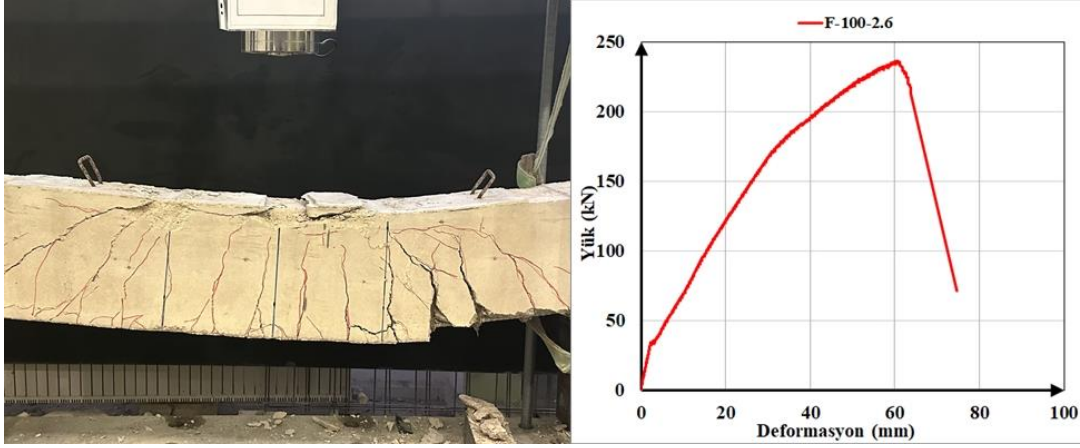
3.5.4. F-100-2.6 Elemanı Deneyi

F-100-2.6 deney kirişi, tam (kapalı) CTP etriyeli ($\text{Ø}10/100$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Kiriş, 2.3 metre uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. F-100-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları Şekil 16’da gösterilmiştir.

F-100-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme çatlakları yaklaşık 35 kN değerinde ortaya çıkmıştır. Yük değeri arttıkça kesme çatlakları yük noktalarına doğru ilerlemeye devam etmiştir. Yaklaşık 135 kN yük değerinde ise kesme çatlakları belirginleşerek derinleşmeye başlamıştır. Yük deformasyon eğrisi yaklaşık 170 kN’den sonra yataylaşmaya başlamıştır. Yük değerinin yaklaşık 215 kN değerine ulaşmasıyla birlikte sabit moment bölgesinde betonda ezilme başlamıştır. Yük değeri yaklaşık olarak 235 kN ulaştığında ise beton ezildikten hemen sonra kesme-basınç kırılması ani olarak gerçekleşmiştir. F-100-2.6 deney elemanının kırılma şekli ve yük-sehim eğrisi Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 16. F-100-2.6 Deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 17. F-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

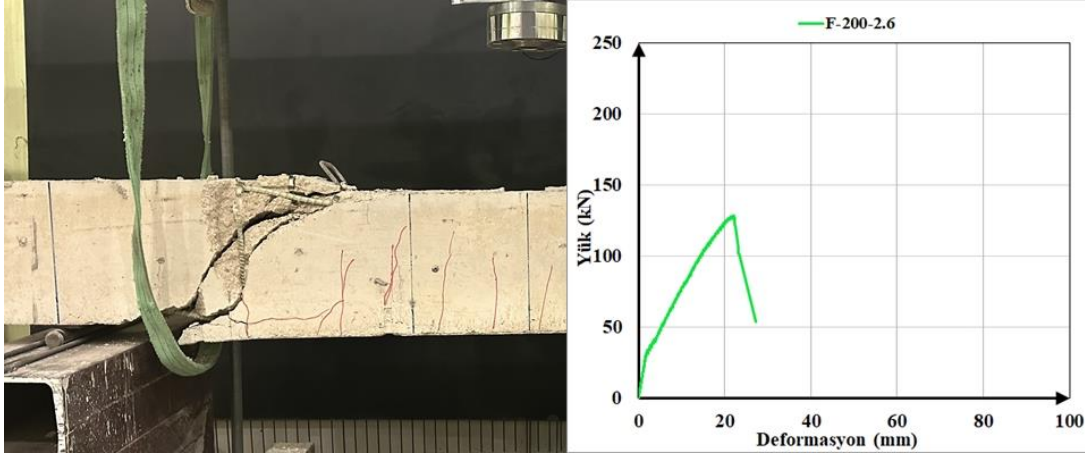
3.5.5. F-200-2.6 Elemanı Deneyi

F-200-2.6 elemanı, kapalı (tam) CTP etriyeli ($\text{Ø}10/200$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Eleman, 2.3 metre uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. F-200-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları Şekil 18’de gösterilmiştir.

F-200-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme ve ilk kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 30 kN ve 50 kN değerlerinde ortaya çıkmıştır. Yük değeri yaklaşık 105 kN mertebesine geldiğinde ise kesme çatlakları yataylaşarak yük noktasına doğru ilerlemeye başlamıştır. Yük değeri yaklaşık 125 kN değerine ulaştığında CTP kapalı etriyelerinden biri büküm noktasından kopmuştur. O bölgede etriyenin kopmasıyla kesme yükleri betona aktarılmıştır. Beton ise etriye kopar kopmaz eğik çekme kırılmasına maruz kalmıştır. F-200-2.6 deney elemanının kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 19’da gösterilmiştir. Elemandaki çapraz çekme çatlaklarının aşırı derecede genişlemesinde CTP etriyelerin düşük elastisite modülü değerleri ve etriyelerin betona uyguladıkları sargılama etkisinin nispeten düşük kalmış olması rol oynamıştır.



Şekil 18. F-200-2.6 Deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 19. F-200-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.6. S-100-3.8 Elemanı Deneyi

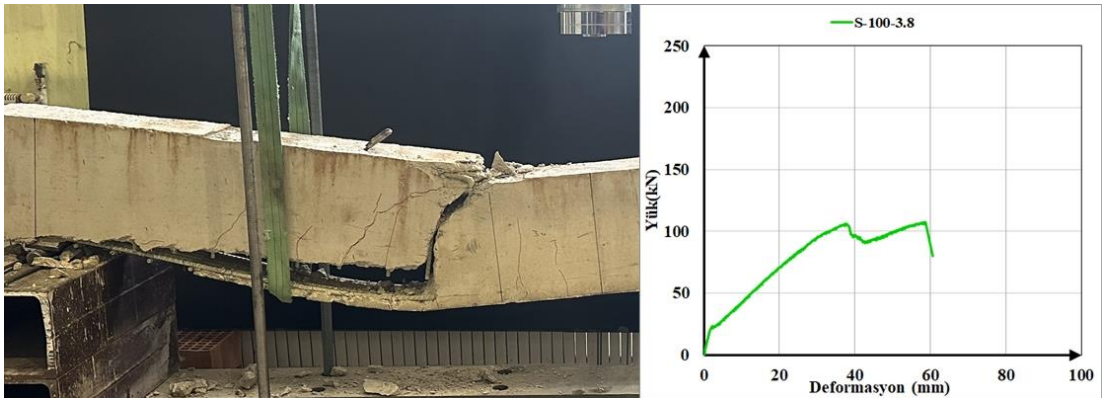
S-100-3.8 elemanı, CTP ayırık çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/100$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Kiriş, 3 m uzunluğa ($a/d=3.8$) sahiptir. S-100-3.8 deney elemanı ve bu elemanın donatı detayları Şekil 20’de gösterilmiştir.

S-100-3.8 elemanı deneyinde ilk eğilme ve ilk kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 24 kN ve 35 kN yük değerlerinde ortaya çıkmıştır. Yük değeri yaklaşık olarak 90 kN değerine ulaştığında ise kesme çatlakları belirginleşerek yük noktalarına doğru ilerlemeye devam etmiştir. Yaklaşık olarak, 98 kN yük değerinde ise aderans çatlakları ana kesme çatlağının alt yüzünden mesnete doğru (boyuna donatı doğrultusunda) derinleşerek ilerlemeye başlamıştır. Yük değeri yaklaşık olarak 105 kN değerine ulaştığında ise kesme-çekme kırılması ile aderans göçmesi aynı anda gerçekleşmiştir. Aderans kırılmasında ise tüm etriyeler boyuna donatılardan tamamen sıyrılmıştır. S-100-3.8 deney elemanı kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 21’de gösterilmiştir.

Kapalı CTP etriyeli elemanlardan farklı olarak, aderans çözülmesi sonucu çekme donatısı seviyesinde ortaya çıkan çatlama ve ayrışma çok ciddi seviyelere ulaşmıştır. Bu durum, ayırık etriyelerin betona uyguladığı sargılama etkisinin düşük düzeyde kalması nedeniyle, boyuna donatılarla beton arasındaki aderans dayanımının azalmasından ve donatının betondan kolaylıkla ayrılmasından kaynaklanmıştır.



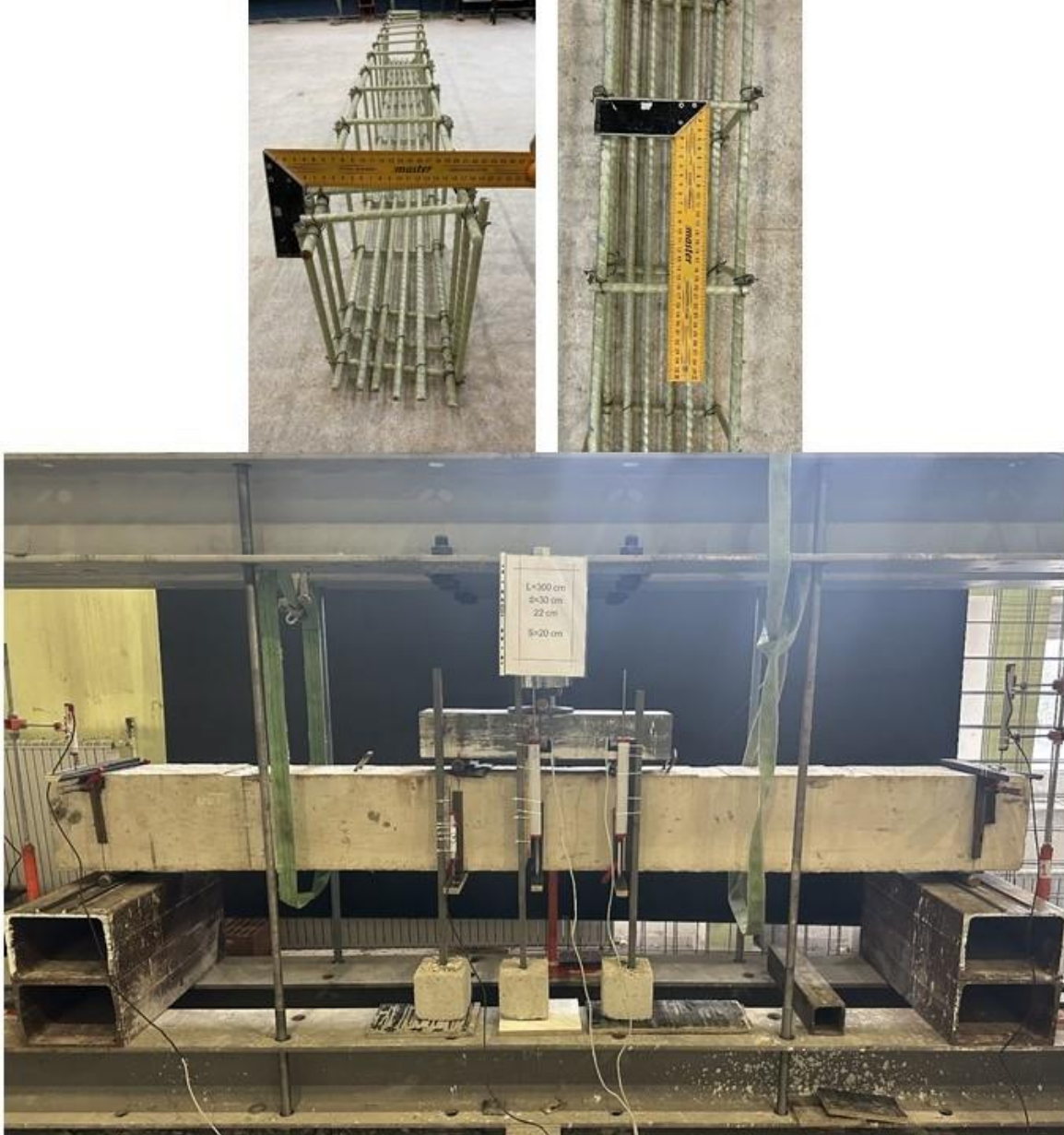
Şekil 20. S-100-3.8 deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 21. S-100-3.8 deney elemanın kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.7. S-200-3.8 Elemanı Deneyi

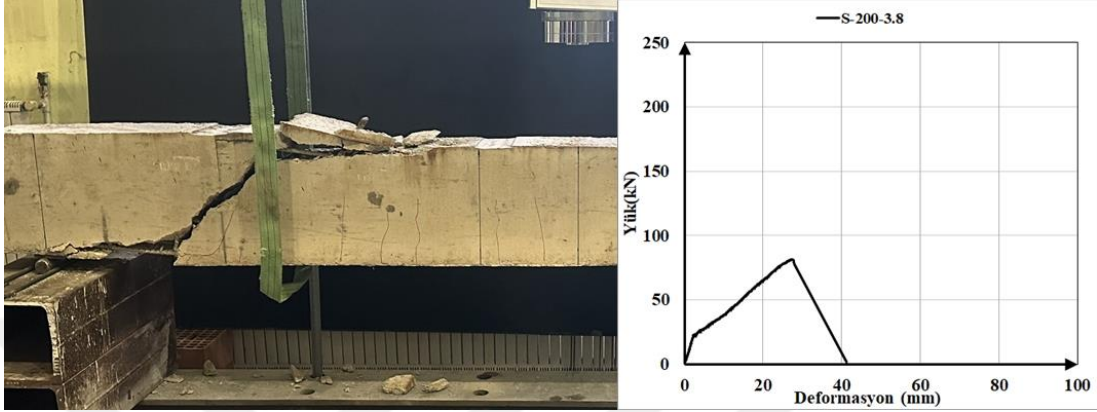
S-200-3.8 elemanı, CTP ayırık çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/200$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Eleman, 3 metre uzunluğa ($a/d=3.8$) sahiptir. S-200-3.8 deney elemanı ve bu elemanın donatı detayları Şekil 22’de gösterilmiştir.



Şekil 22. S-200-3.8 deney elemanı ve elemanın donatı detayları

S-200-3.8 elemanı deneyinde ilk eğilme çatlama yaklaşık olarak 20 kN yük değerinde gerçekleşirken ilk kesme çatlama ise yaklaşık 35 kN değerinde meydana gelmiştir. Yük değerinin yaklaşık 45 kN olmasıyla birlikte kesme çatlakları yataylaşarak ilerlemeye devam etmiştir. Yaklaşık olarak 80 kN yük değerinde eleman

kesme-basınç kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşmıştır. S-200-3.8 deney elemanına ait kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 23'te gösterilmiştir. S-100-3.8 deney elemanına benzer olarak, aderans çözülmesi kaynaklı çatlaklar ciddi seviyelere ulaşmış ve bu çözülme kesme-basınç kırılmasının kolaylıkla ortaya çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 23. S-200-3.8 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

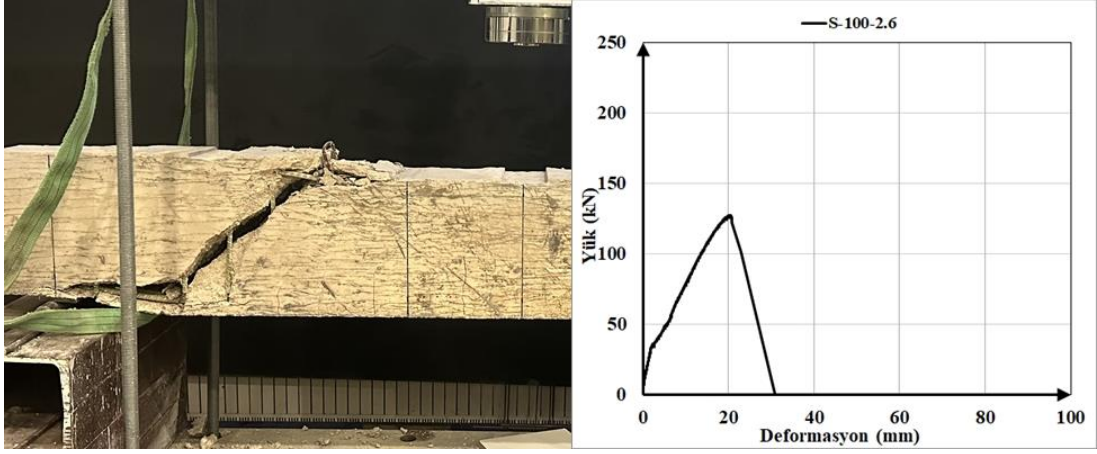
3.5.8. S-100-2.6 Elemanı Deneyi

S-100-2.6 elemanı, CTP ayrık çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/100$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Kiriş, 2.3 uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. S-100-2.6 deney elemanı ve ilgili elemanın donatı detayları, Şekil 24'de gösterilmiştir.



Şekil 24. S-100-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları

S-100-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme ve ilk kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 30 kN ve 35 kN yük değerlerinde oluşmuştur. Yaklaşık 124 kN değerinde ise deney elemanı kesme-basınç kırılması ile taşıma gücüne ulaşmıştır. S-100-2.6 deney elemanı kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 25’de gösterilmiştir. Bu elemanın kesme açıklığı, S-100-3.8 elemanına göre daha küçük olduğu için kesme-basınç davranışı daha belirgin olarak gözlenmiş ve çapraz çekme ile aderans çatlakları daha büyük genişliklere ulaşmıştır.



Şekil 25. S-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.9. S-200-2.6 Elemanı Deneyi

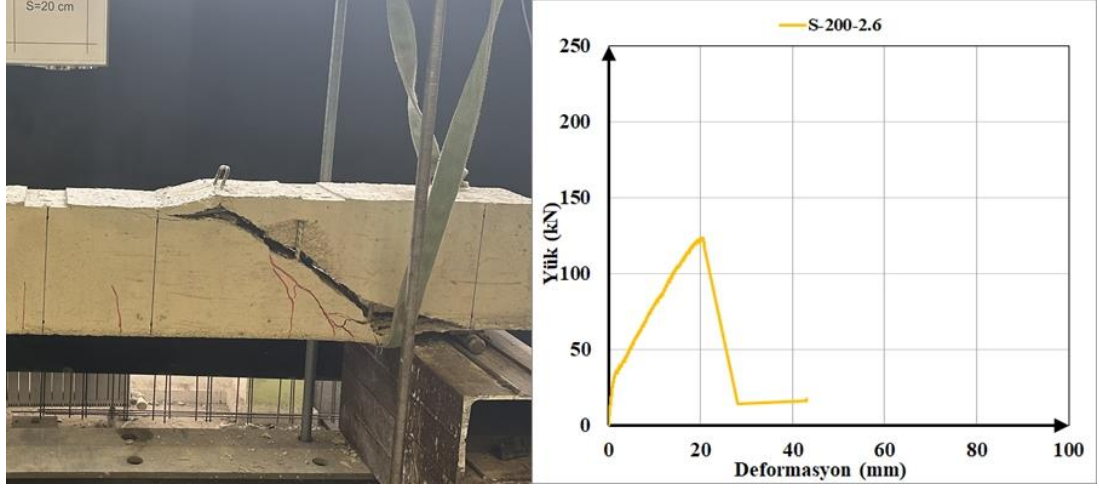
S-200-2.6 elemanı, CTP ayrık çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/200$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Eleman, 2.3 metre uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. S-200-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları Şekil 26'da gösterilmiştir.

S-200-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme ve ilk kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 30 kN ve 40 kN yük değerlerinde ortaya çıkmıştır. Yük değeri yaklaşık 100 kN değerine ulaştığında kesme çatlakları belirginleşerek yük noktasına doğru ilerlemeye devam etmiştir. Yaklaşık 120 kN yük değerine ulaşılmasıyla kesme-basınç kırılması meydana gelmiş ve teste son verilmiştir. S-200-2.6 deney elemanına ait kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 27'de gösterilmiştir.

Bu elemanın düşük kesme açıklığı ile büyük etriye aralığı sebebiyle çatlak genişlikleri ve betondaki ayrışmaların çok ciddi mertebelere ulaştığı görülmektedir. Ayrık CTP etriyeler, çapraz beton çubuklarının stabilitesini sağlamakta yetersiz kalmış ve kesme-basınç kırılması ani olarak ve düşük süneklik değerlerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 26. S-200-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 27. S-200-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.10. T-100-2.6 Elemanı Deneyi

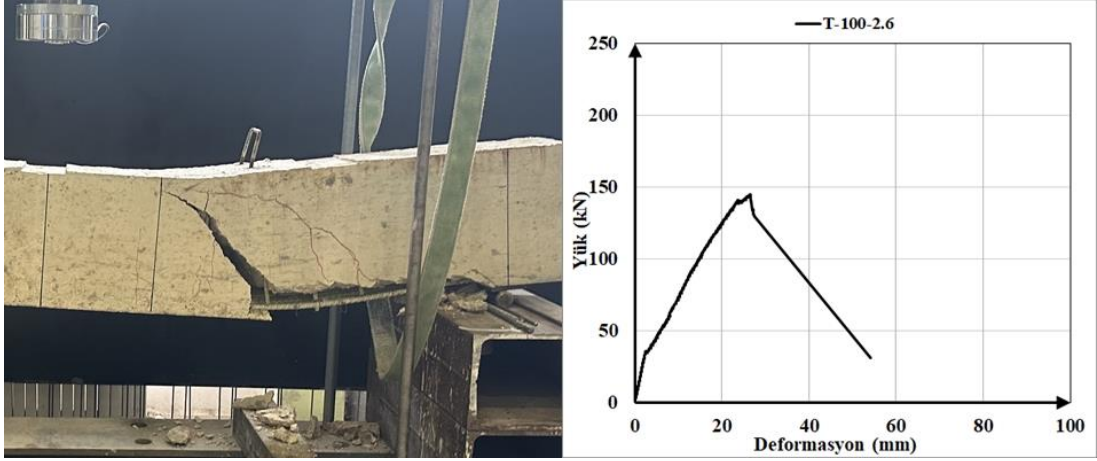
T-100-2.6 elemanı, CTP düşey iki çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/100$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Eleman, 2.3 metre uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. T-100-2.6 deney elemanı ve ilgili elemanın donatı detayları Şekil 28’de gösterilmiştir.

T-100-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme ve kesme çatlakları sırasıyla yaklaşık 25 kN 35 kN yük değerlerinde ortaya çıkmıştır. 120 kN yük değerinden itibaren kesme çatlakları derinleşerek yük noktasına doğru ilerlemeye başlamıştır. Yük değerinin yaklaşık 145 kN değerine ulaşmasıyla ise deney elemanında kesme-basınç kırılması (göçmesi) gerçekleşmiştir. T-100-2.6 deney elemanına ait kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 29’da gösterilmiştir.

Bu elemanda, sadece düşey ayırık etriye varlığı sebebiyle aderans çözülmesinin en üst mertebelere çıktığının ve boyuna donatıyı çevreleyen betonun tamamen çatlayarak döküldüğünü görmek mümkündür.



Şekil 28. T-100-2.6 deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 29. T-100-2.6 deney elemanının kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

3.5.11. T-200-2.6 Elemanı Deneyi

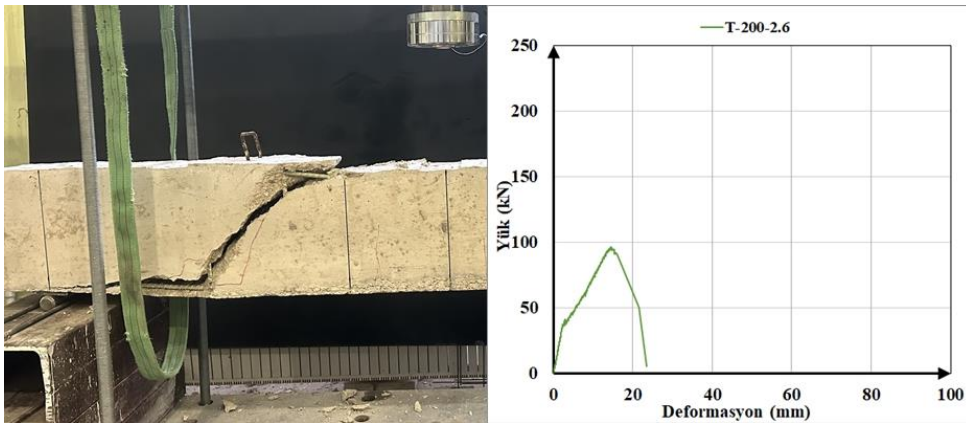
T-200-2.6 elemanı, CTP düşey iki çubuk etriyeli ($\text{Ø}10/200$ mm) deney elemanıdır. Çekme bölgesinde diğer deney elemanlarında olduğu gibi $6\text{Ø}12$ CTP donatı mevcuttur. Eleman, 2.3 m uzunluğa ($a/d=2.6$) sahiptir. T-200-2.6 deney elemanı ve elemanın donatı detayları Şekil 30'da gösterilmiştir.

T-200-2.6 elemanı deneyinde ilk eğilme çatlakları yaklaşık 35 kN yük değerinde ve ilk kesme çatlakları yaklaşık 40 kN değerinde oluşmuştur. Yaklaşık olarak 85 kN yük değerinde kesme çatlakları belirginleşmeye başlamıştır. Yük değeri yaklaşık 96 kN değerine ulaştığında deney elemanı kesme-basınç kırılması neticesinde kapasitesine ulaşmıştır. T-200-2.6 deney elemanına ait kırılma modu ve yük-sehim eğrisi Şekil 31'de gösterilmiştir.

Bu elemanda da, tıpkı T-100-2.6 elemanında gözlemlendiği gibi, düşük sargılama etkisi kaynaklı derin ve geniş aderans ve çapraz çekme çatlaklarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Kiriş, büyük şekil değiştirmeler göstermeden göçmüştür.



Şekil 30. T-200-2.6 deney elamanı ve elemanın donatı detayları



Şekil 31. T-200-2.6 deney elemanın kırılma bölgesi ve yük-sehim eğrisi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kırılma Şekilleri

Kesme kırılmasına uğrayan CTP donatılı betonarme kirişler, genellikle CTP etriyelerin büküm noktalarından kopması ile taşıma gücüne ulaşmaktadır. Çalışmada çekme donatı oranı yüksek ($\rho_f/\rho_{fb}=4.26$) seçilerek kirişlerin eğilme kapasiteleri de yüksek tutulmuştur. Bu sayede deney elemanlarının çoğunluğunun kesme kırılmasına uğraması sağlanmış ve gerekli karşılaştırmaların yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Çelik etriyeli R elemanı ile CTP kapalı etriyeli F-100-2.6 ve F-100-3.8 numuneleri eğilme kapasitelerine ulaşırken, CTP ayrık çubuk etriyeli hiçbir deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşamamıştır. S-100-2.6, S-200-2.6, S-200-3.8 eğik çekme kırılması ile taşıma gücüne ulaşmıştır. F-200-3.8 deney elemanında, eğik çekme kesme kırılması ile sol yük noktasının hemen solunda yer alan ilk etriyenin açılması ve basınç donatısının burkulması aynı anda gerçekleşmiştir. Etriye kancalarının 90° açığa sahip olması, etriyelerin açılmasını kolaylaştırmıştır. F-200-2.6 elemanı taşıma gücüne ulaştığı anda, etriyelerden bir tanesi büküm noktasından kopmuş, etriye kancası açılarak basınç donatısı burkulmuş ve kesme-basınç kırılması meydana gelmiştir. S-100-3.8 deney elemanında kesme-basınç kırılması ile aderans göçmesi aynı anda gerçekleşmiştir. Kesme kırılmasına neden olan kesme çatlağının alt yüzünden mesnete kadar olan bölgede, ayrık etriyelerin boyuna donatılardan ayrılması ile aderans çözülmesi gerçekleşmiştir.

Tüm deney numunelerinin taşıma gücü sonrası kırılma modları Şekil 32'de gösterilmiştir. Bu göçme şekilleri incelendiğinde, ayrık etriyeli elemanlarda çapraz çekme ve aderans çatlaklarının, kapalı etriyeli elemanlardaki çatlaklara kıyasla nedeli genişlediği ve derinleştiği açıkça görülmektedir. Özellikle sadece düşey etriyeye sahip elemanlarda çapraz çekme ve aderans çatlaklarının iki tarafında kalan betonarme kiriş parçalarının birbirinden ayrılma raddesine ulaştığı açıkça gözlemlenmektedir. Yani, ayrık etriyelerin kapalı etriyelere göre en büyük dezavantajı, etriye sargılama etkisinin tamamen yitilmesi ile çapraz basınç çubuklarının stabilite kaybının ve boyuna donatı ile beton arasındaki kaymanın daha çabuk gerçekleşmesidir. Bu durum,

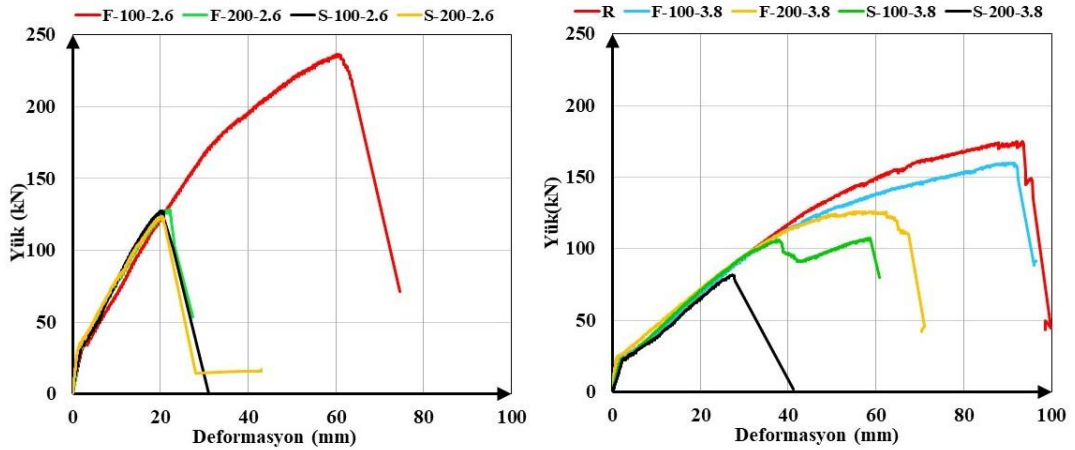
betonarme kirişin eğilme davranışını son derece olumsuz etkilemekte ve şekil değiştirme kabiliyetinin önemli oranda yitirilmesi sonucunu beraberinde getirmektedir.



Şekil 32. Deney elemanlarına ait kırılma modları

4.2. Yük Deformasyon İlişkisi

Şekil 33'de deney elemanlarına ait yük-sehim eğrileri gösterilmiştir. Tüm deney numunelerinin aynı kesit detaylarına sahip olmaları nedeniyle ilk çatlama yükleri ve çatlama sonrası rijitlikleri hemen hemen aynıdır. İlk çatlama ile yük-sehim eğrilerinin eğimlerinde ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Eğilme kapasitesine ulaşan deney numunelerinin (R, F-100-2.6 ve F-100-3.8) yük-sehim eğrilerinde eğim, ilk çatlamanın gerçekleşmesiyle ani olarak değişmiş, beton elastikliğini yitirene kadar yaklaşık olarak sabit kalmış ve beton elastikliğini yitirdikten sonra ise kademeli olarak azalmıştır. F-200-2.6, S-100-2.6 S-200-2.6 ve S-200-3.8 deney elemanlarının yük-sehim eğrilerinde ise eğim ilk çatlama sonrası sabite yakın kalmış ve kesme kırılması neticesinde yük ani olarak düşmüştür. F-200-3.8 ve S-100-3.8 deney elemanlarında ise eğim kademeli olarak azalmış ve kesme kırılması neticesinde yükte düşüş gözlemlenmiştir. Aslında bu deneysel çalışmanın en önemli sonuçlarından biri de referans çelik etriyeli deney numunesi ile aynı kesme açıklığına sahip kapalı CTP etriyeli deney elemanının yük-sehim eğrilerinin son derece yakın olmasından dolayı, kapalı CTP etriyelerin de sadece düşey etkisi altındaki elemanlarda son derece başarılı performans gösterdiğinin görülmesidir.



Şekil 33. Deney elemanlarına ait yük-sehim eğrileri

4.3. Taşıma Gücü ve Enerji Sönümlenme Kapasiteleri

Çalışmada eğilme kapasitesine ulaşan; a/d oranı 3.8 olan deney elemanlarından R ve F-100-3.8 ile a/d oranı 2.6 olan F-100-2.6 deney elemanı kendi deney grupları içerisindeki en büyük taşıma gücü ve enerji sönümlenme kapasitesine sahip

numunelerdir. F-100-3.8 elemanı da R elemanı gibi eğilme taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır, ancak yük ve enerji sönümlenme kapasitelerinin her biri yaklaşık %9 daha düşüktür. Bunun temel nedeni sabit moment bölgesinde çelik etriyenin sargılama etkisinin CTP etriyeye göre daha yüksek olması ve CTP etriyelerin kancalarının 135° bükülememesidir. Kesme kırılması ile taşıma gücüne ulaşan diğer deney elemanlarının kapasiteleri ise oldukça düşüktür. Çizelge 5’de deney elemanlarına ait taşıma gücü ve enerji sönümlenme kapasiteleri yer verilmiştir.

Çizelge 5. Deney elemanlarına ait taşıma gücü ve enerji sönümlenme kapasitesi değerleri

Grup	Kiriş	Max Yük (kN)	Enerji Sönümlenme Kapasitesi(kJ)	$P_b/P_{reference}$	$E_b/E_{reference}$
	R	174.72	10.65	1.09	1.09
	F-100-3.8*	159.79	9.74	1.00	1.00
1 st	F-200-3.8	126.07	4.77	0.79	0.49
	S-100-3.8	107.44	4.52	0.67	0.46
	S-200-3.8	81.67	1.31	0.51	0.13
	F-100-2.6*	236.59	9.21	1.00	1.00
	F-200-2.6	128.3	1.74	0.54	0.19
2 nd	S-100-2.6	127.52	1.59	0.54	0.17
	S-200-2.6	123.62	1.61	0.52	0.17
	T-100-2.6	145.01	2.32	0.61	0.25
	T-200-2.6	96.11	0.84	0.41	0.09

P_b – Kirişlerin yük kapasitesi

E_b – Kirişlerin enerji sönümlenme kapasitesi

$P_{reference}$ – Referans kirişinin yük kapasitesi

$E_{reference}$ – Referans kirişinin enerji sönümlenme kapasitesi

* – Gruplara ait referans kirişleri

4.4. Deney Sonuçlarının Deney Değişkenlerine Göre Değerlendirilmesi

4.4.1. Etriye Tipi

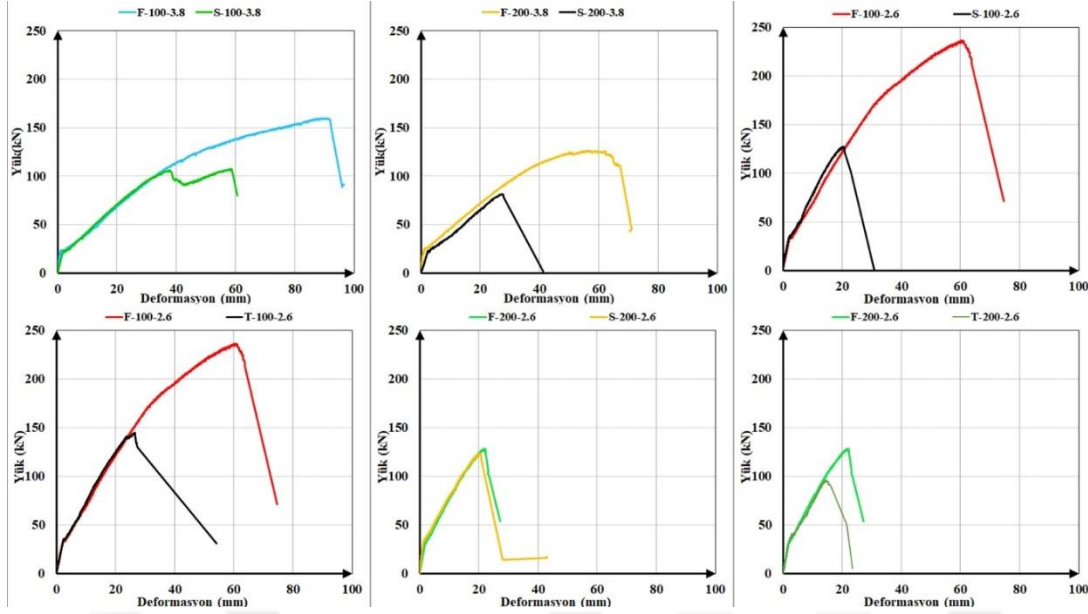
Şekil 34’te etriye tipi değişkeni için deney elemanlarına ait karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri verilmiştir. Genel olarak en yüksek yük değeri F tipi etriye ile elde edilmiştir. S ve T tipi etriye kullanıldığında yük kapasiteleri ve enerji sönümlenme kapasiteleri genellikle azalma göstermiştir. İlk olarak, a/d oranı 3.8 olan deney elemanları incelenmiştir. F-100-3.8 ile karşılaştırıldığında, S-100-3.8 elemanının yük ve enerji sönümlenme kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %33 ve %54 daha düşüktür. Bu farkın

nedeni etriye tipinin kırılma modunu eğilmeden kesmeye dönüştürmesidir. Her iki deney elemanı da kesme kırılmasına uğramış olsa da, S-200-3.8 elemanının (F-200-3.8 numunesi ile karşılaştırıldığında) yük ve enerji sönümlene kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %35 ve % 73 daha düşüktür. Enerji kaybındaki önemli azalma, S-200-3.8 elemanının belirgin şekilde düşük kesme kapasitesine ve F-200-3.8 test elemanındaki yük-sehim eğrisinin yataylaşmasına bağlanabilir. Yük-sehim eğrilerindeki bu yataylaşma, çapraz çekme çatlaklarının genişlemesi ve ilerlemesi sırasında kapalı etriyelerin betondaki eşdeğer çapraz basınç çubuklarının stabilitelelerini koruması sayesinde nihai göçmenin gecikmesini ve şekil değiştirme kabiliyetinin devam etmesini göstermektedir.

İkinci olarak, a/d oranı 2.6 olan deney elemanları incelenmiştir. F-100-2.6 elemanı ile karşılaştırıldığında, S-100-2.6 elemanının yük ve enerji sönümlene kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %46 ve % 83 daha düşüktür. T-100-2.6 elemanının (F-100-2.6 ile karşılaştırıldığında), yük ve enerji sönümlene kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %39 ve %75 daha düşüktür. Bu büyük farkın nedeni, 100 mm aralığına sahip F tipi etriyeli deney elemanının eğilme kapasitesine ulaşmasıdır, diğer etriye tiplerinde (S ve T tipi) kesme kırılması meydana gelmesidir.

F-200-2.6 elemanı ile karşılaştırıldığında, S-200-2.6 deney elemanı elemanının yük ve enerji sönümlene kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %4 ve %7 daha düşüktür. T-200-2.6 deney elemanının (F-200-2.6 ile karşılaştırıldığında), yük ve enerji sönümlene kapasiteleri sırasıyla yaklaşık %25 ve %52 daha düşük olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda diğer gruplara oranla farkın daha az olmasının ana nedeni, F-200-2.6 elemanının etriyesinde yerel kusurların neden olduğu kopma ile kesme kırılmasının meydana gelmesidir. Başka bir deyişle, F tipi etriyenin tam kapasitesini kullanmadan önce erkenden kopmuş olmasıdır.

Son olarak, S veya T tipi etriyelerin kullanıldığı deney elemanlarında, etriyenin yük ve enerji kapasiteleri üzerindeki etkileri arasındaki fark net değildir. 100 mm etriye aralığına sahip deney elemanlarında T tipi etriyeli elemanlar daha yüksek değerlere ulaşırken, 200 mm etriye aralığına sahip deney elemanlarında S tipi etriyeli elemanlar daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, aynı dökümden elde edilen elemanlar arasında betonun mekanik özelliklerinin farklılık göstermesinden kaynaklanabilir. Ancak T ve S tipi etriyelerin kesmeye karşı benzer katkı sağladığı olasılığı oldukça yüksektir.

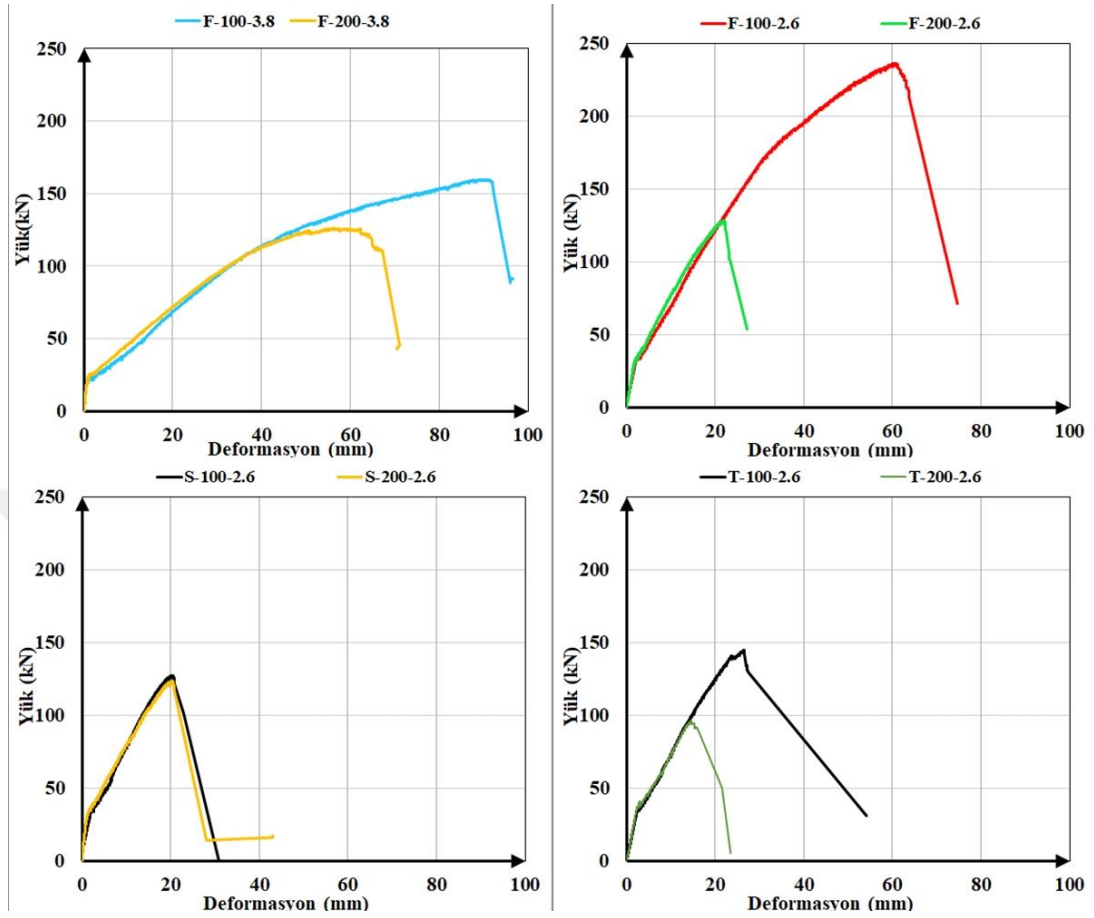


Şekil 34. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (Etriye tipi değişkeni)

4.4.2. Etriye Aralığı

Aynı a/d oranına ve aynı etriye tipine sahip deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri Şekil 35’de gösterilmiştir. F tipi elemanlarda etriye aralığının artırılması kırılma modunu eğilmeden kesmeye dönüştürerek yük ve enerji sönmleme kapasiteleri üzerinde önemli etkilere neden olmuştur. F-200-3.8 elemanının yük ve enerji sönmleme kapasiteleri sırasıyla, F-100-3.8 elemanın ilgili kapasitelerinden yaklaşık %21 ve %51 daha düşüktür. Benzer şekilde, F-200-2.6 elemanının yük ve enerji sönmleme kapasiteleri sırasıyla, F-100-2.6 elemanının ilgili değerlerinden yaklaşık %46 ve %81 daha düşüktür. F-200-2.6 elemanındaki önemli fark, beklenmeyen şekilde etriyenin erken kopmasından kaynaklanmaktadır. S tipi etriyelere sahip elemanlarda etriye aralığının artması genellikle hem yük hem de enerji sönmleme kapasitelerinde azalmaya neden olmuştur. S-200-2.6 elemanının yük kapasitesi, S-100-2.6 elemanına oranla yaklaşık %3 daha düşükken, enerji sönmleme kapasiteleri yaklaşık %1 daha yüksektir. Genel sonuçlara göre küçük farkların başlıca nedeninin betonun mekanik özelliklerindeki yerel değişkenliklerin ve ön kusurların olduğu farzedilmektedir. T tipi etriyeli elemanlarda, etriye aralığının artırılması kırılma modunda herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır; ancak genellikle yük ve enerji sönmleme kapasitelerinde azalmaya neden olmuştur. Ayrıca, deneysel elemanların yük-sehim eğrileri incelendiğinde, ayırık S veya T tipi etriyeli elemanlarda

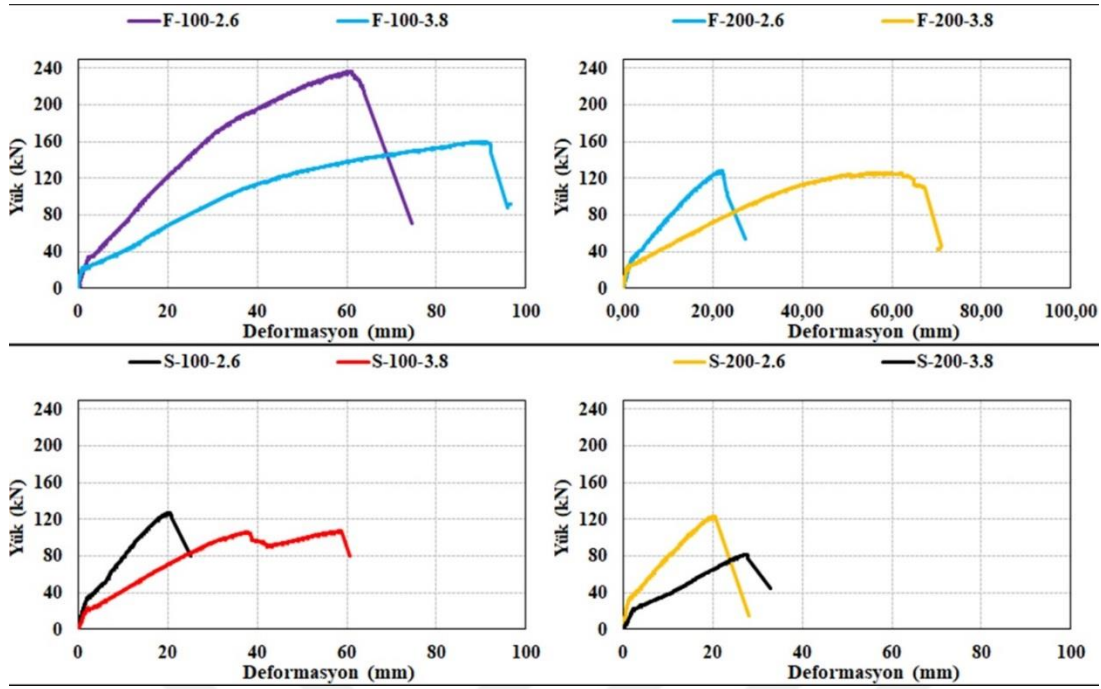
etriye aralığının azalmasının yük-sehim eğrisi ve dayanım ile enerji sönümleme kapasitesi değerleri üzerinde önemli etkileri bulunmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 35. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (Etriye aralığı değişkeni)

4.4.3. Kesme Açıklığının Faydalı Yüksekliğe (a/d) Oranı

a/d oranı parametresinin etkilerini daha iyi gözlemlemek için aynı etriye aralığına ve aynı etriye tipine sahip deney elemanlarına ait karşılaştırmalı yük deformasyon eğrileri Şekil 36'da sunulmuştur. a/d oranını artırmak kırılma modunda bir değişikliğe neden olmamıştır. Bu bölümde değerlendirmeler, kesme dayanımlarına ($V_n = V_c + V_{fip}$) dayalı olarak yapılmıştır. 100 mm etriye aralığına sahip F tipi etriyeli deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 36. Deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri (a/d değişkeni)

Bu nedenle kesme dayanımları hakkında kesin bir yorum yapılamamıştır. Ancak genellikle a/d oranının artması ile kesme dayanımlarında bir artış gözlemlenmiştir. 200 mm etriye aralığına sahip F tipi etriyeli elemanlarda yaklaşık %2, 100 mm etriye aralığına sahip S tipi etriyeli elemanlarda yaklaşık %19 ve 200 mm etriye aralığına sahip S tipi etriyeli elemanlarda kesme dayanımı bakımından yaklaşık %51'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışların genellikle V_c (Beton kesme dayanımı) artışına bağlandığı literatürde yaygın bir şekilde gösterilmiştir. Yalnızca F-200-2.6 deney elemanında etriyenin daha düşük bir yük seviyesindeyken erken kopmasının neden olduğu kesme kuvvetinin betona aktarılması ve beklenenden önce kırılma meydana gelmesi nedeniyle kesme dayanımı (Yaklaşık %2) oldukça düşük çıkmıştır. Kesme açıklığının azalması ile yük kapasitesindeki artışın bir diğer sebebi de, moment kolunun azalması ile aynı yüke karşılık gelen moment değerinin de azalmasıdır.

5. ANALİTİK ÇALIŞMA

5.1. Yönetmelikler ve Modeller

CTP etriyesiz/etriyeli CTP boyuna donatılı kirişlerin kesme dayanımları farklı yönetmeliklerde yer alan bağıntılar ve modeller yardımıyla tahmin edilmiştir. Yönetmelik bağıntılarında ve modellerde etriyesiz CTP donatılı kirişlerin kesme dayanımları yalnızca betonun katkısının (V_c) hesaba katılması suretiyle belirlenmektedir ve bu varsayım deneylerle doğrulanmıştır. CTP etriyeli ve boyuna donatılı kirişlerin kesme hesaplarında ise beton katkısının yanı sıra etriyenin de katkısı (V_f) hesaplara dahil edilerek, bağıntılar geliştirilmiş ve bu bağıntılar birçok çalışma tarafından önerilmiştir (V_c+V_{fp}).

Bu bölümde, CTP donatılı kirişlerin kesme dayanımları ile ilgili olarak literatürde önerilmiş bağıntı ve modeller özetlenmiştir.

5.2. Yönetmelikler

5.2.1. ACI 440.1R-15 [3]

ACI 440.1R-15 [3] betonun kesmeye katkısı (V_c) için Tureyen and Frosh [22] tarafından geliştirilen Denklem (1)'i önermektedir. Boyuna donatı eksenel rijitliği, elastik tarafsız eksen derinliği (kd) ile ifadeye dahil edilmiştir. k çatlama dönüşürülmüş kesit tarafsız eksen derinliğinin donatı etkili derinliğine (d) oranı olarak ifade edilmektedir. Dikdörtgen kesitler için k Denklem (2) yardımıyla elde edilmektedir. n_f ($n_f=E_f/E_c$) elastisite modülleri oranını simgelemektedir. ρ_f ise boyuna donatı oranını göstermektedir. f_c beton basınç dayanımını, b_w ise kiriş genişliğini ifade etmektedir.

$$V_c = 0.4\sqrt{f_c}b_w d (kd) \quad (1)$$

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

ACI 440.1R-15 [3] kiriş boyuna eksenine dik konumda yerleştirilen CTP etriyelerin kesmeye olan katkısı (V_{fvp}) için Denklem (3-4)'ü önermektedir. A_{fv} , f_{fv} , ve s sırasıyla enine donatı kesit alanını, enine donatı gerilmesini ve etriye aralığını göstermektedir. ACI 440.1R-15 [3], CTP etriyelerin büküm noktası için sınır birim deformasyon değerini 0.004 olarak önermektedir. E_{fv} CTP etriyenin elastisite modülüdür.

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

$$f_{fv} = 0.004E_{fv} \leq f_{fiv} \quad (4)$$

5.2.2. CSA S806-12 [2]

CSA S806-12 [2]'da betonun kesmeye katkısı (V_c) Razaqpur ve Isgor 2006 [23] tarafından geliştirilmiş olan Denklem (5)'e göre hesaplanmaktadır. Beton kesme dayanımı için önemli değişkenler dikkate alınmıştır. Moment-kesme etkileşimi (k_m), boyuna donatı eksenel rijitliği (k_r), boyut etkisi (k_s), ve kemer davranışı etki katsayısı (k_a) hesaba dahil edilmiştir (Denklemler (5-6)). ϕ_c , beton için dayanım katsayısını; λ , beton yoğunluğu katsayısını; M_f , N.mm cinsinden yük katsayıları ile hesaplanmış momenti ve V_f ise N cinsinden yük katsayıları yardımıyla hesaplanmış kesme kuvvetini göstermektedir. k_m ifadesi 1'den büyük değerler alamaz. Boyut etkisi katsayısı (k_s) boyut büyüdükçe dayanımın azalması esasına dayalıdır. d değerinin 300 mm'den büyük olması durumunda boyut etkisi 1'den daha küçük değerler alır. Ancak d 'nin 300'den küçük olduğu durumlarda ise $k_s = 1$ olarak alınır. k_a kullanımı ile ise a/d oranının 2.5 tan küçük olduğu derin kirişlerde beton kesme dayanımının artması etkisini dikkate alınmıştır. Ancak $a/d > 2.5$ olması durumunda bu katsayı 1 olarak alınmaktadır. Yani a/d oranı değişiminin beton kesme dayanımı üzerindeki katkısı ihmal edilmektedir.

$$V_c = 0.05 \lambda \phi_c k_m k_r k_s k_a (f_c)^{1/3} b_w d_v \quad (5)$$

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

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

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

$$k_a = \left(\frac{2.5 V_f}{M_f} d \right) \leq 1 \quad (6)$$

CSA S806-12'de [2] CTP etriyenin kesmeye katkısı Denklemler (7-8) ile gösterilmiştir. Etriyenin büküm noktasından kopmaması için 0.005 birim deformasyon sınır değeri önerilmiştir. CTP etriyenin dayanımı (f_{fv}) buna göre hesaplanmıştır. Donatı etkili derinliği (d) yerine etkili kesme derinliği ($d_v = \max(0.9d; 0.72h)$) ifadesi kullanılmıştır. Ayrıca ana kesme çatlağının açısı ($30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$) dikkate alınmıştır. Bu açının hesabında boyuna CTP donatılardaki birim deformasyon (ϵ_1) da dikkate alınmıştır.

$$V_{fvp} = \frac{0.4 \phi_f A_{fv} f_{fv} d_v}{s} \cot \theta \quad (7)$$

$$f_{fv} \leq 0.005 E_f$$

$$\theta = 30^\circ + 7000 \epsilon_1, 30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ, \epsilon_1 = \frac{M_f / d_v + V_f + 0.5 N_f}{2 E_f A_f} \quad (8)$$

5.2.3. ISIS-M03-07 [24]

ISIS-M03-07 [24] yönetmeliği betonun kesme dayanımını donatı etkili derinliğine yani boyut etkisine bağlı olarak Denklem (9)'daki gibi ifade etmiştir.

$$v_c = \begin{cases} 0.2 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f / E_s} & \text{for } d \leq 300 \text{ mm} \\ \left(\frac{260}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f / E_s} & \text{for } d > 300 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

ISIS-M03-07 [24] yönetmeliği CTP etriye kesme dayanımını ana kesme çatlağı açısı da dikkate alınacak şekilde Denklem (10-12) ile hesaplanmasını öngörmektedir. Etriye büküm noktası sınır birim deformasyon için 0.0025 değeri önerilmiştir. Etkili kesme derinliği ($d_v = 0.9d$) için ifadesi kullanılmıştır.

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

$$f_{fv} = \frac{(0.05 r_b / d_b + 0.3) f_{fuw}}{1.5} \text{ or } f_{fv} = E_{fv} \varepsilon_{fv} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{fv} = 0.0001 \sqrt{f_c \frac{\rho_f E_f}{\rho_{fv} E_{fv}}} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f_c} \right) \right] \leq 0.0025 \quad (12)$$

5.2.4. CNR DT203-06 [25]

CNR DT203-06 [25] yönetmeliği beton kesme katkısı için ρ_f 'in 0.02'yi aşmaması koşuluyla Denklem (13)'ü önermektedir. k_d boyut etkisi katsayısıdır. Bu katsayı boyut büyüdükçe dayanımın azalması esasına dayalıdır. Bu ifadede d değeri mm cinsinden ifade edilmektedir. a/d oranı göz ardı edilmiştir. (f_t) betonun karakteristik çekme dayanımını, τ_r tasarım kesme gerilmesini (Denklem (15)), E_s (200 GPa) ise çelik donatı elastisite modülünü ifade etmektedir. $1.3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \leq 1$ olacak şekilde uygulanacaktır.

$$v_c = 1.3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \tau_r k_d (1.2 + 40 \rho_f) b_w d \quad (13)$$

$$k_d = 1.6 - \frac{d}{1000} \geq 1 \quad (14)$$

$$\tau_r = 0.25 f_t \quad (15)$$

CNR DT203-06 [25] yönetmeliği etriye katkısı için Denklem (16)'yı dikkate almaktadır. CTP etriyenin büküm noktasının erken kopacağı dikkate alınarak, büküm noktasındaki dayanımın CTP etriyenin düz kısımdaki çekme dayanımının 2 (iki) güvenlik katsayısına bölümüyle elde edilmesini önermektedir (f_{fv}).

$$V_{fp} = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (16)$$

5.3. Modeller

Bu bölümde, etriyesiz CTP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları için yaygın olarak kullanılan modeller sunulmuştur. Tüm bu modellerde, beton katkısı için boyuna donatının aksenal rijitliği ve a/d oranı dikkate alınmaktadır.

5.3.1. Nehdi et. al. [26]

Nehdi et. al. [26] etriyesiz CTP donatılı kirişler ile gerçekleştirilen 68 çalışmayı kullanarak kesme dayanımlarını için yeni bir ifade önermiştir (Denklem (17)).

$$v_c = \begin{cases} 2.1 \left[f_c \rho_f \frac{E_f d}{E_s a} \right]^{0.3} b_w d & \text{for } \frac{a}{d} \geq 2.5 \\ 2.1 \left[f_c \rho_f \frac{E_f d}{E_s a} \right]^{0.3} b_w d \times \frac{2.5d}{a} & \text{for } \frac{a}{d} < 2.5 \end{cases} \quad (17)$$

5.3.2. Kara [27]

Kara [27] etriyesiz CTP donatılı kirişler ile gerçekleştirilen 110 deney verisini kullanarak kesme dayanımlarını için kullanılacak yeni bir ifade geliştirmiştir (Denklem (18)). Boyuna donatı eksenel rijitliği ve a/d oranı dikkate alınmaktadır.

$$V_c = \left[6.8 \sqrt[3]{\frac{d}{a} f_c \rho_f \frac{E_f}{E_s}} \right]^{1/3} b_w d \quad (18)$$

5.3.3. Ali et. al. [1]

Ali et. al. [1] çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizi ile 510 deney verisini kullanarak etriyesiz CTP donatılı kirişler için kesme dayanımları için yeni bir ifade önermiştir (Denklem 19). Boyuna donatı eksenel rijitliği ve a/d oranı dikkate alınmaktadır.

$$V_c = 0.35 \lambda_{sh} (E_f \rho_f)^{1/4} (f_c)^{1/4} \left(\frac{1}{1+0.005d} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{a} \right)^{\lambda_a} b_w d \quad (19)$$

λ_{sh} , en kesit şekil faktörü olarak tanımlanmıştır. Dikdörtgen kesitler için 1, dairesel kesitler için 0.75 değerleri önerilmiştir. λ_a ifadesi, kesme mekanizması faktörü olarak tanımlanmıştır. a/d oranının 2.5 tan büyük olması durumunda $\lambda_a = 1$, a/d oranının 2.5 tan küçük olması durumuna $\lambda_a = 1/3$ değerini almaktadır.

5.4. Kesme Kapasitesinin Tahmini

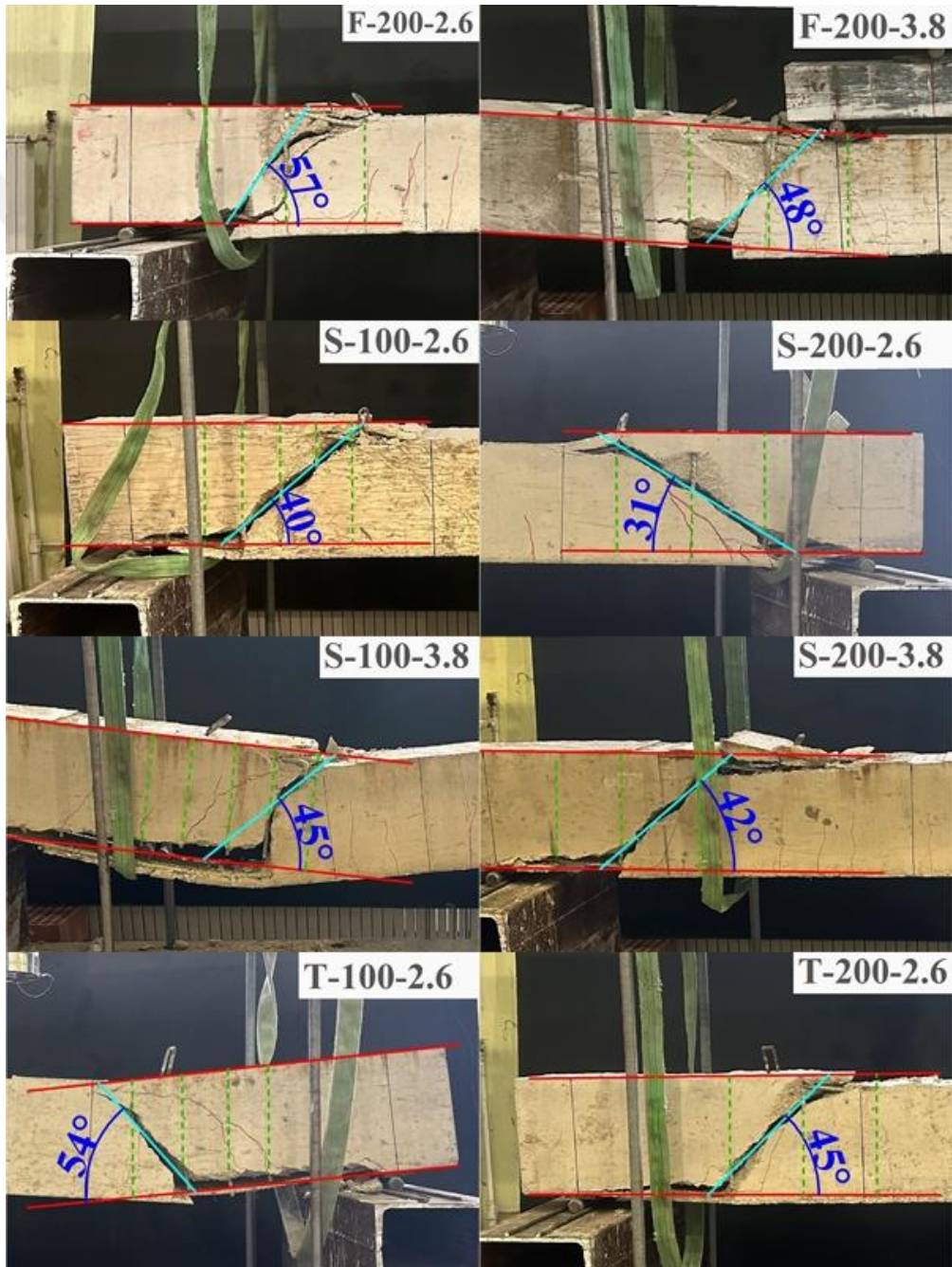
Çizelge 6'da, kesme kırılmasına maruz kalan CTP enine/boyuna donatılı kirişlerin kesme dayanımları ($V_n=V_c+V_{frr}$) yönetmelikler kullanılarak tahmin edilmiş ve deneysel kesme verileri (V_{exp}) ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar gerçekleştirilirken CSA S806-12 [2] ve ISIS M03-07 [24] yönetmelikleri ana kesme çatlağı açısı deneysel verilerden elde edilmiştir. (Şekil 37) Ayrıca tüm malzeme katsayıları 1 olarak alınmıştır. CTP etriye kesme dayanımı için her yönetmelikte yer alan büküm noktasından kopması dikkate alınan sınır birim deformasyon değeri kullanılmıştır.

F-S tipi etriyeli ve kesme kırılması ile taşıma gücüne ulaşan deney elemanları (F-200-3.8 ve F-200-2.6) için, ACI 440-1R-15 [3] ve CSA S806-12 [2] güvenli tarafta kalan tahminler gerçekleştirirken, ISIS M03-07 [24] ve CNR DT203-06 [25] güvenli tarafta kalmayan sonuçlar vermektedir. Deneysel verilere en yakın sonuçlar ACI 440-1R-15 [3] ile gerçekleştirilmiştir.

S tipi ve T tipi etriyeli deney elemanlarında tüm yönetmelikler ile genel olarak deneysel verilerden daha yüksek tahminler elde edilmiştir. Deneysel veriler ile en uyumlu sonuçlar (V_{exp}/V_n), CSA S806-12 [2] yönetmeliğindeki formüller yardımıyla elde edilmiştir (Ortalama=0.81 – Varyans=%14.38). Bu durumun literatürde değinildiği gibi CSA S806-12 [2] yönetmeliğinin beton kesme katkısını en iyi şekilde tahmin etmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. CNR DT203-06 [25] yönetmeliğindeki formüllerin ise deneysel verilerden en uzak analitik tahminleri sağladığı görülmektedir (Ortalama=0.35 – Varyans=%24.09). ACI 440-1R-15 [3] formüllerinden elde edilen analitik değerlerin, CSA S806-12 [2] formüllerinden elde edilen ilgili değerlere yakın olduğu görülmektedir (Ortalama=0.72 – Varyans=%21.67).

Genel olarak, F tipi (tam kapalı CTP etriyeli) betonarme elemanların deneysel kesme kapasitelerinin, özellikle ACI 440-1R-15 [3] tarafından önerilen kesme formüllerinden elde edilen değerlerle son derece yakın bir uyum içinde olduğu görülmektedir. S ve T tipi ayrıklı etriyeli kirişlerdeki ilgili dayanımlar ise ACI 440-1R-15 [3] eşitliklerine göre hesaplanan ilgili analitik dayanımların genellikle %25-45 altında kalmaktadır. Bu durum S tipi ve T tipi etriyelerin, F tipi kadar etkin olmadığını yani düşük birim deformasyon değerlerinde koptuğunu veya etkinliğini yitirdiğini işaret etmektedir. CSA S806-12 [2] formüllerinden elde edilen değerler, tam etriyeli elemanların

deneysel kesme değerlerinin %15-20 mertebesinde altında kalırken, S ve T tipi ayırık etriyeli elemanların deneysel değerlerinden sadece %25 mertebesinde yüksek kalmaktadır. Yani genel olarak, kapalı CTP etriyeli elemanların kesme kapasitelerinin tahmininde ACI 440-1R-15 [3] formüllerini daha doğru sonuçlar verirken, ayırık etriyeli elemanların kapasitelerinin belirlenmesinde CSA S806-12 [2] formüllerinden daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. ISIS M03-07 [24] ve CNR DT203-06 [25] formüllerini ise tüm kiriş gruplarında aşırı güvenli fakat doğru olmayan sonuçlar verdiği için daha detaylı değerlendirmelere katılmamıştır.



Şekil 37. Deney elemanlarına ait ana kesme çatlağı açıları

Çizelge 6. Kesme kırılmasına uğrayan deney elemanlarına ait karşılaştırmalı kesme hesapları

Kiriş	Kırılma Modu	V _{exp} (kN)	ACI 440-1R-15 [3]		CSA S806 -12 [2]		ISIS M03-07 [24]		CNR DT203-06 [25]	
			V _n (kN)	V _{exp} /V _n	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 kırılması	63.04	61.92	1.02	53.07	1.19	78.37	0.80	123.53	0.51
F-200-2.6	CTP donatının kopması	64.15	61.92	1.04	56.80	1.13	65.11	0.99	123.53	0.52
S-100-3.8*	Aderans göçmesi ve Kesme kırılması	53.72	99.53	0.54	71.67	0.75	136.49	0.39	211.65	0.25
S-200-3.8*	Kesme kırılması	40.84	61.92	0.66	56.62	0.72	89.48	0.46	123.53	0.33
S-100-2.6*	Kesme kırılması	63.76	99.53	0.64	86.14	0.74	156.79	0.41	211.65	0.30
S-200-2.6*	Kesme kırılması	61.81	61.92	1.00	73.97	0.84	118.74	0.52	123.53	0.50
T-100-2.6*	Kesme kırılması	72.51	99.53	0.73	70.40	1.03	107.58	0.67	211.65	0.34
T-200-2.6*	Kesme kırılması	48.06	61.92	0.78	62.73	0.77	83.64	0.57	123.53	0.39
			Ortalama*	0.72	Ortalama*	0.81	Ortalama*	0.50	Ortalama*	0.35
			Standart Sapma(%)*	15.68	Standart Sapma(%)*	11.60	Standart Sapma(%)*	10.78	Standart Sapma(%)*	8.50
			Varyasyon(%)*	21.67	Varyasyon(%)*	14.38	Varyasyon(%)*	21.37	Varyasyon(%)*	24.09

* S tipi ve T tipi etriyeli deney elemanlarının ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayısı hesaplanmıştır.

Çizelge 7. CTP donatılarının karşılaştırmalı deneysel gerilme değerleri

Kiriş	CNR DT203-06 [25]		CSA S806 -12 [2]		Ali et. al. [1]		Kara [27]	
	V_{cp} (kN)	ϵ_{exp}	V_{cp} (kN)	ϵ_{exp}	V_{cp} (kN)	ϵ_{exp}	V_{cp} (kN)	ϵ_{exp}
F-100-3.8	35.45	0.0024	37.83	0.0022	39.02	0.0022	41.16	0.0021
F-200-3.8*	35.45	0.0029	37.83	0.0027	39.02	0.0026	41.16	0.0023
F-100-2.6	35.45	0.0044	45.81	0.0039	57.23	0.0032	42.95	0.0040
F-200-2.6*	35.45	0.0031	45.81	0.0020	57.23	0.0007	42.95	0.0023
S-100-3.8*	35.45	0.0010	37.83	0.0008	39.02	0.0008	41.16	0.0007
S-200-3.8*	35.45	0.0006	37.83	0.0003	39.02	0.0002	41.16	0.0000
S-100-2.6*	35.45	0.0015	45.81	0.0010	57.23	0.0003	42.95	0.0011
S-200-2.6*	35.45	0.0028	45.81	0.0017	57.23	0.0005	42.95	0.0020
T-100-2.6*	35.45	0.0020	45.81	0.0014	57.23	0.0008	42.95	0.0016
T-200-2.6*	35.45	0.0013	45.81	0.0002	57.23	-0.0010	42.95	0.0005

* Kesme kırılmasına uğrayan elemanlar

ϵ_{exp} - CTP donatılarının deneysel gerilme değerleri

V_{cp} – Tahmini beton kesme dayanımı

5.5. Enine Donatı için Hesaplanan Birim Deformasyon

FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımları için iki temel bileşen hesaplara dahil edilmektedir. Bu iki değişken temel olarak, betonun (V_c) ve CTP etriyenin (V_{frp}) kesme katkılarıdır. CTP enine donatılar, büküm noktalarında düşük birim deformasyon değerlerinde kopmaktadır.

İlgili yönetmelikler CTP etriyeler için farklı sınır birim deformasyon değerleri önermektedir (0.005, 0.004 ve 0.0025 gibi). Gerçekleştirilen çalışmalar, bu birim deformasyon değerlerinin oldukça güvenli tarafta kaldığını göstermiştir. Bu durum kesme dayanımının içinde betonun ve CTP etriyelerin katkısının ne olduğunun ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, öncelikle CTP boyuna donatılı ancak etriyesiz deneysel çalışmalar incelenerek beton katkısının en doğru şekilde tahmin edilmesi ve sonra CTP etriye katkısının en doğru biçimde belirlenmesi şeklinde bir yöntem esas alınmıştır. Literatürde ve yönetmeliklerde CTP donatılı ancak etriyesiz kirişlerde beton kesme dayanımı (V_c) için çok sayıda model ve analitik ifade önerilmektedir. Araştırmacılar, CTP donatılı kirişlerin deney verilerini kullanarak, beton kesme dayanımı farkını yönetmelik ve modeller ile tahmin etmiştir. Aşağıda farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen ve mevcut çalışmadakine benzer olarak a/d oranı 2.5'tan büyük olan kirişler ile ilgili veriler sunulmuştur. Ali et al. [1], 510 adet CTP donatılı kiriş deney verisi kullanarak ortalama V_{exp}/V_c oranını CSA S806-12 [2] formüllerine göre 1.07, ACI 440.1R-15 [3] formüllerine göre 2.03, Kara [27] modeline göre 1.10, Nehdi et. al. [26] modeline göre 1.16 ve kendi modeline göre 1.05 olarak belirlemiştir. El Zareef et. al. [6] ise 386 adet FRP donatılı kiriş deney verisi içinde ortalama V_{exp}/V_c oranını CSA S806-12 [2] formüllerine göre 1.1, ACI 440.1R-15 [3] formüllerine göre 1.9, CNR DT203-06 [25] formüllerine göre 0.9 olarak belirlemiştir. Alguhi and Tomlinson [8], 147 test verisini kullanarak, CTP donatılı kirişlerde ortalama V_{exp}/V_c oranını CSA S806-12 [2] formüllerine göre 1.04, ACI 440.1R-15 [3] formüllerine göre 1.96, CNR DT203-06 [25] formüllerine göre 1.11 ve ISIS-M03-07 [24] formüllerine göre 1.38 olarak belirlemiştir. Ayrıca her CTP tipi donatılı ve $d_v < 300$ mm olan kirişlerde ortalama V_{exp}/V_c oranını CSA S806-12 [2] formüllerine göre 1.03, ACI 440.1R-15 [3] formüllerine göre 1.89, CNR DT203-06 [25] formüllerine göre 1.02 ve ISIS-M03-07 [24] formüllerine göre 1.38 olarak belirlemiştir. Alam and Gazder [10], 196 test verisi yardımıyla CSA S806-12 [2]

formüllerine göre V_{exp}/V_c oranını ortalama 1.06 olduğunu ifade etmiştir. Kara [27] ise 104 adet deney verisi ile kendi geliştirdiği model için V_{exp}/V_c oranını ortalama 1.03 olarak ifade etmiştir.

Birçok çalışma; ACI 440.1R-15 [3]'ün oldukça güvenli tahminler yaptığını, ancak deneysel verilere en yakın sonuçlara ise CSA S806-12 [2] formülleri yardımıyla ulaşıldığını ifade etmektedir. Bunun yanı sıra CNR DT203-06 [25] ile de deneysel verilere oldukça yakın tahminler gerçekleştirilebilmiştir. Modeller içinde ise Ali et. al. [1] ve Kara [27] ifadeleri ile deneysel verilere oldukça yakın tahminler gerçekleştirilebilmektedir. Bu sebeple, çalışmamızda CTP etriyenin kesme katkısının belirlenmesi için deneysel verilerle en uyumlu yönetmelik ve modeller kullanılarak tahminler yapılmıştır (Çizelge 4). Denklem (20)'de deneysel kesme kuvvetinden ($V_{f,exp}$) tahmin edilen beton kesme dayanımı (V_{cp}) değerinin çıkarılmasıyla CTP etriyelerin deneysel katkıları hesaplanmıştır. Denklem (21) 'de ise CTP etriyelerin deneysel birim deformasyon değerleri elde edilmiştir.

$$V_{f,exp} = V_{exp} - V_{cp} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{exp} = \frac{s \cdot V_{f,exp}}{A_{fv} \cdot d \cdot E_{fv}} \quad (21)$$

5.5.1. CTP Etriye Tipi

F tipi etriyelerde, S ve T tiplerine göre daha büyük birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. Eğilme kapasitesine ulaşan F-100-2.6 deney elemanında, her model ve yönetmeliğe göre en büyük birim deformasyon değeri gözlemlenmiştir. CTP etriyenin koptuğu F-200-2.6 deney elemanında; CNR DT203-06 [25], CSA S806-12 [2], Ali et. al. [1], ve Kara [27]'ye göre sırasıyla 0.0031, 0.002, 0.007 ve 0.0023 birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. CTP etriyeler için; CSA S806-12 [2] yönetmeliğinde 0.005 sınır birim deformasyon değerinin bulunmasına rağmen, 0.002 birim deformasyon değerinde CTP etriye kopmuştur. Bu durum CTP malzemesinin yerel kusurlu olmasıyla ya da malzeme mekanik özelliklerinin değişkenliği ile açıklanabilir. CNR DT203-06 [25] yönetmeliğinde herhangi bir sınır birim deformasyon değeri bulunmamaktadır.

S tipi etriyeli deney elemanlarında birim deformasyon değerleri düşmüştür. CNR DT203-06 [25], CSA S806-12 [2], Ali et. al. [1], ve Kara [27] formül ve modellerine göre sırasıyla birim deformasyon değerleri yaklaşık 0.003, 0.002, 0.001 ve 0.002 değerlerinden daha düşüktür. Ayrıca Kara [27] modeline göre S-200-3.8 betonun kesme katkısı deneysel kesme dayanımına eşit olarak hesaplanmış, CTP etriyede herhangi bir zorlanma ortaya çıkmamış ve birim deformasyon değeri 0 olarak bulunmuştur. Diğer modellere göre de S-200-3.8 birim deformasyon değerleri 0.006'ya eşit ya da daha düşüktür. T tipi etriyeli deney elemanlarında ise etriye aralığının artmasıyla tüm modellere göre birim deformasyon değerleri düşmüştür. Ayrıca Ali et. al. [1] modeline göre T-200-2.6 deney elemanında betonun kesme katkısı deneysel kesme değerinden de büyüktür.

Tüm modellere göre; a/d oranı 2.6 ve etriye aralığı 100 mm olan deney elemanları içinde birim deformasyon değerleri büyükten küçüğe sırasıyla F, T ve S tiplerine aittir. Ancak a/d oranı 2.6 ve etriye aralığı 200 mm olan deney elemanlarında ise birim deformasyon değerleri büyükten küçüğe sırasıyla F, S ve T etriye tiplerine aittir. Bu sonuçlara T ve S etriye tipleri arasında kesin bir farklılığın bulunmadığını göstermektedir. Ancak F tipine göre diğer iki tip etriyeler etkinlikleri daha azdır.

5.5.2. CTP Etriye Aralığı

F tipi deney elemanlarında etriye aralığının artması kırılma modunu değiştirmiştir. F tipi ve $a/d=2.6$ olan deney elemanlarında etriye aralığının artırılması kesme dayanımını azaltmıştır.

S tipi deney elemanlarında ($a/d = 3.8$) etriye aralığının artması tüm yönetmelik ve modellerde gerilme değerinde azalmaya neden olmuştur.

T tipi deney elemanlarında etriye aralığının artması, tüm modellere göre kesme dayanımının azalmasına neden olmuştur. Ayrıca Ali et. al. [1] modeline göre, T-200-2.6 deney elemanında betonun kesme katkısı deneysel kesme değerinden daha büyüktür.

5.5.3. Kesme Açıklığının Kiriş Faydalı Yüksekliğine (a/d) Oranı

Yapılan farklı çalışmalarda a/d oranının azalmasının betonun kesme katkısını artırdığını göstermektedir. Tüm yönetmelik ve modellerde S tipi deney elemanları için etriye aralığına bakılmaksızın, a/d oranının azalması kesme dayanımının artmasına

neden olmuştur. Ancak 100 mm etriye aralığına sahip deney elemanlarında (S-100-3.8 ve S-100-2.6) Ali et. al. [1] modelinde bir azalma gözlemlenmiştir. Kesme dayanımında en düşük artış Ali et. al. [1] modelinde gözlenmiştir. Bu sonuçlar, Ali et. al. [1] modelinin diğer modellere kıyasla betonun kesme dayanımındaki değişikliğin etkisini daha çok dikkate almasıyla ilgilidir.

Genel yaklaşımın aksine, F tipi deney elemanlarında (F-200-3.8 ve F-200-2.6) a/d oranının azalması, CNR DT203-06 [25] hariç, kesme dayanımlarının azalmasına neden olmuştur. Bu durum CTP enine donatının çok düşük kesme değerinde kopmasından kaynaklanmaktadır.(F-200-2.6)



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Cam Takviyeli Polimer (CTP) donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışlarının incelendiği mevcut çalışmada toplam 11 adet betonarme kirişin dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada GFRP etriye tipi, etriye aralığı ve kesme açıklığı-faydalı yükseklik (a/d) oranı deney değişkenleri olarak belirlenmiş olup bu parametrelerin kırılma modu, yük ve enerji sönümlene kapasiteleri üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Tam kapalı CTP, ayrık dört çubuklu CTP ve ayrık iki düşey çubuklu CTP etriyeli betonarme elemanların yanı sıra tam kapalı çelik etriyeli bir referans eleman da deney programına dahil edilmiştir. Betonun basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının belirlenmesi için malzeme deneylerine başvurulmuştur. Elemanların deneysel değerleri, ACI 440-1R-15 [3], CSA S806-12 [2], ISIS M03-07 [24] ve CNR DT203-06 [25] yönetmeliklerinde yer alan analitik ifadeler ve daha önce farklı araştırmacılar tarafından önerilen farklı modellerden elde edilen tahmini kesme dayanımı ve enine donatı birim deformasyonu değerleri ile karşılaştırılarak deneysel sonuçlar daha doğru yorumlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- CTP etriyeli kiriş davranışları üzerinde en büyük etkiye sahip olan deney değişkeninin etriye tipi olduğu belirlenmiştir. Kapalı CTP etriyeli elemanların, ayrık CTP etriyeli elemanlara göre en büyük üstünlüğünün kapalı etriyelerin betona ve boyuna donatılara uyguladığı sargılama etkisi olduğu gösterilmiştir. Buna göre, kapalı etriyelerin uyguladığı sargılama etkisi sayesinde donatı ile beton arasındaki aderans çözülmesi gecikmekte ve eşdeğer çapraz beton basınç çubuklarının stabilitesi artmaktadır. Bu olumlu etkiler sayesinde, CTP etriyeli betonarme elemanın yük-sehim eğrisindeki yatay kısmın uzunluğu artmakta ve dolayısıyla kirişin süneklik ve enerji sönümlene kapasitesinde önemli artışlar ortaya çıkmaktadır. Ayrık, çubuk etriyeli kirişlerde bu olumlu etkiler ortaya çıkmamakta ve kirişler erken kesme tipi kırılmalara maruz kalmaktadır.
- Ayrık (S ve T tipi) etriyeli deney elemanlarının tamamında kesme kırılması gerçekleşmiştir. Bu elemanlarda, çapraz çekme çatlakları ile çekme donatısı

seviyesindeki aderans çatlaklarının aşırı düzeyde genişlemesi ve ilerlemesi sonucu çatlağın her iki tarafındaki kiriş parçaları birbirlerinden ayrılacak derece büyük deformasyonlara uğramışlardır. Bununla birlikte, çelik etriyeli R ve kapalı CTP (F tipi) etriyeli (F-100-2.6 ve F-100-3.8 deney numuneleri eğilme kapasitelerine ulaşmıştır. Bu elemanlarda, kapalı etriyeler eğik çekme ve kesme-basınç kırılmalarının önüne geçmiştir.

- Tam CTP etriyeli F-100-3.8 elemanı da R elemanı gibi eğilme taşıma gücüne ulaşmasına rağmen F-100-3.8 elemanının yük ve enerji sönümleme kapasitesi değerleri R elemanının ilgili değerlerinden yaklaşık %9 daha düşüktür. Bu durum çelik etriyenin sargılama etkisinin F-type etriyeye göre daha yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, CTP etriyelerin kancalarının 135° bükülememesi de bu etriyelerin çelik etriyelerden daha az etkin olmalarında rol oynamaktadır.
- Kapalı (F tipi) CTP etriyeli numunelerde etriye aralığının artması (100 mm'den 200 mm'ye) ile kırılma türü eğilmeden kesmeye dönüşmüştür. Buna bağlı olarak yük ve enerji sönümleme kapasitesi değerlerinde önemli azalmalar ortaya çıkmıştır.
- Kesme açıklığından bağımsız olarak, 100 mm etriye aralıklı deney elemanlarında F tipi kapalı etriye yerine ayırık çubuklu etriye kullanılması neticesinde kırılma modu eğilmeden kesmeye dönmekte ve yapısal performans son derece olumsuz olarak etkilenmektedir.
- F-200-2.6 deney elemanında kapalı etriye büküm noktasından kopmuştur. Bu erken kırılma sonucu, ilgili kapalı etriyeli eleman aynı etriye aralığı ve kesme açıklığına sahip ayırık (S ve T tipi) etriyeli elemanlarla benzer davranışlar göstermiştir. Ancak bu yakınlık, F tipi etriyenin yerel kusuru olması nedeniyle kapasitesini kullanamamasından kaynaklanmıştır. F tipi etriyelerin kapasitelerine ulaştığı durumlarda ise S- ve T tipi etriyelere göre son derece etkin oldukları aşikardır.
- S- ve T- tipi etriyeli deneye elemanlarında aderans problemleri F-tipi etriyeli elemanlara göre daha fazlaca gözlemlenmiştir. Özellikle de S-100-3.8 deney elemanında kesme-basınç kırılması ile aderans kırılması aynı yük değerlerinde ortaya çıkmıştır. Buna göre, ayırık etriye kullanılması durumunda etriye beton örtüsünün arttırılması çok önemlidir.
- ACI 440-1R-15 [3] tarafından önerilen kesme formüllerinden elde edilen analitik kesme dayanımı değerlerinin, kapalı (F tipi) CTP etriyeli elemanların deneysel

dayanım değerleri son derece uyumlu olduğu belirlenmiştir. S ve T tipi ayrıık etriyeli kirişlerdeki ilgili dayanımlar ise ACI 440-1R-15 [3] eşitliklerine göre hesaplanan ilgili analitik dayanımların genellikle %25-45 altında kalmaktadır. Bu durum S tipi ve T tipi etriyelerin, F tipi kadar etkin olmadığını yani düşük birim deformasyon değerlerinde koptuğunu veya etkinliğini yitirdiğini işaret etmektedir.

- CSA S806-12 [2] formüllerinden elde edilen kesme dayanımı değerleri, tam etriyeli elemanların deneysel kesme değerlerinin %15-20 mertebesinde altında kalırken, S ve T tipi ayrıık etriyeli elemanların deneysel değerlerinden sadece %25 mertebesinde yüksek kalmaktadır. Yani genel olarak, kapalı CTP etriyeli elemanların kesme kapasitelerinin tahmininde ACI 440-1R-15 [3] formülleri daha doğru sonuçlar verirken, ayrıık etriyeli elemanların kapasitelerinin belirlenmesinde CSA S806-12 [2] formüllerinden daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.
- ISIS M03-07 [24] ve CNR DT203-06 [25] formülleri tüm kiriş gruplarında aşırı güvenli fakat doğru olmayan sonuçlar verdiği için daha detaylı değerlendirmelere katılmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Ali, A. H., Mohamed, H. M., Chalioris, C. E., & Deifalla, A. (2021). Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 235, 112017.
- [2] CSA, Code for the Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, in CAN/CSA/S806-12, Canadian Standard Association, Toronto, Ontario, Canada, 2012, p. 198.
- [3] 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, Farmingtons, Hills, MI.
- [4] Mukhtar, F., & Deifalla, A. (2023). Shear strength of FRP reinforced deep concrete beams without stirrups: Test database and a critical shear crack-based model. *Composite Structures*, 307, 116636.
- [5] Elghandour, B., Eltahawy, R., Shedid, M., & Abdelrahman, A. (2023). Prediction of shear strength for CFRP reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, 284, 115946.
- [6] El Zareef, M. A., Elbisy, M. S., & Badawi, M. (2021). Evaluation of code provisions predicting the concrete shear strength of FRP-reinforced members without shear reinforcement. *Composite Structures*, 275, 114430.
- [7] Ashour, A. F., & Kara, I. F. (2014). Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 60, 612-620.
- [8] Alguhi, H., & Tomlinson, D. (2021). One-way shear strength of FRP-reinforced concrete members without stirrups: Design provision review. *Journal of Composites for Construction*, 25(3), 04021016.
- [9] Park, H. G., & Choi, K. K. (2017). Unified shear design method of concrete beams based on compression zone failure mechanism. *Concrete International*, 39(9), 59-63.
- [10] Alam, M. S., & Gazder, U. (2020). Shear strength prediction of FRP reinforced concrete members using generalized regression neural network. *Neural Computing and Applications*, 32, 6151-6158
- [11] JSCE, 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, 1997, p. 325.

- [12] BISE, Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fiber Composite Reinforcement, British Institution of Structural Engineers, Seto Ltd, London, U.K., 1999.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Duic, J., Kenno, S., & Das, S. (2018). Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. *Construction and Building Materials*, 176, 470-481.
- [20] 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.
- [21] MacGregor, J. G. and Wight, J. K. (2006). *Reinforced concrete: Mechanics and design* (Vol. 3). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [22] Tureyen, A. K., & Frosch, R. J. (2003). Concrete shear strength: Another perspective. *Structural Journal*, 100(5), 609-615.
- [23] Razaqpur, A. G., & Isgor, O. B. (2006). Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups. *ACI Structural Journal*, 103(1), 93.
- [24] ISIS, Reinforced Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers – Design Manual No. 3, ISIS Canada Corporation: University of Manitoba, Manitoba, Canada, 2007.

[25] CNR-DT.203, Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars, in (Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction), 2007, CNR-DT 203/2006.

[26] Nehdi, M., El Chabib, H., & Saïd, A. A. (2007). Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach. *Journal of materials in civil engineering*, 19(12), 1033-1042.

[27] Kara, I. F. (2011). Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming. *Advances in Engineering Software*, 42(6), 295-304.

