



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BETONARME KİRİŞLERDE ETRİYEYE
ALTERNATİF OLARAK KULLANILMASI
PLANLANAN I VE U ŞEKLİ DÖNATILARIN
KESME DAYANIMINA KATKISININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Yeşil NARİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yeşil NARİN tarafından hazırlanan “**Betonarme Kirişlerde Etriyeye Alternatif Olarak Kullanılması Planlanan I ve U Şekilli Donatıların Kesme Dayanımına Katkısının Deneysel Olarak İncelenmesi**” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

Danışman

Doç. Dr. Ceyhan AKSOYLU
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Prof. Dr. Ercan IŞIK
(Bitlis Eren Üniversitesi)

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Yeşil NARİN

Tarih: 16/06/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

BETONARME KİRİŞLERDE ETRİYEYE ALTERNATİF OLARAK KULLANILMASI PLANLANAN I VE U ŞEKLİ Lİ DONATILARIN KESME DAYANIMINA KATKISININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yeşil NARİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

2025, 93 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Prof. Dr. Ercan IŞIK

Bu çalışmada, betonarme kirişlerde geleneksel tam sargılı etriyelere alternatif olarak *I* ve *U* şeklindeki kesme donatılarının kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı kanca boylarına ve etriye aralıklarına sahip alternatif kesme donatıları kullanılarak, bu donatıların kirişlerin taşıma kapasitesine, sünekliğine, rijitliğine ve hasar modlarına etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında toplam 18 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bunlardan 6'sı geleneksel tam sargılı etriyelere sahip referans numuneleri olarak belirlenmiş, diğer 12 numunede ise kanca boyları 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm olarak seçilmiş ve etriye aralıkları 5 cm, 10 cm ve 15 cm olarak düzenlenmiştir. Kirişler dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiş, yük taşıma kapasiteleri, deplasman değerleri ve çatlak desenleri analiz edilmiştir.

Deney sonuçları, 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyelerin kesme kapasitesi açısından tam sargılı etriyelerle en yakın performansı gösterdiğini, ancak kanca boyu 0 cm ve 1.5 cm olan numunelerde daha ani ve gevrek kırılmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, etriye aralığının artmasıyla birlikte taşıma kapasitesinde düşüş gözlenmiş ve kesme hasarlarının daha erken oluştuğu belirlenmiştir. Alternatif donatıların sünekliği artırmada kısmen etkili olduğu ancak geleneksel tam sargılı etriyelerin sağladığı dayanım seviyesine ulaşamadığı görülmüştür.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, *I* ve *U* şeklindeki donatıların tam sargılı etriyeler yerine doğrudan bir alternatif olarak kullanılması önerilmemektedir. Kesme dayanımının kritik olduğu yapısal elemanlarda geleneksel etriyelerin tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, farklı donatı konfigürasyonları ve beton sınıflarıyla genişletilmiş deneyler yapılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kiriş, Etriye Kanca Boyu, Etriye, Kesme Dayanımı

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CONTRIBUTION OF I AND U SHAPED REINFORCEMENT PLANNED TO BE USED AS AN ALTERNATIVE TO STIRRUPS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS TO SHEAR STRENGTH

Yeşil NARİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU

2025, 93 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Ceyhun Aksoylu
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Prof. Dr. Ercan IŞIK**

In this study, the feasibility of using *I*- and *U*-shaped shear reinforcements as an alternative to conventional full-anchored stirrups in reinforced concrete beams was experimentally investigated. Alternative shear reinforcements with different hook lengths and stirrup spacings were used to examine their effects on the load-carrying capacity, ductility, stiffness, and failure modes of the beams.

A total of 18 reinforced concrete beam specimens were produced for the experimental study. Among these, six specimens were designated as reference specimens with conventional full-anchored stirrups, while the remaining 12 specimens featured hook lengths of 0 cm, 1.5 cm, and 3.5 cm, with stirrup spacings of 5 cm, 10 cm, and 15 cm. The beams were tested using a four-point bending test, and their load-bearing capacities, displacement values, and crack patterns were analyzed.

The experimental results indicated that the specimens with 3.5 cm hook lengths exhibited the closest shear capacity performance to that of fully anchored stirrups. However, specimens with 0 cm and 1.5 cm hook lengths exhibited more sudden and brittle failures. Additionally, an increase in stirrup spacing resulted in a decrease in load-bearing capacity and led to earlier shear failures. While the alternative reinforcements were partially effective in enhancing ductility, they failed to achieve the strength level provided by conventional full-anchored stirrups.

Based on the findings, it is not recommended to use *I*- and *U*-shaped reinforcements as a direct replacement for full-anchored stirrups. It has been determined that traditional stirrups should be preferred for structural elements where shear strength is critical. Future studies should conduct extended experiments with different reinforcement configurations and concrete classes to further investigate the applicability of these alternative shear reinforcement systems.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Stirrup Hook Length, Stirrup, Shear Strength

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında, bilgisiyle yolumu aydınlatan, sabrıyla destekleyen ve rehberliğiyle akademik yolculuğumu daha anlamlı kılan değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun desteği olmasaydı, bu sürecin her anında aynı kararlılıkla ilerlemem mümkün olmazdı.

Deneyisel çalışmalar süresince verdikleri destekten ötürü, başta Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı emekli teknisyeni Sayın Yüksel Çiftçi olmak üzere tüm laboratuvar personeline teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmam sırasında sık sık yardımlarına ve tecrübelerine başvurduğum değerli arkadaşım Arş. Gör. Yusuf UYSAL'a da teşekkür etmek isterim. Hiçbir zaman desteğini esirgemediği, her zaman fikirleriyle yol gösterdiği için kendisine minnettarım.

Ve tabii ki, canım kız kardeşim Ayşe NARİN! Tez sürecinde benimle birlikte stres olup benimle birlikte sevindiğin, sabırla dertlerimi dinleyip her zaman yanımda olduğun için sana kocaman teşekkür ederim. Motivasyon kaynağım ve en büyük destekçim olduğun için iyi ki varsın!

Son olarak, her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Yeşil NARİN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tezin Önemi.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Deney Numuneleri.....	21
3.1.1. Deney numunelerinin boyutları	22
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları.....	23
3.1.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri.....	24
3.2. Deney Düzenegi	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	32
4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları.....	33
4.1.1. 1. Grup Deneyleri.....	33
4.1.2. 2. Grup Deneyleri.....	57
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi.....	69
4.2.1. Maksimum yük kapasitesinin değerlendirilmesi	72
4.2.2. Göçme tiplerinin değerlendirilmesi	73
4.2.3. Rijitlik açısından değerlendirme	75
4.2.4. Süneklik ve eğilme kapasitesinin değerlendirilmesi.....	77
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
5.1. Sonuçlar	79
5.2 Öneriler	81
KAYNAKLAR	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_v	: Yükleme noktasının mesnet yüzüne uzaklığı, mm
$B420c$	: Akma dayanımı en düşük 420 MPa olan nervürlü donatı tipi
$C25$	: 28 gün suda bekletilmiş silindirik basınç dayanımı 25 MPa olan beton
d	: Kesitin faydalı yüksekliği, mm
P_{max}	: Maksimum yük değeri, kN
S_y	: Nominal akma noktasındaki rijitlik, kN/mm
V_c	: Kesme dayanımına beton katkısı, kN
V_{cr}	: Betonun eğik çatlama dayanımı, kN
δ_{max}	: Maksimum yük seviyesindeki deplasman değerini, mm
δ_u	: Kopma anındaki deplasman değeri, mm
δ_y	: Akma anındaki deplasman değeri, mm
$\emptyset$	: Donatı çapı, mm
μ	: Süneklik katsayısı

Kısaltmalar

ACI 318-19	: Amerikan Beton Enstitüsü 318-19
CAN/CSA	: Kanada Standartlar Kuruluşu
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
ÇKS	: Çatlak Kilit Sistemi
EUROCODE8	: Avrupa Standart Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı
FFRP	: Keten Elyaf ile Güçlendirilmiş Polimer
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
FSS	: Fiber Levha Şeritleri
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
MÇD	: Mekanik Çelik Dikiş
PLC	: Potansiyometrik Lineer Cetvel
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TS500	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda kirişler, döşemelerden gelen yükleri kolonlara aktararak binanın taşıyıcı sisteminde önemli bir rol oynar. Bu elemanlar, aynı zamanda yapıya etkiyen yatay yüklerin (rüzgâr, deprem gibi) dağılımında da görev alır. Kiriş elemanlarının kesit boyutları, içerisindeki donatılar ve mesnetlenme koşulları, taşıyıcı sistemin genel davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Esen ve ark., 2022).

Kirişlere öncelikle eğilme etkisine karşı koyacak şekilde donatılar yerleştirilir. Kirişe etkiyen yükler altında oluşan moment diyagramı dikkate alınarak, kirişin çekme ve basınç bölgelerine boyuna donatılar yerleştirilir. Ardından, kesme kuvvetlerine karşı koymak amacıyla, boyuna donatılara dik açı oluşturacak şekilde enine donatılar (etriyeler) yerleştirilir. Böylece kiriş elemanı için eğilme momentlerini ve kesme kuvvetlerini güvenle taşıyabileceği bir tasarım gerçekleştirilir (Üstün, 2022).

Betonun çekme dayanımı, kesme ve basınç dayanımına kıyasla oldukça düşük olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, basit kesme durumlarında bile meydana gelen kırılma, asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda oluşan çatlaklarla meydana gelir. Düşey yükleme altındaki bir betonarme kirişte meydana gelen kesme ve normal gerilmeler, asal çekme gerilmelerinin oluşumuna yol açmaktadır. Bu asal çekme gerilmeleri, betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle kritik seviyelere ulaşarak, eğik çekme kırılmasına sebep olmaktadır. Betonarme elemanlarda oluşan eğik çekme kırılması ani ve gevrek; bu tür kırılma literatürde "kesme göçmesi" olarak adlandırılır. Aslında kesme göçmesi ve kesme sorunu olarak bilinen bu durum, asal çekme kırılması ve asal çekme sorunudur. Sonuç olarak, kırılma, betonun kesme veya basınç dayanımının aşılması sonucunda değil, çekme dayanımının aşılması sonucunda meydana gelmektedir. Betonarme elemanlarda betonun çekme dayanımının yetersiz kalmasından dolayı asal çekme gerilmelerini karşılamak için enine donatılar (etriye) kullanılmaktadır (Ersoy ve ark., 2019).

Etriyelerin temel amacı, taşıyıcı sistem elemanlarına etki eden eğik çekme gerilmelerini karşılamak ve betonarme elemanların kesme kapasitesinden önce eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Yetersiz kesme donatısına sahip kirişlerde, kiriş eğilme kapasitesine ulaşmadan kesmeden göçeceği için bu tür göçme ani ve gevrek bir şekilde meydana gelir. Yeterli etriyeye sahip kirişlerde ise kirişin kesme kapasitesi arttığından davranışa eğilme davranışı hâkim olur. Bu durumda meydana gelen göçme,

eğilme donatısının akmasıyla gerçekleşir ve göçme şekli sünek ve yavaş olur (Ünal, 2016).

Uluslararası yönetmeliklerde olduğu gibi TBDY 2018’de de etriyeler hakkında çeşitli kurallar getirilmiştir. Bu kurallardan bir tanesi ise etriyelerin kancalarının beton içerisinde daha iyi tutunmasını sağlamak amacıyla 135 derece açıyla kıvrılmasını öngörmektedir. Bu kanca açıları, etriyenin beton içerisinde etkili bir şekilde ankrajlanmasını sağlayarak elemanların deprem kuvvetlerine karşı performansını artırmaktadır. Betonarme binalarda yüksek moment, kesme kuvveti veya eksenel yükler altında, yapısal elemanların öncelikle kabuk betonu zarar görür. Kabuk betonu, etriyelerin dışında yer aldığı ve onu sabitleyen bir donatı bulunmadığı için, artan yük etkileriyle dökülmeye başlar. Etriye kancalarının 135° açıyla büküldüğü ve çekirdek betonun içine gömüldüğü durumda, etriyeler çekirdek betonunu sargılamayı sürdürür. Böylece, kabuk betonunu kaybeden yapısal eleman, 135° kancalara sahip etriyeyle sargılanmış çekirdek betonu sayesinde gelen yükleri taşımaya devam eder (Mertol, 2023). Belirtildiği gibi etriyelerin doğru şekilde uygulanmasının, yapının deprem ve diğer yatay yükler altında gösterdiği performans üzerinde kritik bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle TBDY 2018 yönetmeliğinin getirdiği kurallarla birlikte, etriyelerin 135 derece açıyla bükülerek çekirdek betona gömülmesi, yapısal elemanların hasar anında bile yük taşıma kapasitesini sürdürebilmesini sağlamaktadır. Bu da yapıların sünek davranışını artırarak ani ve gevrek göçme riskini azaltır. Sonuç olarak, etriyelerin uygun şekilde tasarımı ve uygulanması, betonarme yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artıran bir faktördür.

1.1. Tezin Amacı

Günümüzde kullanılan tüm yapı yönetmeliklerinde (ACI 318-19, TBDY 2018, TS500 ve Eurocode 8) kesme gerilmesi ne kadar küçük olursa olsun olası kesme hasarını önlemek için minimum düzeyde enine donatı kullanılması zorunlu tutulmuştur. Yeterli donatı miktarının yerleştirilmesine ek olarak, tüm yükleme koşulları altında güvenli bir performans sağlamak için donatının doğru şekilde detaylandırılması da son derece önemlidir.

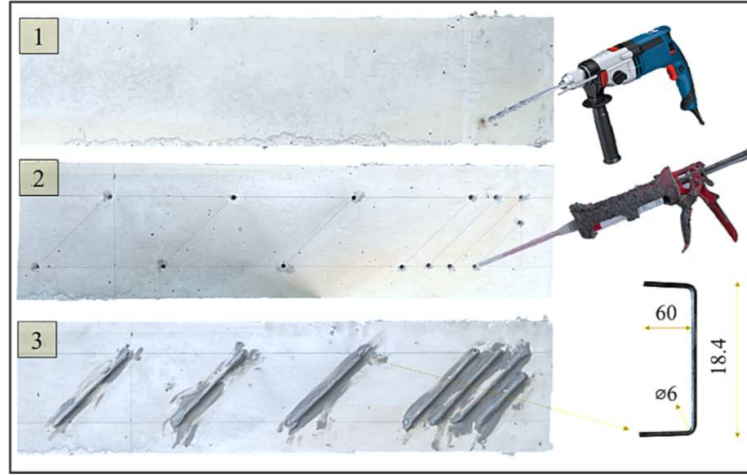
TBDY 2018 yönetmeliği, taşıyıcı sistem elemanlarında bulunan etriyelerin deprem gibi ani yüklemeler sırasında açılmasını önlemek için 135° açıyla bükülmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak, bu etriyelerin uygulanması sırasında bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Özellikle, 135° kıvrımlı kancaların köşe noktalarında oluşturulması,

boyuna donatının düzgün bir şekilde yerleştirilip sabitlenmesini zorlaştırırken, aynı zamanda bu tür kıvrımların bükülmesi işçilik ve malzeme açısından çeşitli zorluklara neden olabilir (Erdem, 2022).

Bu çalışmada, yeni bir güçlendirme tekniği olarak literatürde yer alan Şekil 1.1'deki Mekanik Çelik Dikiş ($MÇD$) veya Çatlak Kilit Sistemi ($ÇKS$) olarak bilinen patentli (Aksoylu ve ark., 2022) güçlendirme tekniğinden ilham alınarak yeni yapılacak betonarme kirişlerde etriyelerin I ve U şeklinde olması durumunda kiriş davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Aksoylu'nun (2021)'de yaptığı deneysel çalışmalarda, kesme kapasitesi zayıf olan kiriş elemanların dıştan $MÇD$ ile güçlendirilmesi sonucu kirişte sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Ayrıca, Aksoylu ve ark. (2023) çalışmasında, Şekil 1.2'deki gibi $MÇD$ 'lerin kiriş eksenine (yatayla) 45° lik açıyla uygulanmasının, kesme kırılmalarının önlenmesinde etkili olduğu ve kirişlerin kesme kapasitesini artırmada önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir.



Şekil 1.1. 90° açılı MSS uygulaması (Aksoylu ve ark. 2022)



Şekil 1.2. Güçlendirilmiş test numunelerinin test öncesi görünümü (Aksoylu ve ark., 2023)

Kiriş elemanına dış yüzeyinden ankraj edilerek yapılan MÇD uygulamasının, kiriş üretim aşamasında yapılması durumunda benzer etkiyi gösterip göstermeyeceğinin araştırılması oldukça önemlidir. Bu amaçla mevcut yönetmeliklerde belirtilen 135 derecelik kancalara sahip etriyelerin yerine alternatif olabilecek *I* ve *U* şeklindeki donatılar tasarlanarak bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Buradaki amaç, düşey yükler altında, tasarlanan bu donatılar (*I* ve *U* şeklinde) ile geleneksel deprem etriyeleri arasında benzer performans gösterip göstermediğini anlamak ve 135° açılı etriye kancalarının kullanılması durumunda elde edilen kiriş davranışa ne kadar yaklaştığını araştırmaktır. Literatürde MÇD uygulaması için optimum açının 45° olduğu bilinmesine rağmen, bu tez çalışmasında kiriş üretim aşamasında kirişe yerleştirilen *I* ve *U* şeklindeki enine donatıların 90° yerleşim durumları için araştırma yapılmıştır.

1.2. Tezin Önemi

Literatürde, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak amacıyla çeşitli alternatif donatı teknikleri önerilmiştir (Al-Alawi ve ark., 2022; Beyaz, 2021; Chen ve ark., 2022; Erdem, 2022; Gülşah ve ark., 2022; Abd ve ark., 2022; Üstün, 2020; Zaki ve ark., 2020). Bu teknikler içerisinde farklı malzemelerden yapılmış etriyeler, farklı eğim açılarına sahip etriyeler, çelik tel, makro-sentetik lifler, flamingo tekniği ve alternatif etriye kanca tasarımları gibi çeşitli yaklaşımları içermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kirişlerde farklı malzeme ve enine donatı şekillerinin de geleneksel etriye gibi kesme kapasitesine olumlu yönde etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

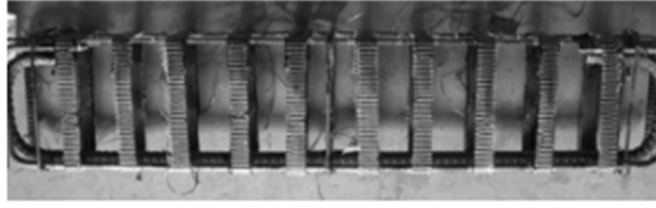
Bu çalışmada ise I ve U şeklindeki donatıların kesme dayanımına katkısı ve uygulamada kullanılabilirliği incelenmiştir. Literatürde, etriyelere yönelik çeşitli alternatif donatı teknikleri önerilmiş olsa da I ve U şeklindeki donatıların kesme dayanımına katkısı ve uygulama kolaylığı açısından etkinliğini inceleyen bir çalışma tespit edilememiştir. Literatür açısından önemli olduğu düşünülen ve daha önce denenmemiş bu kesme donatısı alternatiflerini araştırmak, çalışmanın özgünlüğü açısından önemli olduğu düşünülmüştür. Ayrıca, bu tez çalışması, yeni bir güçlendirme tekniği olan $M\dot{C}D$ uygulamasının güçlendirme amacı dışında kiriş üretim aşamasında da kullanımını incelemek ve düşey yüklere maruz bırakılan kirişte meydana gelebilecek davranış farklılıklarını gözlemlemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada incelenen I ve U şeklindeki donatıların, geleneksel tam sargı etriyelere kıyasla daha kolay uygulanabilir olduğu düşünülmekte ve bu yöntem sayesinde uygulama süresi ve maliyetin azaltılması hedeflenmektedir. Diğer taraftan, bu yeni tip kesme donatılarının üst ve alt limit değerlerinin belirlenmesi geleneksel etriye davranışının anlaşılması açısından da önemli olduğu düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Betonarme kirişlerin kesme dayanımı üzerine gerçekleştirilen araştırmalar hem nümerik hem de deneysel çalışmalarla bu alandaki bilgi birikimini sürekli olarak genişletmektedir. Özellikle son dönemlerde, kesme dayanımını artırmak amacıyla alternatif kesme donatı tipleri ve yenilikçi yöntemler üzerine yapılan araştırmalar dikkat çekmektedir. Bu bölümde farklı türde kesme donatısı arayışları üzerine yapılan bazı çalışmalar sunulmuştur.

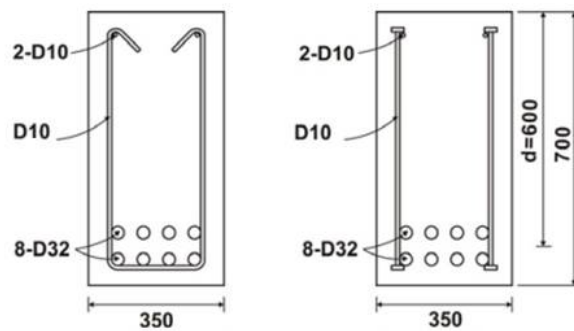
Park ve Sim (2006), çalışmasında beton kirişlerde kesme donatısı için Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) çubukların kullanılması için yeni bir teknik önermekte ve uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Geliştirilen GFRP etriyeler, betonarme elemanlarda kullanılan geleneksel çelik donatılı etriyeler yerine kullanılmıştır. Buradaki deneysel program, GFRP etriye etkinliğini, üç farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) dikkate alınarak düşey yükleme altında farklı kesme takviye oranlarına göre değerlendirmektedir. Aynı kesme donatısı oranında, kirişlerin nihai yükleri, kesme donatısı malzemesi fark etmeksizin yakın değerler olduğu elde edilmiştir. Bununla birlikte, betonda büyük bir çatlak oluştuğunda, GFRP etriyelerin kullanıldığı kirişlerde kırılma modu daha gevrek olmuştur. Beton yüzeyinde ölçülen gerilmelerden, etriyelerin karşıladığı kayma gerilmeleri hesaplanmış ve GFRP etriyelerin karşıladığı kayma gerilmeleri miktarı, kesme açıklığı-derinlik oranına bağlı olarak %91 ila %106 aralığında artışa neden olduğu görülmüştür.

Lee ve ark. (2009), çalışmasında betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan fiber levha şeritlerinin (FSS) yerine uygulanabilirliği için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda toplam sekiz adet beton kiriş, üç noktalı yükleme altında test edilmiştir. Her bir kiriş, 1200 mm uzunluğunda, 150 mm genişliğinde ve 250 mm derinliğine sahip olup a_v/d oranı 2.1 olarak dikkate alınmıştır. Kirişlerde farklı kesme elemanları olarak etriyesiz, çelik etriyeli ve Şekil 2.1'deki gibi FSS tipi etriyeler kullanılmıştır. Deney sonuçları, FSS etriyelerin kullanıldığı beton kirişlerin, etriyesiz kirişlere göre %60-70 oranında kesme dayanımını artırdığını göstermiştir. Ayrıca, FSS'ler beton kirişlerin genel yük-deplasman eğrilerinde, kesme dayanımlarında, çatlak ilerleyişlerinde ve maksimum yüke kadar meydana gelen çatlak genişliklerinde çelik etriyelerle takviye edilmiş beton kirişlerine benzer şekilde kesme davranışını sağlayabilmiştir.



Şekil 2.1. FSS etriyeler (Lee ark., 2009)

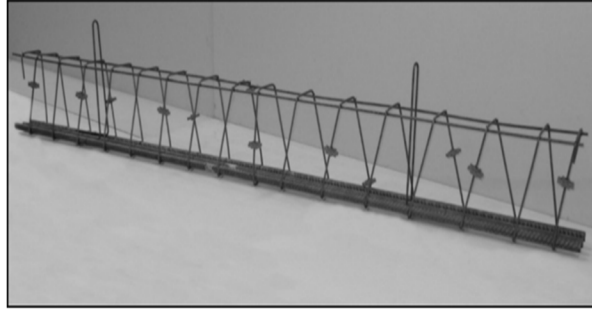
Yang ve ark. (2010), çalışmasında T şeklindeki uçlara sahip çubukların beton elemanlarda kullanımının çeşitli pratik avantajlarını incelemiştir. Bu avantajlar arasında daha kolay uygulanması, donatıların daha az sıkışması, daha etkili ankraj, deprem performansına katkısı ve kesme dayanımına etkisi yer almaktadır. Çalışma kapsamında, T uçlu çubuklar içeren üç farklı yüksek dayanımlı beton eleman üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2’de donatı detayları gösterilen bu kirişler ilk testte, yüksek dayanımlı betonla inşa edilen tam ölçekli kiriş numuneleri kullanılarak T uçlu çubukların kesme donatısı olarak etkileri incelenmiştir. İkinci test programında ise T uçlu çubukların, uç bölgeleri kancalı olarak uygulanan kirişler arasında davranışa olan etkileri araştırılmıştır. Üçüncü testte, T uçlu donatı çubuklarının ana çekme donatısı olarak kullanıldığı yüksek dayanımlı beton konsollar inşa edilmiş ve test edilmiştir. T uçlu çubukların kullanıldığı tüm test numunelerinde, yük taşıma kapasitesi, %25-35 süneklik ve %30-40 çatlak kontrolü açısından, geleneksel etriyelere göre daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Donatı detayları (Yang ve ark., 2010)

De Corte ve Boel (2013), çalışmasında Şekil 2.3’teki gibi spiral şeklinde etriyelerin davranışını araştırmıştır. Bu amaçla 24 adet numune üretilmiş ve bu numuneler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında çatlakların ilerleyişi izlenmiş ve kirişlerin kırılma mekanizmaları analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçlar,

kullanılan eğim aralığında, spiral şekilli kesme donatısının uluslararası kodlarda kullanılabilecek geçerli bir alternatif olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bazı uluslararası yönetmeliklerde dikkate alınmamasına rağmen a_v/d oranı etkisinin önemli olduğunu ve kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona kıyasla %20-30 oranında çatlak ilerleyişinde daha avantajlı bir durum sağladığı yönündeki bulgular doğrulanmıştır.



Şekil 2.3. Spiral etriyeli numune (De Corte ve Boel, 2013)

Öztürk (2016), çalışmasında farklı oranlarda polipropilen lif içeren betonların, etriye bulunmayan betonarme kirişlerde kesme gerilmelerine karşı gösterdiği performans incelenmiştir. Deneysel çalışmada temel parametreler olarak; 2.5, 3.5 ve 4.5 olmak üzere üç farklı a_v/d oranı ile %1.0, %2.0 ve %3.0 hacimsel polipropilen lif oranları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, lif oranının artmasıyla birlikte kirişlerin kesme dayanımı %10-15 oranında ve süneklik özelliklerinde ise %20-30 oranında iyileşme sağlandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, lifli betonarme kirişlerin kesme dayanımını öngörebilmek amacıyla bir bağıntı geliştirilmiş ve bu bağıntının verdiği tahminler ile elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, önerilen bağıntının deneysel verileri başarılı bir şekilde yansıttığını göstermiştir.

Shatarat ve ark. (2016), tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerde Şekil 2.4'teki gibi spiral kesme donatısının kullanımı araştırılmıştır. Bu çalışmada, kesme açıklığı derinlik oranı (2.5-3.0), etriye aralığı (125, 150 ve 200 mm) ve etriye açısı (62, 70, 75, 80 ve 85) gibi değişkenler dikkate alınmıştır. 28 adet betonarme kiriş, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kirişlerin kesme davranışı, statik testler sırasında yük-sehim eğrileri ve dikey sehim ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen kesme kapasitesi, kirişlerin için ACI 318-14 kodunun tasarım kesme formülleriyle elde edilen analitik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, spiral kesme donatısı kullanımının geleneksel etriyeli kirişlere göre kesme kapasitesini ve sünekliği artırdığını açıkça göstermektedir. Ayrıca, sonuçlar spiral etriyeler için optimum

eğim açısının 80° olduğunu göstermiştir. Spiral kesme donatısının kirişlerde kesme kapasitesini ve sünekliği artırdığı ve buna ek olarak işçilik maliyetlerini de azalttığı önerilmektedir.



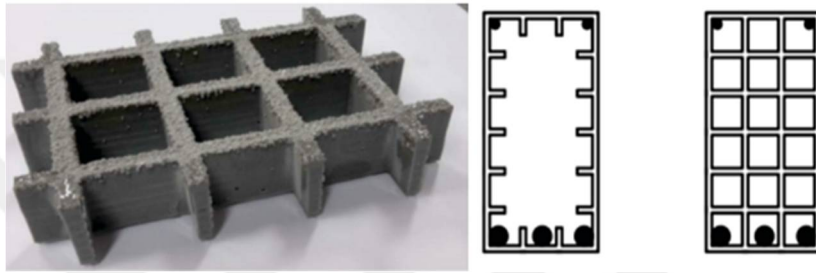
Şekil 2.4. Spiral etriye numunesi (Shatarat ve ark., 2016)

Mohamed (2017), çalışmasında normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde eğik etriye sisteminin kirişlerin yapısal davranışı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, eğik etriye sistemi kesme donatısı olarak yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi eğik etriyeler küçük eğimli çubuklar şeklinde olup, uçları yatay bükülerek hem üst hem de alt eğilme donatısına kaynak yardımıyla bağlantısı sağlanır. Bu sistem, eğimli çubukların yerleşimi sayesinde, geleneksel etriye donatılarının oluşturduğu çubuk-çatlak önleyici mekanizmanın yerini alarak, daha etkin bir düzlem-çatlak önleyici sistem oluşturmaktadır. Bu çalışmada farklı eğik etriye şekli incelenmiş olup ana hedef kesme kuvvetlerine karşı en düşük maliyetle en yüksek dayanımı sağlayabilecek formu belirlemektir. Çalışma kapsamında, çeşitli normal ve yüksek dayanımlı betonarme kiriş numuneleri özenle hazırlanmış ve laboratuvar ortamında düşey yükler altında test edilmiştir. Her bir kirişin belirli bir yük altında gösterdiği sapma ölçülmüş, kesme çatlaklarının yayılımı detaylı bir şekilde izlenmiştir. Sonuçlar, eğik etriye sistemi kullanılan kirişlerin kesme dayanımının %20-30 oranında iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Bu sistem, geleneksel kesme donatılarına kıyasla daha ekonomik ve verimli bir çözüm sunmuş, aynı zamanda çatlak oluşumunu daha etkili bir şekilde kontrol edebilmiştir.



Şekil 2.5. Kesme donatısı detayları (Mohamed, 2017)

Lycka ve Stepanek (2018), betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada GFRP ızgaralar kesme donatısı olarak kullanılmıştır. Şekil 2.6'daki gibi deney numuneleri, farklı kesme donatı oranlarına sahip 9 kirişten oluşmaktadır. Sunulan deneysel veriler, daha sonra literatürde bulunan GFRP etriyeli betonarme kirişlerin kesme mukavemetine ilişkin test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. GFRP ızgaranın kesme takviyesi olarak kullanılması, test edilen kirişlerin kesme mukavemetini önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir. En düşük kesme takviyesi oranına sahip kirişler üzerinde yapılan testler de bile, kesme takviyesi olmayan bir kirişe kıyasla kesme mukavemetinde %100'ün üzerinde bir artış kaydedilmiştir.



Şekil 2.6. Izgara örneği ve kayma donatı tipleri (Lycka ve Stepanek, 2018)

Al-Daraji (2018), çalışmasında geleneksel kesme donatısı yerine uçları kancalı çelik lifler kullanarak betonarme kirişlerin davranışını incelemiştir. Deney kapsamında, 6'sı değişken kesitli ve 3'ü prizmatik olmak üzere toplam 9 adet çelik lif katkılı betonarme kiriş dört noktalı yükleme yöntemiyle test edilmiştir. Araştırmada, kirişin eğim açısı, geometrik türü ve çelik lif miktarı gibi parametreler değişken olarak ele alınmıştır. Bu parametrelerin, özellikle değişken kesitli kirişlerin kesme taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Deney sonuçları, kiriş eğim açısının kesme dayanımını olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kendiliğinden yerleşen beton ile çelik lifin birlikte kullanılması, kirişlerin hem kesme dayanımını hem de çatlama sonrası sünek davranışını artırmış; çelik lifler çatlak genişliğini azaltarak gevrek kırılma eğilimini sünek davranışa dönüştürmüştür. Elde edilen bulgular, %1 oranında çelik lif kullanımının, değişken kesitli kirişlerde minimum kesme donatısının yerini alabilecek düzeyde etkili olduğunu da göstermiştir.

Demir (2019), çalışmasında Şekil 2.7'de gösterilen çelik tel örgülerin kesme donatısı olarak kullanılması durumunda betonarme kirişlerin yapısal performansındaki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, farklı donatı düzenlemelerine sahip 150×300×2000 mm boyutlarında üç adet betonarme kiriş üretilmiş ve dört noktalı eğilme

deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, çelik tel örgülerin çatlak oluşumunu %20-30 oranında iyileştirdiğini; geniş çatlakların oluşumunu engelleyip daha ince ve yaygın çatlakların gelişmesine katkı sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, yalnızca çelik tel örgü kullanılarak sağlanan kesme donatısının, çatlamadan sonra kirişlerde %10-15 oranında erken dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, etriyelerin yanında ilave olarak çelik tel örgü kullanılması durumunda kirişlerin taşıma kapasitesinde, başlangıç rijitliğinde ve yer değiştirme sünekliğinde belirgin artışlar gözlenmiştir.



Şekil 2.7. Deney elemanları (Demir, 2019)

Kadı (2019), çalışmasında betonarme kirişlerde GFRP (Cam Elyaf Takviyeli Polimer) kompozitlerin etriye olarak kullanımının yapısal etkileri araştırmıştır. Deneylerde 150×250×1900 mm boyutlarında kiriş numuneleri kullanılmış ve C25/30 beton sınıfı tercih edilmiştir. Kirişlerde, Şekil 2.8’de ki gibi yüzey özellikleri farklılık gösteren nervürlü ve nervürlü-kumlu GFRP etriyeler uygulanmıştır. Araştırmada etriye aralığı ve yüzey yapısı değişken parametreler olarak değerlendirilmiş; kesme kapasitesi düşük, eğilme dayanımı yüksek olacak şekilde tasarlanan her deney grubuna üçer adet numune dahil edilmiştir. Kirişler sabit hızda yüklenerek dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda GFRP etriyelerin kesme dayanımını artırmada etkili olduğu gözlenmiştir. Özellikle nervürlü-kumlu yüzeye sahip GFRP etriyelerin, kumlanmamış olanlara kıyasla betonla daha güçlü bir aderans oluşturduğu ve yaklaşık %10 oranında ilave kesme dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan karşılaştırmalı analitik değerlendirmeler sonucunda, CAN/CSA S806-12 yönetmeliğinde yer alan hesap denklemlerinin deneysel sonuçlara en yakın tahminleri verdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 2.8. (a) Nervürlü dikdörtgen etriyeler (b) Nervürlü-Kumlu dikdörtgen etriyeler (Kadı, 2019)

Şavluk (2019), çalışmasında betonarme kirişlerde enine donatı olarak geogrid malzemenin kullanımı ve bu malzemenin farklı açılarla helezonik şekilde yerleştirilmesinin yapısal davranışa etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deney kapsamında, biri enine donatısız, dördü sırasıyla 30° , 45° , 60° ve 90° açılarla geogrid donatı içeren, biri ise geleneksel çelik etriye kullanılan toplam altı adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Şekil 2.9’da gösterilen geogrid düzenlemelerine sahip kiriş numuneleri, dört noktalı eğilme deneyiyle test edilmiştir. Elde edilen veriler, geogrid malzemesinin çeliğe kıyasla daha düşük elastisite modülüne sahip olmasına rağmen, yeterli deformasyon kapasitesi sunduğunu ortaya koymuştur. Mikro çatlakların oluşumuyla birlikte yük taşımaya başlayan enine donatılar arasında çelik donatının daha yüksek performans gösterdiği ve kirişin taşıma kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, çalışmada sargı donatısının sürekliliğinin betonarme elemanların genel davranışı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, iyi yerleştirilmiş ve açıları optimize edilmiş geogrid donatılar, çelik etriyeye yaklaşık %85’e kadar yaklaşabilen kesme kapasitesi sağlayabilmekte ve daha sünek bir davranış eğilimi ile çelik etriyeye alternatif bir çözüm sunabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.9. Geogrid deney numunesi (Şavluk, 2019)

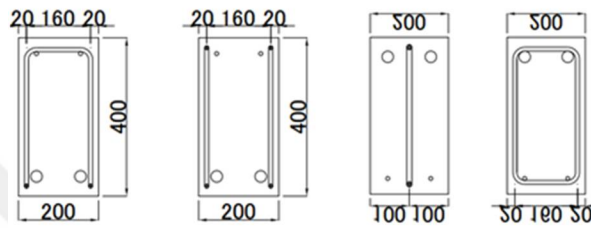
Üstün (2020), çalışmasında, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmaya yönelik yeni donatı düzenlemeleri geliştirmeyi hedeflemiş ve bu doğrultuda altı farklı enine donatı konfigürasyonu tasarlanmıştır. Özellikle kesme açıklığında, etriye yerleşiminde yapılan düzenlemelerle kesme dayanımına olan etkiler araştırılmıştır.

Etriyeler, kirişin yatay eksenine 30°, 45°, 60°, 90° ve 135° olacak şekilde farklı açılarda yerleştirilmiş ve bu açısal değişikliklerin yapısal davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek amacıyla, herhangi bir enine donatı içermeyen etriyesiz bir kiriş modeli de tasarlanmıştır. Deneysel çalışmayı desteklemek üzere, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analiz bulgularına göre, etriyelerin 30°, 60° ve 90° açılarla yerleştirildiği modellerde oluşan deplasmanlar, 45° açılı model ile karşılaştırıldığında sırasıyla %50.76, %35.25 ve %62.65 oranlarında daha fazla olmuştur. Bu karşılaştırmalar her açı için iki kiriş numunesi kullanılarak yapılmış, 45°, 60° ve 90° açılı kirişlerde elde edilen maksimum deplasmanların ortalama değerleri esas alınmıştır. Sonuç olarak, kesme bölgesinde eğik etriyelerin kullanımı, özellikle kesme kaynaklı çatlakların oluşumunu sınırlandırarak kirişin genel çatlak davranışını olumlu yönde etkilemiştir.

Beyaz (2021), çalışmasında geleneksel etriye donatısı yerine çelik tel kullanılmasının betonarme kirişlerde yapısal açıdan uygun bir alternatif olup olamayacağı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, 200×320 mm kesitinde ve 1800 mm uzunluğunda üç adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numunesinde Ø8 mm çapında klasik etriye donatısı tercih edilirken, diğer iki numunede enine donatı olarak sırasıyla Ø4 mm ve Ø6 mm çapında çelik donatı kullanılmıştır. Donatı çapı azaldıkça, aynı donatı oranını korumak adına donatı yerleşim sıklığı artırılmış, yani birim uzunlukta daha fazla enine donatı yerleştirilmiştir. Üretilen tüm kirişler dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, etriye oranı sabit tutulduğu sürece, etriye çapının küçültülerek sayısının artırılmasının kirişlerin %20-25 oranında sünek davranışını artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, sargı etkisinin artırılmasının, yüksek akma dayanımına sahip donatı kullanımından daha etkin olduğu belirlenmiştir. Deney bulgularına göre, çatlakların daha fazla sayıda etriye ile karşılanması durumunda, numunelerin kesme kırılmasına karşı daha dirençli hale geldiği gözlemlenmiştir.

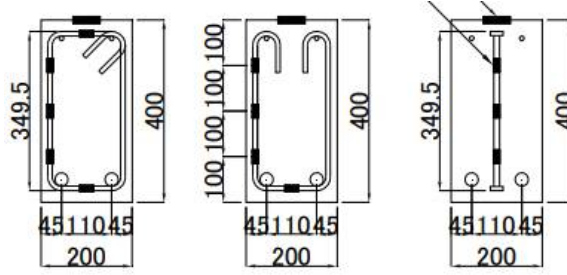
Kawamura ve ark. (2021), çalışmasında Şekil 2.10'daki gibi farklı kesme donatı şekillerinin betonarme kirişlerin kesme kırılması davranışı ve kesme direnç mekanizması üzerindeki etkileri analitik olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, çeşitli kesme donatısı tiplerinin (kapalı etriyeler, U-şekilli etriyeler ve T uçlu çubuklar gibi) betonarme kirişlerin kesme performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Analitik modelleme ve simülasyon teknikleri kullanılarak, farklı donatı şekillerinin kirişlerin kesme dayanımı ve çatlak yayılımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonuçları, kapalı etriyelerle güçlendirilmiş kirişlerin, diğer donatı tiplerine göre daha yüksek kesme dayanımı ve daha iyi çatlak kontrolü sağladığını ortaya koymuştur. U-şekilli etriyeler ve T uçlu çubuklar ise farklı performans özellikleri sergilemiş, özellikle U-şekilli etriyelerin kullanıldığı kirişlerde çatlak yayılımının %25 oranında daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, farklı kesme donatısı şekillerinin betonarme kirişlerin kesme davranışları ve direnç mekanizmaları üzerindeki etkileri belirlenmiş ve donatı seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli parametreler vurgulanmıştır.



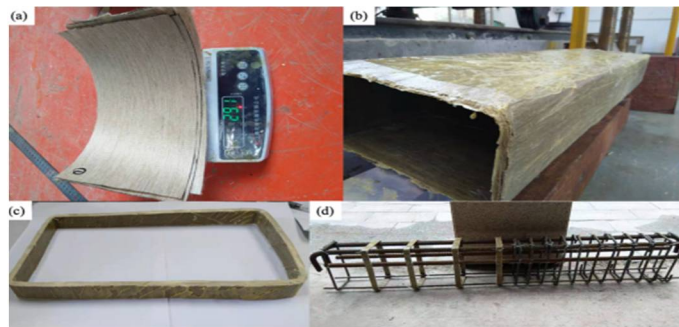
Şekil 2.10. Kesme donatısı detayları (Kawamura ve ark., 2021)

Kawamura ve ark. (2021), çalışmasında betonarme kirişlerde kullanılan Şekil 2.11'deki gibi farklı kesme donatısı şekillerinin kapalı etriyeler, U-şekilli etriyeler ve mekanik ankrajlı çubuklar kirişlerin kesme göçmesi davranışı ve iç çatlak ilerleyişi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan düşey yükleme testleri sonucunda, her bir donatı tipine ait kirişlerin yan yüzeylerinden üç boyutlu yer değiştirme dağılımları ve çatlak desenleri elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, kullanılan donatı şeklinin kesme davranışında belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermiştir. Kapalı etriyelerle güçlendirilmiş kirişlerin, diğer sistemlere kıyasla yaklaşık %30 oranında daha yüksek kesme dayanımı sağladığı ve iç çatlak yayılımını %40 oranında daha sınırlı bir alanda tuttuğu belirlenmiştir. Buna karşılık, U-şekilli etriyelerle donatılmış kirişlerde çatlak yayılımının daha düzensiz olduğu ve kesme dayanımının kapalı etriyelere kıyasla yaklaşık %20 daha düşük kaldığı görülmüştür. Mekanik ankrajlı çubuklar ise çatlak yönlendirme açısından U-şekilli etriyelere göre %15 daha iyi bir performans sunarken, kesme dayanımı bakımından kapalı etriyelerin gerisinde kalmış ve ortalama %10–15 daha düşük sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar, betonarme kirişlerin kesme göçmesi davranışında sadece donatı miktarının değil, donatı şeklinin ve bağlantı biçiminin de oldukça kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.11. Kesme donatısı detayları (Kawamura ve ark., 2021)

Chen ve ark. (2022), tarafından yapılan çalışmada, etriyelere alternatif olarak düşündükleri FFRP (keten lifi ile güçlendirilmiş polimer) enine donatılar geliştirilmiştir. FFRP kesme donatılarının yapısal ve çevresel performansına yönelik çok disiplinli bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Şekil 2.12’de donatı detayları gösterilen 7 numune üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. FFRP etriyeleri, kesme kapasitesini %77 oranında ve nihai düşey yer değiştirmeyi %74 oranında önemli ölçüde artırarak gevrek kırılmayı sünek kırılmaya döndürmüştür. Ayrıca, kapalı şekilli etriyeler gerilim yoğunlaşmasını önlemiş ve FFRP çekme kapasitesinin kullanımını %80’in üzerine çıkarmıştır. FFRP etriye aralığının azaltılması, kesme kapasitesini ve sünekliği etkili bir şekilde artırmıştır. FFRP etriyelerinin genişliği veya kat sayısı artırıldığında ise sadece sünekliği iyileştirdiği görülmüştür. Çelik, FFRP ve karbon etriyelerinin çevresel performansının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmeleri sonucunda FRP’nin küresel ısınma ve fosil tükenmesi potansiyelini %60 oranında azalttığı gözlenmiştir.



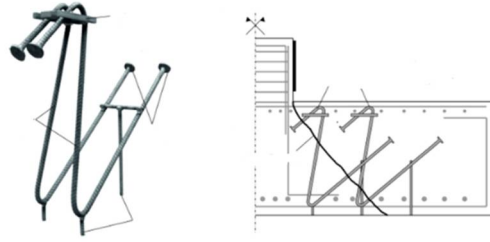
Şekil 2.12. Donatı detayları(Chen ve ark., 2022)

Erdem (2022), çalışmasında yönetmelikte belirtilen 135 derece etriye kancaları yerine alternatif bir etriye kanca tasarımı önerilmiştir. Önerilen etriye kanca tasarımı ile yönetmelikte belirtilen etriye kancalarına benzer davranışın elde edilmesi ve 135 derece

etriye kancalarının meydana getirdiği dezavantajların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 2 adet referans numune ve 16 adet parametre değişimi için kullanılan deney elemanı olmak üzere toplam 18 adet betonarme kiriş üretilmiştir. 1/2 ölçekli olarak üretilen betonarme kirişlerin tersinir tekrarlı yükleme altında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Betonarme kiriş elemanları, beton çekme dayanımının kesme kuvvetine katkısı durumuna göre iki gruba ayrılmıştır. $V_c = 0,8.V_{cr}$ olması durumuna göre tasarlanan 9 adet betonarme kiriş 1. grup, $V_c = 0$ olması durumuna göre tasarlanan diğer elemanlar 2. grup olarak oluşturulmuştur. Deney elemanlarında a_v/d oranı ve donatı oranı sabit alınmış ayrıca boyuna donatılarının yerleşiminin düzgün olmasının sağlanması için tüm kancalar kirişin alt yüzüne yerleştirilmiştir. İki farklı etriye tipi, etriye kancalarının düzlem doğrultusu, kanca boyu ve beton çekme dayanımının kesme kuvvetine katkısı değişken parametre olarak dikkate alınmıştır. Deneyler tersinir tekrarlanır yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilmiş ve önerilen alternatif etriye kancası ile elde edilen dayanım değerlerinin referans elemanlarla benzerlik gösterdiği ve deney elemanların tümünde hedeflenen dayanımlara ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca önerilen alternatif etriye kancasının deney elemanlarının süneklik değerlerinde referans elemanlara kıyasla genel bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Alternatif etriye kancası kullanılarak tasarlanan deney elemanlarının yönetmelik kriterlerine bağlı olarak tasarlanan referans elemanların davranışını da yakaladığı gözlemlenmiştir.

Abd ve ark. (2022), betonarme kirişlerde Şekil 2.13'teki gibi "Flamingo Tekniği" olarak adlandırılan yenilikçi bir donatı düzeninin kesme davranışına etkilerini araştırmışlardır. Flamingo kuşunun bacak yapısını andıran bu özel çelik donatı formu, özellikle serbest uç uzunlukları ve eğim açıları değiştirilerek farklı kombinasyonlarda uygulanmıştır. Yapılan dört noktalı eğilme deneyleri sonucunda, geleneksel etriyelerle donatılmış kontrol kirişine kıyasla flamingo tekniği uygulanan kirişlerin kesme kapasitesinde yaklaşık %25–30 oranında artış sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, flamingo tekniğiyle güçlendirilen kirişlerin nihai deplasman kapasitelerinde %20'ye varan iyileşmeler gözlemlenmiş, bu da kesme sünekliğinde anlamlı bir artışa işaret etmiştir. Çatlak genişliği açısından ise, flamingo şeklindeki donatılar, klasik etriyelere kıyasla çatlakların ilerleyişini daha etkin kontrol altına almış ve yaklaşık %30 daha düşük çatlak genişlikleri elde edilmiştir. Donatı uçlarının eğimi ve serbest uzunlukları arttıkça, bu olumlu etkilerin daha belirgin hale geldiği, dolayısıyla bu parametrelerin yük taşıma performansı ve çatlak yayılımı üzerinde kritik düzeyde etkili olduğu ifade edilmiştir. Tüm

bu bulgular, flamingo tekniğinin geleneksel sistemlere alternatif olarak yüksek performanslı bir donatı çözümü sunduğunu göstermektedir.



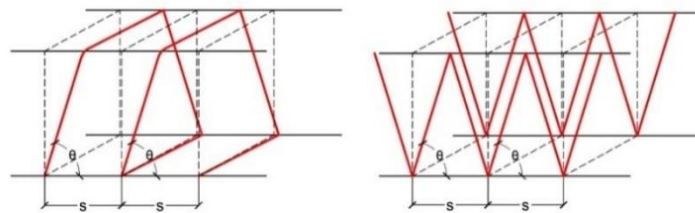
Şekil 2.13. Kesme donatısı detayları (Abd ve ark., 2022)

Abdullah ve ark. (2023), çalışmasında farklı kesme donatı konfigürasyonlarının betonarme kirişlerin 3D çatlak yayılma davranışı ve kesme göçmesi mekanizmasına etkilerini deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında üç farklı tip kesme donatısı kullanılmıştır: kapalı etriyeler, U-şekilli etriyeler ve mekanik ankrajlı çubuklar. Deneyler sırasında betonarme kirişler üzerine uygulanan yükler sonucunda yan yüzeylerdeki üç boyutlu yer değiştirme dağılımı ve iç çatlak desenleri kaydedilmiştir. Özellikle kapalı etriye sistemleri ile donatılmış kirişlerde, yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış gözlemlenirken, U-şekilli etriye kullanan kirişlerin çatlak yayılma deseni daha düzensiz bir yapı göstermiştir. Deney sonuçlarına göre, kapalı etriyelerle donatılmış betonarme kirişlerde kesme mukavemeti %15.8 oranında artış gösterirken, mekanik ankrajlı çubuklar kullanan kirişlerde ise bu oran %10.5 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, mekanik ankrajlı çubuklar kullanılan sistemlerde çatlak yayılımının daha kontrollü olduğu, ancak U-şekilli donatılarda çatlakların daha geniş bir alana yayıldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kesme donatısı şeklinin betonarme kirişlerdeki deformasyon ve çatlak yayılımı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ve bu şekillerin doğru seçimiyle kirişlerin kesme dayanımının optimize edilebileceği vurgulanmıştır.

Less ve ark. (2023), çalışmasında fiber takviyeli polimer (FRP) ile sarılmış çelik donatıların hem yapısal performansını hem de korozyon dayanımını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, karbon (CFRP) ve cam (GFRP) fiberlerle sarılmış hibrit çelik donatılar, geleneksel epoksi kaplı donatılarla karşılaştırılmıştır. Donatıların korozyon davranışı, hızlandırılmış alkali-klorür çözeltisinde yapılan testlerle incelenmiş; ayrıca çekme testleri ve bu donatılarla üretilmiş betonarme kirişler üzerinde eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, GFRP ile sarılmış

donatılar, yüzeyinde kusur bulunsa dahi yüksek korozyon direnci göstermiştir. CFRP sarımı da genel olarak etkili olmuş, ancak yer yer sınırlı korozyon gözlenmiştir. Yapısal performans açısından bakıldığında, FRP sargıları çeliğin akma dayanımını aştıktan sonra ek taşıma kapasitesi sağlamış ve yaklaşık %15–25 oranında bir dayanım artışı sağlamıştır. Betonarme kiriş deneylerinde ise hibrit donatılar, epoksi kaplı donatılarla benzer taşıma kapasitesi ve süneklik sergilemiş; aderans kaybı gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, FRP sarımlı hibrit donatıların hem dayanıklılık hem de yapısal yeterlilik açısından kullanılabilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bello ve ark. (2024), çalışmalarında Şekil 2.14'teki gibi modifiye edilmiş etriyeler kullanılarak betonarme kirişler üzerinde hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımı kullanılarak yük-sehim ilişkisi tanımlanmış, kirişlerin eğilme kapasiteleri ve süneklikleri belirlenmiş, ayrıca kırılma modları ve çatlak desenleri analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında, bir kontrol kirişi (BN) ve dört farklı tasarım olmak üzere toplamda on yedi sonlu eleman modeli simüle edilmiştir. Tasarımlar arasında dikdörtgen spiral (BR-S), dikdörtgen kafes sistemi (BT-R), dikey X-şekilli etriyeler (BV-X) ve X-şekilli kafes sistemi (BT-X) yer almakta olup, bu tasarımlar 150 mm, 125 mm, 100 mm ve 75 mm aralıklarla düzenlenmiştir. Sonuç olarak betonarme kirişlerin davranışında en etkili iyileştirmenin BT-R grubunda gözlemlendiğini ortaya koymuş; özellikle BT-R 100 mm aralıklı tasarımının, kontrol kirişi BN ile karşılaştırıldığında, eğilme kapasitesinde %6.551 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. Etriye aralığı ve eğiminin, betonarme kiriş performansını etriyelerde yapılan modifikasyonlara bağlı olarak önemli ölçüde etkilediği saptanmıştır. Ayrıca, BN de dahil olmak üzere tüm modellerde ve numunelerde benzer hasar modları gözlemlenmiş olup, modifiye edilmiş etriyelerin betonarme kiriş performansını önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Son olarak, BN ve BT-R 150 mm aralıklı modelleri ve numuneleri üzerinde yapılan gerçek deneyler sonucu elde edilen veriler ile sonlu eleman simülasyon sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 2.14. Donatı detayları (Bello ve ark., 2024)

Emara ve ark., (2024), çalışmasında betonarme kirişlerde enine donatı eksikliğinden kaynaklanan kesme zayıflıklarını gidermek amacıyla, sürdürülebilir alüminyum kutular ve yüksek performanslı betonların birlikte kullanıldığı yenilikçi bir güçlendirme yöntemini araştırmışlardır. Çalışmada, geleneksel kesme güçlendirme yöntemlerinin aksine, geri dönüştürülebilir ve hafif bir malzeme olan alüminyumun yapısal verimliliği test edilmiştir. Güçlendirme işlemi kapsamında, alüminyum kutular kirişlerin kesme bölgesine entegre edilmiş ve yüksek performanslı betonla desteklenmiştir. Deneysel bulgulara göre, bu sistemle güçlendirilen betonarme kirişlerde kesme kapasitesinde yaklaşık %35 oranında artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çatlak kontrolünde de önemli iyileşmeler kaydedilmiş; güçlendirilmiş kirişlerde çatlak genişliğinin %30'a varan oranlarda azaldığı belirlenmiştir. Yük taşıma kapasitesinde elde edilen bu artış, sistemin yalnızca dayanımı artırmakla kalmayıp aynı zamanda yapısal sünekliği de %20 civarında geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu yönüyle, alüminyum kutu ve yüksek performanslı beton kombinasyonu, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından geleneksel sistemlere güçlü bir alternatif sunmakta, kesme kuvvetlerinin dağılımını optimize ederek göçme riskini azaltmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kesme kapasitesi düşük betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde son yıllarda ortaya çıkan Mekanik Çelik Dikiş (*MÇD*) tekniği, bu çalışmanın ortaya çıkmasında önemli olmuştur. Bu araştırmada, mevcut kirişlerin güçlendirilmesinde uygulanan *MÇD* tekniğinden ilham alınarak tasarlanan *I* ve *U* şeklindeki donatılar, kiriş üretimi aşamasında etriye olarak kullanıldığında kiriş davranışındaki meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu yöntem, dıştan uygulanan *MÇD* tekniği ile kiriş üretimi sırasında kesme donatısı olarak kullanılan donatının kiriş davranışına etkilerini karşılaştırmaya yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, yönetmeliklerde belirtilen etriye davranışına ne ölçüde yaklaşılabileceği değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, bu tekniğin pratikte uygulanabilir olup olmadığı deneysel olarak ele alınmış ve sonuçlar doğrultusunda öneriler sunulmuştur. Bu tez çalışmasında deneyler iki grup halinde gerçekleştirilmiştir. İlk önce birinci grup deneyleri yapılmış daha sonra birinci grup deneylerinin sonuçlarından yola çıkılarak ikinci grup deneyleri yapılmasına karar verilmiştir. İlk grup deneyler için toplam 12 adet, ikinci grup deneylerde ise toplam 6 adet numune üretilmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışması ile toplam 18 adet kiriş deneyi düşey yükler altında test edilmiştir. Çalışma kapsamında, 6 adet referans numunesinin yanı sıra, kanca boyları 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm olan, etriye aralıkları ise 5 cm, 10 cm ve 15 cm olarak belirlenen toplam 12 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Bu çalışmada üretilen betonarme kirişler için yapılan kabuller aşağıda sunulmuştur:

1. Beton basınç dayanımı: Çalışmada kullanılan beton deney öncesi tasarım aşamasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (*TBDY-2018*) göre, betonarme binalarda kullanılmasına izin verilen en düşük beton sınıfı olan C25 (karakteristik hedef beton basınç dayanımı 25 MPa) olarak öngörülmüş olsa da laboratuvarında kırılan beton numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar, bu değerin altında gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, deneysel çalışmalar hedef beton basınç dayanımı 25 MPa'nın altında kalan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir
2. Enine donatı (etriye): Çalışma kapsamında, Ø6 çapında nervürlü B420c tipi donatılardan yapılmış etriyeler, 5 cm, 10 cm ve 15 cm aralıklarla kullanılmıştır. Yani Ø6 mm çapında nervürlü B420c tipi donatılardan hazırlanmış etriyeler, yaklaşık olarak 8Ø, 17Ø ve 25Ø etriye aralıklarıyla

uygulanmıştır. Etriye kancaları, 6 adet referans numunesinde TBDY 2018 yönetmeliğine uygun olarak 135° açıyla bükülerek tam sargı oluşturulmuş, diğer numunelerde ise yönetmeliğe aykırı şekilde 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm kanca boyları uygulanmıştır. Diğer bir ifade ile, etriye kancaları, referans numune dışındakiler için yönetmeliğe aykırı olarak yaklaşık 0Ø, 2.5Ø ve 6Ø kanca boylarıyla hazırlanmıştır.

3. Boyuna donatı: Deney kirişlerinde kullanılan *I* ve *U* şeklindeki kesme donatılarının kiriş kesme dayanımına katkısını gözlemlemek amacıyla, kirişlerin kesme kapasitesinin düşük, eğilme kapasitesinin ise 1. gruptan daha yüksek olması sağlanmıştır. Bu amaçla, 1. grup deneylerde kiriş alt bölgesinde 2Ø14 çekme donatısı ve kiriş üst bölgesinde 2Ø8 basınç donatısı kullanılmış; 2. grup deneylerde ise kiriş alt bölgesinde 2Ø12 çekme donatısı ve kiriş üst bölgesinde yine 2Ø8 basınç donatısı tercih edilmiştir. Bu donatı düzeni, referans ve önerilen kesme donatılarının katkısını daha net bir şekilde gözlemleyebilmek için seçilmiş olup, eğilme dayanımının 1. grupta daha yüksek tutulması ile kesme davranışının daha belirgin hale getirilmesi hedeflenmiştir.

3.1. Deney Numuneleri

Bu çalışmada kullanılan deney kirişlerinin geometrik ölçüleri ve donatı detayları, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan yük hücresi kapasitesi, basınç pompası ve yükleme sistemi gibi mevcut donanım ve laboratuvar koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda iki grup halinde deneylere tabi tutulması planlanan ½ geometrik ölçekli 18 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. İlk grup deneylerinde toplam 12 adet deney numunesi üretilmiştir. 12 numuneden 3'ü sırasıyla 5, 10 ve 15 cm etriye aralıklarıyla, referans olarak kabul edilen ve yönetmeliğe uygun etriye detaylarına sahip numuneler olarak ele alınmıştır. Geriye kalan 9 adet numune ise, çalışma kapsamında kanca boylarındaki değişimlerinin kesme dayanımına katkısını gözlemleyebilmek amacıyla kanca boyları sırasıyla 0, 1.5 ve 3.5 cm olarak tasarlanmıştır. Çizelge 3.1'de 1. grup numunelerinin donatı detayları verilmiştir.

Çizelge 3.1. 1. Grup deneyleri donatı detayları

Numune Adı	Kanca Boyu/ Etriye Aralığı (cm)
<i>RB5</i>	6/5 (Referans Numunesi)
<i>B5₀</i>	0/5
<i>B5_{1,5}</i>	1.5/5
<i>B5_{3,5}</i>	3.5/5
<i>RB10</i>	6/10 (Referans Numunesi)
<i>B10₀</i>	0/10
<i>B10_{1,5}</i>	1.5/10
<i>B10_{3,5}</i>	3.5/10
<i>RB15</i>	6/15 (Referans Numunesi)
<i>B15₀</i>	0/15
<i>B15_{1,5}</i>	1.5/15
<i>B15_{3,5}</i>	3.5/15

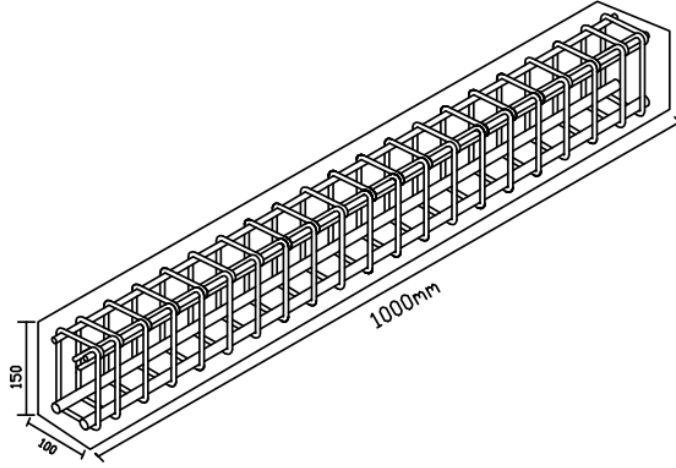
Birinci grup deney sonuçları dikkate alınarak ikinci grup deneylerin tasarımı planlanmıştır. İkinci grup deneylerinde, 3 numunede etriyeler yönetmeliğe uygun tam sargı referans numunesi olarak seçilmiş, diğer 3 numunede ise etriyeler 3.5 cm kanca boyunda ve 5, 10, 15 cm etriye aralıklarına sahip olacak şekilde toplamda 6 adet numune olarak tasarlanmıştır. Çizelge 3.2’de 2. grup numunelerin donatı detayları verilmiştir.

Çizelge 3.2. 2. Grup deneyleri donatı detayları

Numune Adı	Kanca Boyu/ Etriye Aralığı (cm)
<i>S5</i>	6/5 (Referans Numunesi)
<i>S5_{3,5}</i>	3.5/5
<i>S10</i>	6/10 (Referans Numunesi)
<i>S10_{3,5}</i>	3.5/10
<i>S15</i>	6/15 (Referans Numunesi)
<i>S15_{3,5}</i>	3.5/15

3.1.1. Deney numunelerinin boyutları

Deney numunelerinin boyutları belirlenirken, laboratuvar ortamının fiziksel koşulları ve uygulama kolaylığı dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Bu doğrultuda, deneylerde kullanılacak dikdörtgen kesitli kiriş numuneleri ½ ölçekli olacak şekilde planlanmıştır. Tüm numuneler için bir örnek olacak biçimde kiriş uzunluğu 1000 mm, kesit boyutları ise 150 mm × 100 mm olarak sabit tutulmuştur. Şekil 3.1’de bu deney kirişlerine ait geometrik ölçüler ayrıntılı biçimde sunulmuştur.



Şekil 3.1. Deney kirişlerinin boyutları

Deney kirişlerinin kalıplanmasında, dikdörtgen kesitli numunelere uygun olarak hazırlanmış plywood malzemeden üretilmiş kalıplar tercih edilmiştir. Bütün deney kirişleri aynı boyutta tasarlandığı için ilk grup deneylerinde hazırlanan kalıplar ikinci grup deneylerinde tekrar kullanılmıştır. Belirtilen ölçüler dikkate alınarak kalıpları hazırlanan kiriş numuneleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deney kirişlerinin kalıplarının hazırlanması

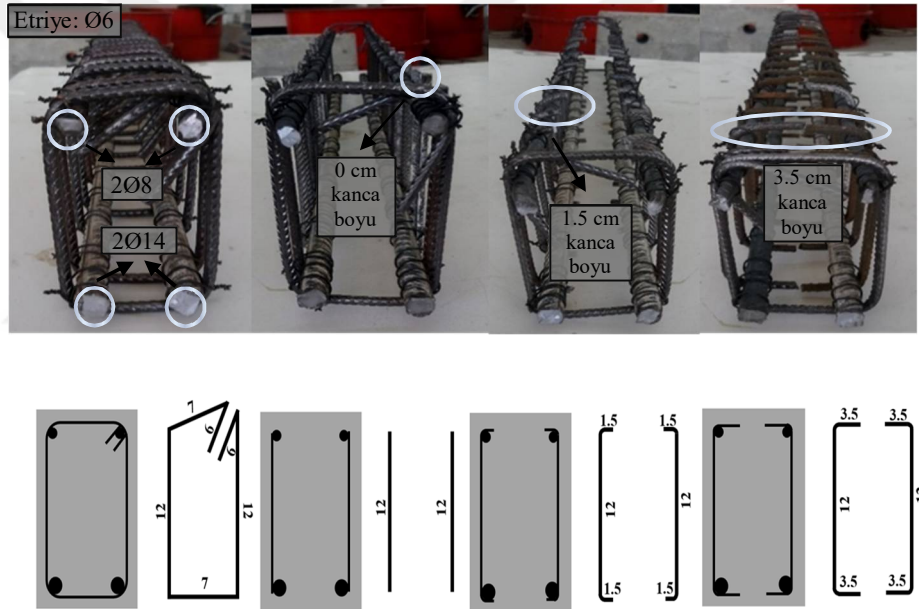
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları

Deney kirişlerinde kullanılan donatıların seçimi, yapılan düşey yükleme deneylerinde kesme hasarı oluşma olasılığı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk grup deney numunelerinde çekme bölgesi (kiriş alt bölgesi) için 2Ø14, basınç bölgesi (kiriş üst bölgesi) için ise 2Ø8 boyuna donatılar kullanılmıştır. Kesme

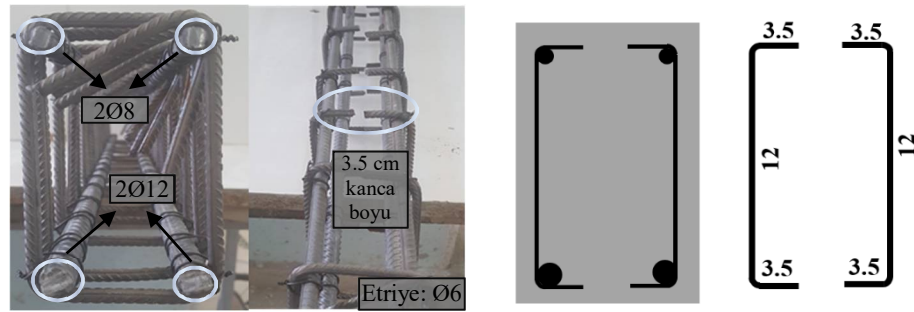
kuvvetlerini karşılaması için kullanılan etriye donatısı $\text{Ø}6$ çapında seçilmiş ve 5 cm, 10 cm, 15 cm aralıklarla yerleştirilmiştir.

Etriye tasarımında, üç numune TBDY-2018’de belirtilen kanca açısı ve boyuna uygun olarak tasarlanmış, diğer numunelerde bu yönetmelik hükümlerine aykırı olarak 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm kanca boylarında dikkate alınmıştır.

İkinci grup deney numunelerinde ise çekme bölgesinde $2\text{Ø}12$, basınç bölgesinde ise $2\text{Ø}8$ boyuna donatılar kullanılmıştır. Etriye donatısı yine $\text{Ø}6$ olarak belirlenmiş ve aynı şekilde üç numune yönetmeliğe uygun kanca açısı ve boyuyla tasarlanırken, diğer numuneler 5 cm, 10 cm, 15 cm etriye aralıklarıyla 3.5 cm kanca boyunda düzenlenmiştir. Bu farklı tasarım yaklaşımları, kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla planlanmıştır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te kiriş numunelerine ait donatı detayları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. 1. Grup deney numunelerinin donatı detayları



Şekil 3.4. 2. Grup deney numunelerinin donatı detayları

3.1.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri

Yapılan deneysel çalışmada, etriyelerin "I" ve "U" şekline sahip olmalarının kirişlerin dayanımına etkilerini incelemek ve deney numuneleri arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla, tüm deney kirişlerinin mekanik ve fiziksel özellikleri ile deney koşulları sabit tutulmuştur. Bu özellikler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.1.3.1. Beton

Bu çalışmada kullanılan deney kirişlerinin beton döküm işlemleri, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Beton dökümüne başlamadan önce, kirişlerin düzgün bir yüzeye ve istenilen geometriye sahip olabilmesi amacıyla kalıpların iç yüzeylerine kalıp yağı sürülmüştür. Her bir kiriş için ayrı ayrı beton dökümü yapılmış Şekil 3.5'teki gibi kirişlerin içine dökülen betonun boşluksuz bir şekilde yerleşmesi ve homojen yayılması için vibratör kullanılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminin ardından, kiriş yüzeyleri mala ile düzeltilmiştir. Karışıklık olmaması için her numuneye isimlerinin yazılı olduğu etiketler yapıştırılmış ve böylece her numunenin istenilen özelliklere uygun şekilde hazırlanması sağlanmıştır.



Şekil 3.5. Betonun kalıplara yerleştirilmesi

Çizelge 3.3'te deney kirişlerinin üretiminde kullanılan betonun 1 m³ hacimi için karışım bileşenleri verilmiştir. Beton karışımında kimyasal katkı maddesi olarak herhangi bir akışkanlaştırıcı kullanılmamıştır. Deneylerde Su/Çimento oranı 0.44 seçilmiştir. Ayrıca, karışımlarda kullanılan en büyük agrega çapı 12 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Deney kirişlerinin beton karışım miktarları (1 m³ beton için)

Beton Karışım Malzemeleri	Ağırlık (kg)
Çimento (kg)	531.40
Su (kg)	237.88
İnce Agrega (0-4mm) (kg)	713.65
Orta Agrega (5-12mm) (kg)	817.06
Toplam	2300

Beton döküm işlemi sırasında, basınç ve yarma çekme deneylerinde kullanılmak üzere toplam 6 adet silindir numune hazırlanmıştır. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere, bu numuneler için 300 mm yüksekliğe ve 150 mm çapa sahip standart silindir kalıplar tercih edilmiştir. Hazırlanan silindir numuneler, deney kirişleriyle aynı kür koşullarında bekletilmiştir. Deneysel çalışmada eksenel basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri, Konya Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı’nda bulunan 1000 kN kapasiteli dijital basınç testi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 3.6.** Silindir numuneler

Beton dökümünden alınan 4 adet silindir numune, Şekil 3.7’de görülen dijital pres makinesinde basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Tasarım aşamasında hedeflenen beton dayanımı 25 MPa olarak belirlenmiş olmakla birlikte, yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama silindir basınç dayanımı Çizelge 3.4’te görüldüğü üzere 18,73 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, deneysel çalışmalar, pratikte 25MPa’nın altında kalan beton dayanımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Beton basınç dayanımının belirlenmesi

Çizelge 3.4. Deney numunelerinde ortalama beton basınç dayanımları

Silindir Numuneler	Silindir Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
1	17.10	18.73
2	21.00	
3	18.08	

Beton dökümünden alınan iki silindir numune üzerinde yarmada çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu testler sonucunda ortalama çekme dayanımı belirlenmiştir. Çizelge 3.5’te yarmada çekme test sonuçları ve Şekil 3.8’de yarmada çekme testine ait görüntüler sunulmuştur.



Şekil 3.8. Betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Çizelge 3.5. Deney numunelerinde ortalama yarmada çekme dayanımları

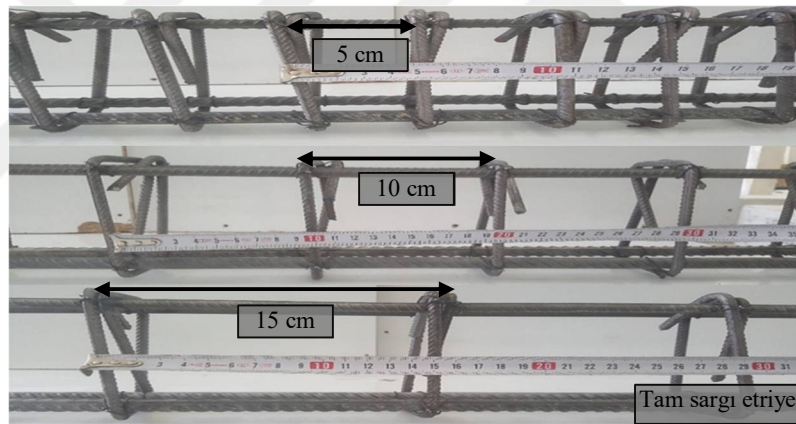
Silindir Numuneler	Silindir Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
1	1.93	1.79
2	1.65	

3.1.3.2. Donatı

Deney kirişlerinin imalatında 6 mm, 12 mm ve 14 mm çaplarında olmak üzere üç farklı donatı çapı kullanılmıştır. Birinci grup deneylerinde kiriş çekme bölgesinde 2Ø14 ve basınç bölgesinde 2Ø8 boyuna donatısı kullanılmıştır. Farklı çekme donatı çaplarının betonarme kirişlerin yapısal davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ikinci grup deneylerinde kiriş çekme bölgesinde 2Ø12 ve basınç bölgesinde 2Ø8 boyuna donatısı kullanılmıştır. Çekme donatısındaki bu değişiklik, kirişlerin taşıma kapasitesi, süneklik ve çatlak oluşumu gibi temel performans kriterlerini değerlendirmek için yapılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı *I* ve *U* şekilli etriyelerin kesme dayanımına katkısını incelemek olduğu için birinci grup deneylerinde kullanılan etriyeler 5, 10, 15 cm aralıklarla yerleştirilmiş olup, her bir aralık için TBDY-2018 yönetmeliğine uygun üç adet referans numunesi imal edilmiştir. Diğer etriyeler için ise aynı aralıklar (5, 10 ve 15 cm) seçilmiş, etriye kanca boyları sırasıyla 0, 1.5, 3.5 cm olacak şekilde üretilmiştir. Ayrıca 0, 1.5 ve 3.5 cm etriye kanca boyuna sahip kirişlerin donatıları bağlanırken donatılar sabit durabilsin diye en baştaki ve en sondaki bir tane etriye tam sargı şeklinde bağlanmıştır. Şekil 3.9’da 15 cm etriye aralığına sahip 0, 1.5, 3.5 cm kancalı ve tam sargı etriye donatı detayları gösterilmiştir. İkinci grup deneylerinde ise Şekil 3.10’da gösterildiği gibi 5, 10 ve 15 cm etriye aralıklarına sahip üç adet kiriş numunesi TBDY-2018 yönetmeliğine uygun tam sargı şeklinde imal edilirken diğer kiriş numuneleri ise Şekil 3.11’deki gibi 3.5 cm kanca boyunda 5, 10 ve 15 cm etriye aralıkları ile imal edilmiştir.



Şekil 3.9. Etriye kanca boyu donatı detayları



Şekil 3.10. 5, 10, 15 cm aralıklarla tam sargı etriye detayları



Şekil 3.11. 5, 10, 15 cm aralıklarla 3.5 cm kanca boyuna sahip etriye detayları

3.2. Deney Düzeneği

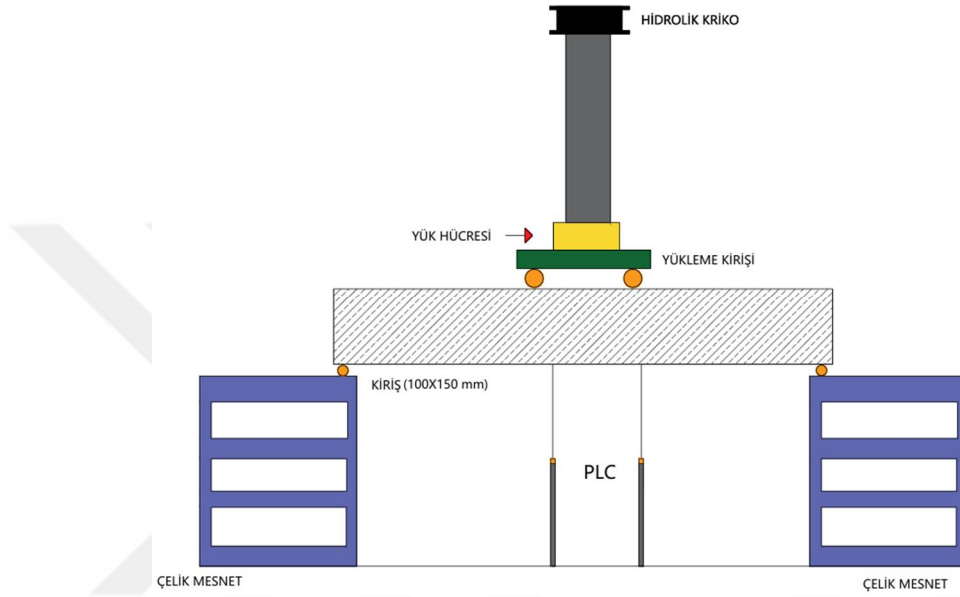
Tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalar, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Deney numunelerinin boyutları ile donatı düzenlemeleri, laboratuvar olanakları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Uygulanan düşey yükler, rijit çelik bir yükleme çerçevesi aracılığıyla numunelere aktarılmış ve tüm testler bu sistem altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterildiği üzere, deneyler dört noktalı eğilme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Gerçek yapılarda kirişler yayılı yük altında bulunsalar da laboratuvar koşullarındaki kısıtlamalar nedeniyle bu yükleme durumu sağlanamamıştır. Bunun yerine, moment diyagramına yakın bir durum oluşturmak amacıyla simetrik iki noktadan kiriş üst bölgesine yükleme yapılmıştır.

Deneylerde hidrolik krika yardımıyla P büyüklüğündeki tekil yük uygulanmış ve yükleme kirişi yardımıyla $P/2$ büyüklüğünde iki eşit tekil yük halinde kiriş numunelerine simetrik olarak aktarılmıştır. Tüm deney numuneleri için a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı 2.92 alınmıştır. Yükleme protokolü doğrultusunda, başlangıçta 1 tonluk artışlarla yük kontrollü bir uygulama yapılmıştır. Kirişlerin kesme kırılması meydana gelene kadar yük kontrollü yükleme devam etmiş ve bu noktada deneyler sonlandırılmıştır. Monotonik olarak gerçekleştirilen yüklemenin her 1 tonluk artışında, kiriş üzerindeki çatlakların işaretlenmesi amacıyla kısa bir süre ara verilmiştir.

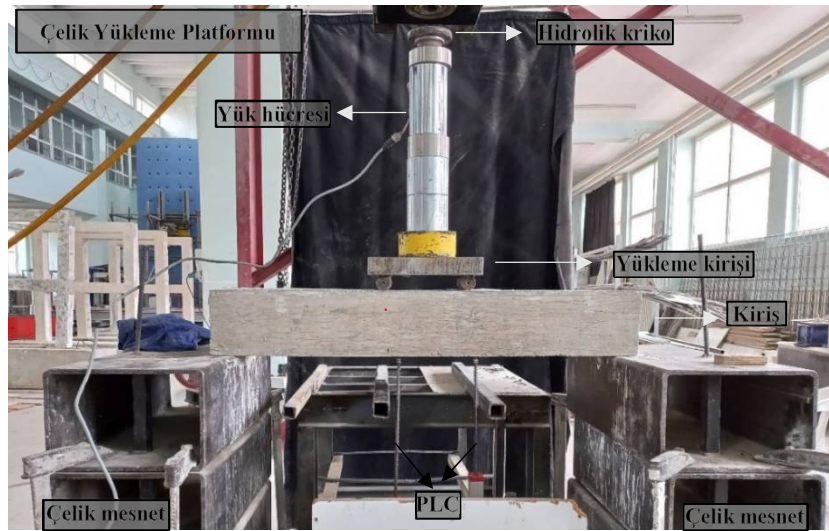
Deney sırasında, bilgisayar destekli 8 kanallı bir veri toplama sistemi kullanılarak, yük ve yer değiştirme değerleri sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu sistem sayesinde, deney sırasında elde edilen verilerle eş zamanlı olarak yük-deplasman grafikleri de oluşturulmuştur. Ayrıca, deney süresince oluşan çatlakların gelişimi ve kirişlerin deformasyon davranışı anlık olarak gözlemlenmiş, bu veriler daha sonra analizlerde kullanılmak üzere kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan veri toplama sistemi sayesinde çatlak oluşumu, yer değiştirmeler ve kirişlerin genel davranışı gözlemlenmiş, analizlerde kullanılmak üzere detaylı veriler elde edilmiştir. Her bir numunenin deney sürecinde, yük hücresinden elde edilen yük değerleri ile numunenin orta noktasına yerleştirilen iki adet Potansiyometrik Lineer Cetvelden (PLC) alınan deplasman verileri, veri toplama sistemi aracılığıyla kaydedilmiştir. Deneylerin tamamlanmasının ardından bu veriler, .txt formatında elde edilip Excel dosyasına aktarılmıştır. Bunun yanı sıra, yük ve deplasman verileri arasındaki ilişki deney esnasında

bilgisayar ekranında anlık olarak grafiksel biçimde izlenmiş; bu sayede numunelerin davranışındaki değişimler eş zamanlı olarak gözlemlenebilmiştir.

Deneysel çalışma sonunda elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak, numunelerin süneklik, eğilme dayanımı ve rijitlikleri çeşitli analiz yaklaşımlarıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, numunelerin dayanım ve deformasyon kapasitelerinin değerlendirilmesine ve yapı elemanlarının davranışının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 3.12. Deney düzeneği tasarımı



Şekil 3.13. Deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında deneyler iki grup halinde gerçekleştirilmiştir. İlk grup deneylerde toplam 12 adet numune üretilmiştir. Bu numunelerde boyuna donatılar, kiriş boyutları ve beton özellikleri sabit tutulurken, etriye kanca boyları ve etriye aralıkları değiştirilerek kirişlerin kesme dayanımı ve göçme davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk grup deneylerde, 5 cm, 10 cm ve 15 cm etriye aralıklarına sahip 3 adet referans numunesi hazırlanmıştır. Diğer numuneler ise 5 cm, 10 cm ve 15 cm etriye aralıkları ile 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm kanca boyuna sahip olacak şekilde üretilmiştir.

İkinci grup deneylerde toplam 6 adet numune üretilmiştir. Bu numuneler, 5 cm, 10 cm ve 15 cm etriye aralıklarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk grup deneylerin sonuçları, 3.5 cm kanca boyuna sahip numunelerin daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Bu doğrultuda, ikinci grup deneylerde yalnızca 3.5 cm kanca boyuna sahip numuneler seçilmiş ve farklı etriye aralıklarına (5, 10 ve 15 cm) sahip bu numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin amacı, etriye kanca boyu ve aralıklarının kirişlerin kesme dayanımı, süneklik ve rijitlik gibi performans kriterlerine olan etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktır. İlk grup deneylerinde elde edilen bulgulara dayanarak, ikinci grup deneylerde performans açısından en avantajlı görülen etriye kanca boyu üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır.

Deneyler sırasında, her bir monotonik yükleme adımının sonunda kirişlerde oluşan çatlakların işaretlenmesi için belirli bir süre beklenmiştir. Tüm deney numuneleri için aynı yükleme protokolü uygulanmıştır. Deney sırasında uygulanan düşey yük, yük hücresi (load cell) aracılığıyla ölçülmüş; kirişin alt orta bölgesine yerleştirilen iki adet yer değiştirme ölçer veya Potansiyometrik Lineer Cetvel (*PLC*) kullanılarak da yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Elde edilen bu ölçümler, basit geometrik yaklaşımlar kullanılarak kirişin tam ortasındaki deplasman değerine dönüştürülmüş ve her bir numune için düşey yük ile deplasman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler oluşturulmuştur. Deneysel sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi ve numuneler arasındaki karşılaştırmaların detaylı bir şekilde yapılabilmesi için her deney numunesine ait ilgili grafikler ve görseller aşağıdaki sırayla sunulmuştur:

- Göçme durumu oluşana kadar çatlak oluşum aşamaları,
- Yük-deplasman grafiği,
- Göçme sonrası detaylı hasar durumu.

Her bir deneyin sonuçları ayrı ayrı ele alındıktan sonra, tüm deney numuneleri dayanım, süneklik, rijitlik ve göçme modları açısından karşılaştırılmış ve bu parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Deneylerin bireysel sonuçları, genel karşılaştırmalar eşliğinde incelenmiş ve deneylerin bulguları farklı başlıklar altında yorumlanmıştır. Bu sayede, her numunenin performansı hem kendi içinde hem de diğer numunelerle birlikte değerlendirilerek genel sonuçlara ulaşılmıştır.

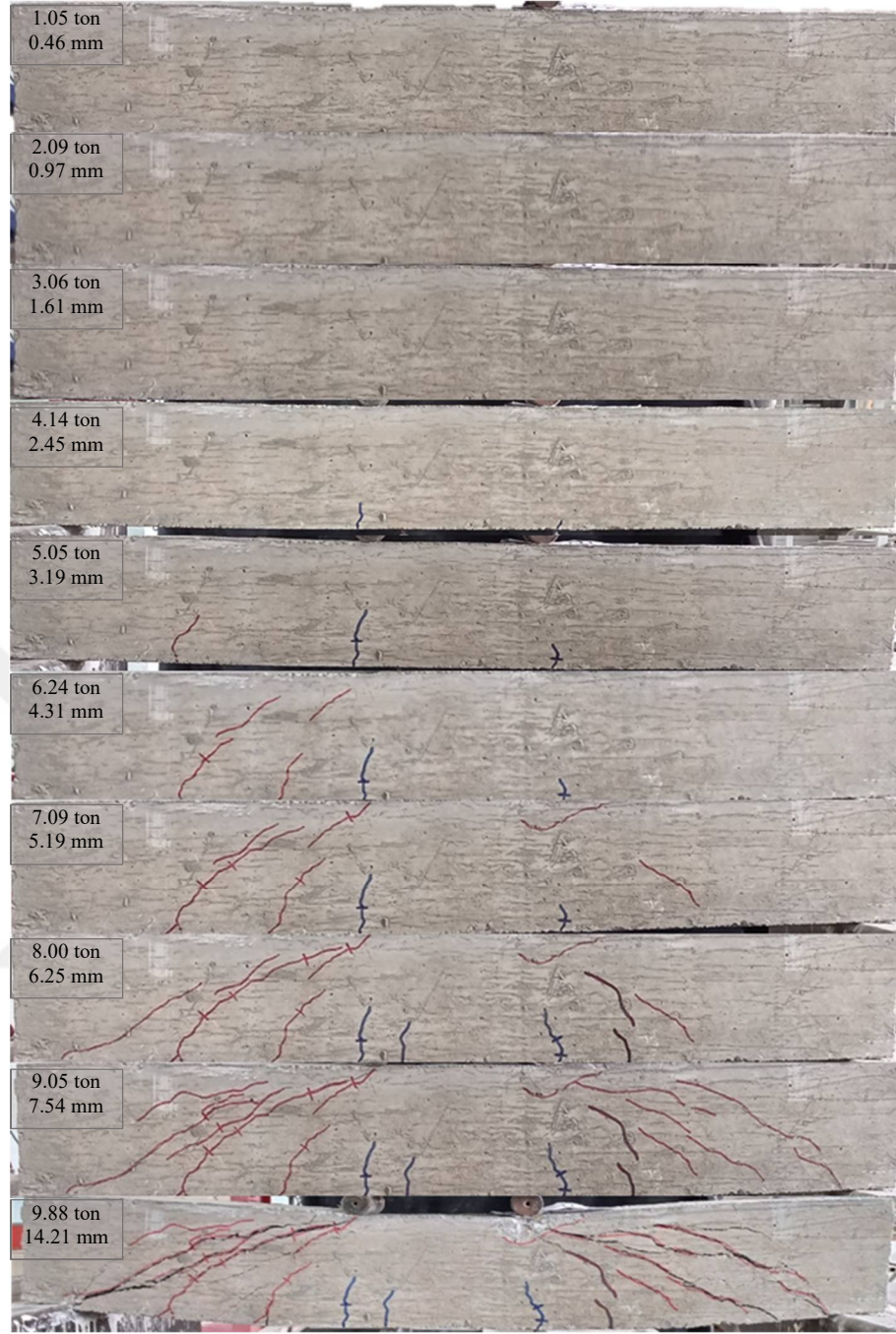
4.1. DeneySEL Çalışma Sonuçları

Bu bölümde, her bir deney kirişi için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı sunulmuştur. 4.2 numaralı bölümde ise bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

4.1.1. 1. Grup Deneyleri

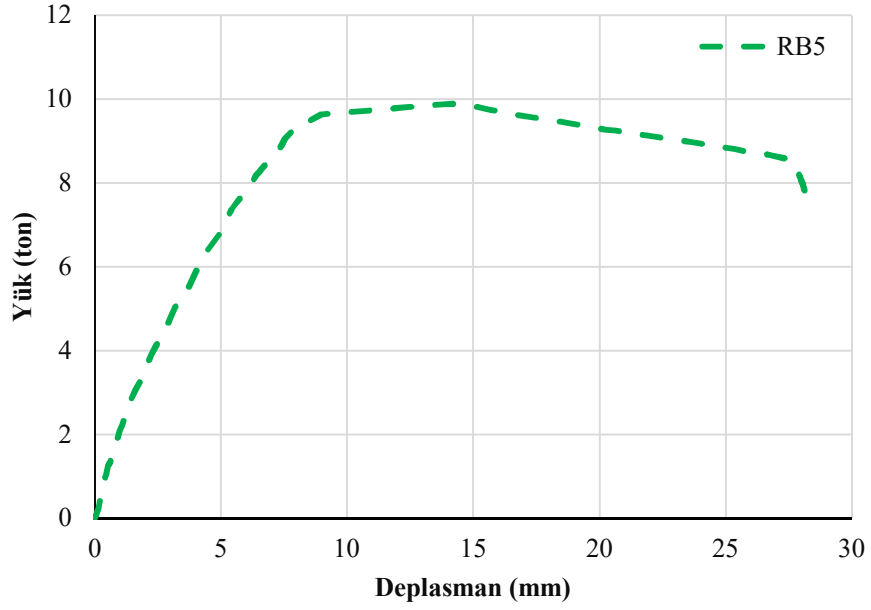
1. Grup deneylerinde 3 adet referans numunesi bulunmaktadır. Bu referans numuneleri 5, 10 ve 15 cm etriye aralıklarına sahip *TBDY-2018* yönetmeliğine uygun olarak imal edilmiş numunelerdir.

Çalışma kapsamında ilk olarak, 5 cm etriye aralıklarıyla tam sargılı referans numunesi (*RB5*) test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, uygulanan yük 4.14 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesinde ilk eğilme çatlak gözlemlenmiştir. İlk eğik çekme çatlak ise 5.05 tonluk düşey yük uygulandığında oluşmuştur. Eğilme çatlakının meydana geldiği anda deplasman değeri 2.45 mm olarak kaydedilmiş, eğik çekme çatlakının oluştuğu andaki deplasman değeri ise 3.19 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş üzerine uygulanan düşey yükün artmasıyla eğilme ve eğik çekme çatlaklarında artış gözlenmiştir. Kirişin eğilme kapasitesi kesme kapasitesinden yüksek olduğundan kesme açıklığında gözlenen eğik çekme çatlakları yoğunlaşmıştır. Nihayet, kiriş numunesi, 9.88 tonluk yük ve 14.21 mm deplasman değerine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme açıklığında gözlenen eğik çekme kırılması (diagonal tension failure) sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.1’de *RB5* referans kiriş numunesinde gözlemlenen çatlak oluşum aşamaları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

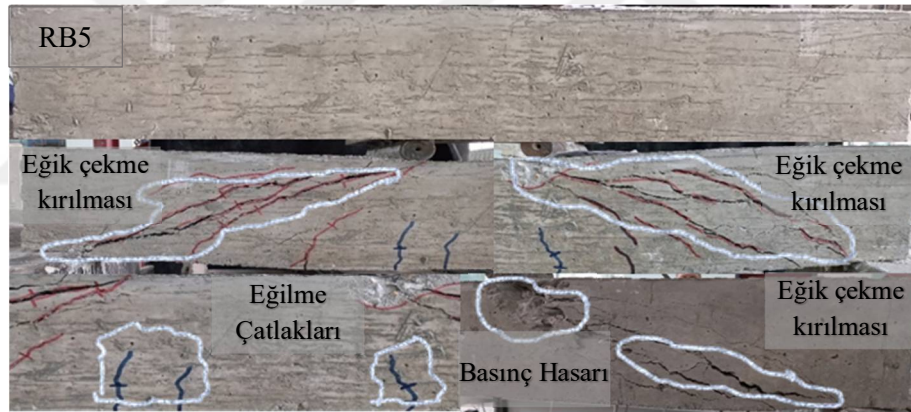


Şekil 4.1. RB5 referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.2’de, RB5 referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. RB5 numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.3’te yer almaktadır.



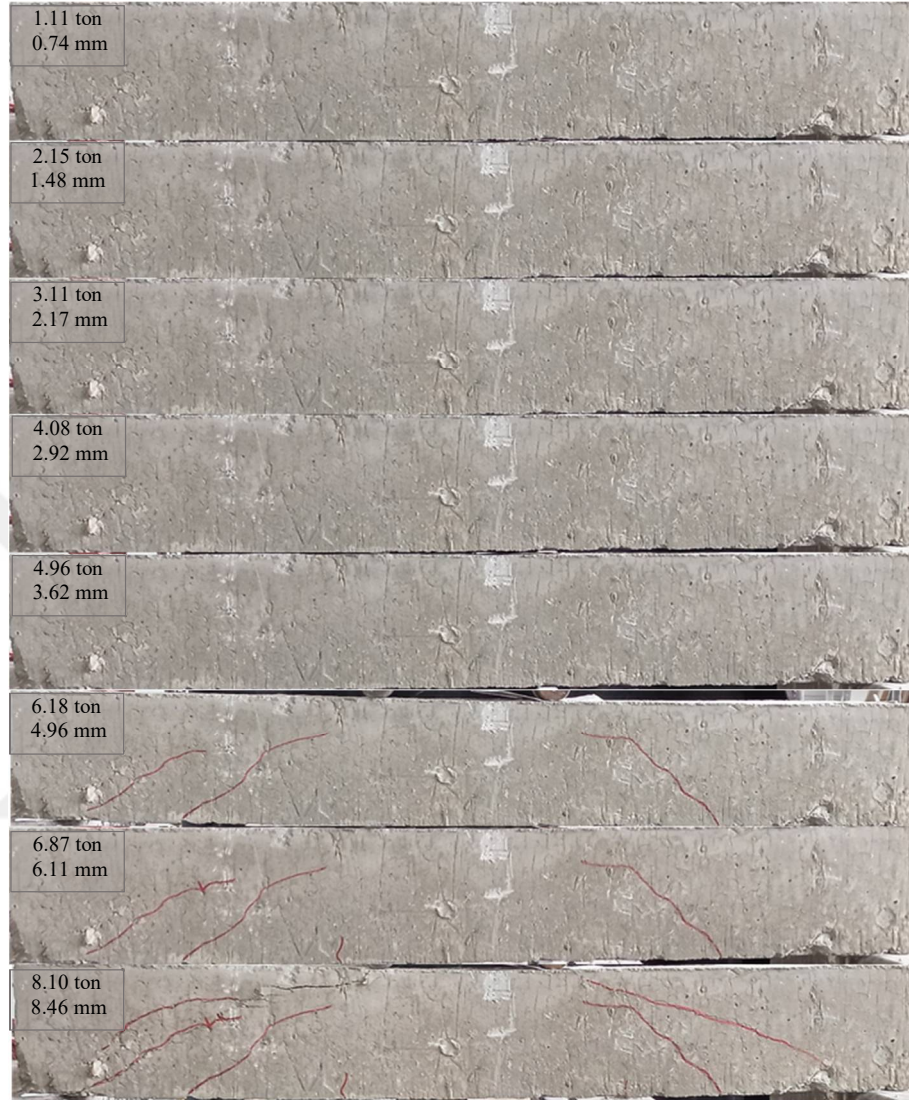
Şekil 4.2. RB5 referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.3. RB5 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

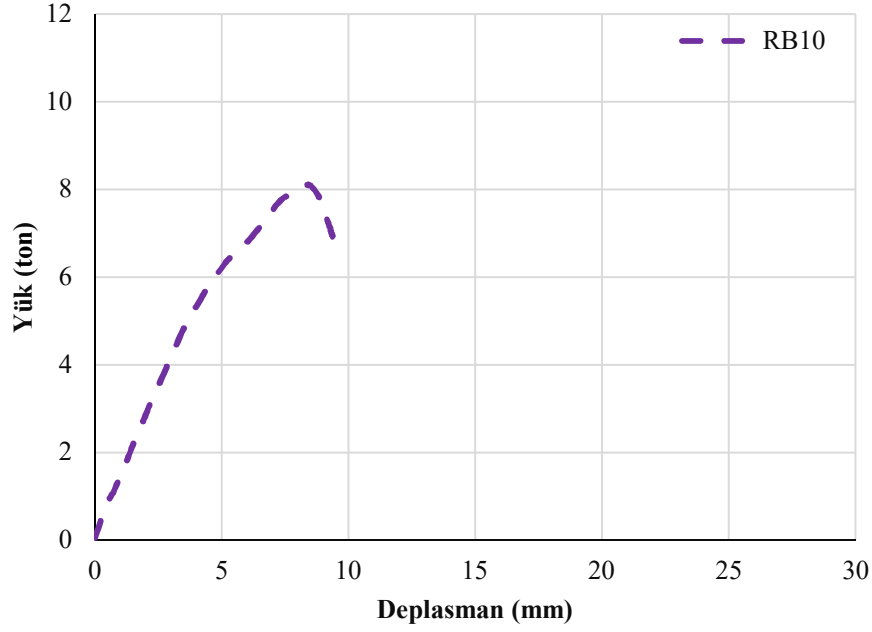
RB10 numunesi 10 cm etriye aralıklarıyla tam sargılı referans numunesi olarak test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, uygulanan yük 6.18 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 4.96 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 8.10 tonluk yük ve 8.46 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ ve sol açıklıklarındaki eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere etriye aralığının artmasıyla eğilme çatlakları gözlenmeden eğik çekme çatlakları oluşarak eğik çekme kırılması meydana gelmiştir.

Şekil 4.4'te *RB10* referans kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları yük-deplasman ilişkisi içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 4.4. *RB10* referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.5'de, *RB10* referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. *RB10* numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.5. RB10 referans Kiriş Numunesine ait Yük-Deplasman Grafiği



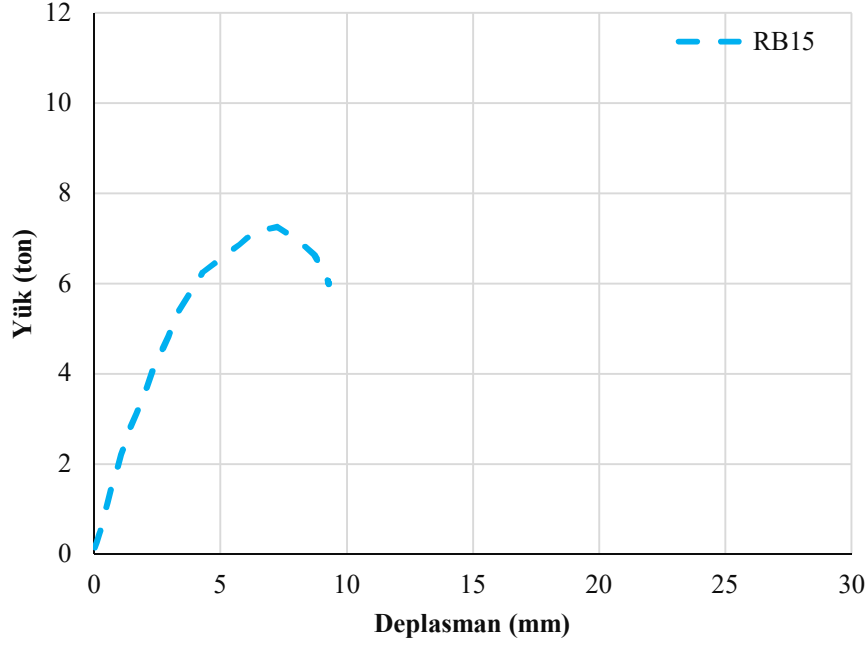
Şekil 4.6. RB10 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

RB15 numunesi, 15 cm etriye aralıklarıyla tasarlanan tam sargılı referans kiriş numunesini temsil etmektedir. RB15 referans kiriş numunesinde, uygulanan yük 5.11 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlağının meydana geldiği anda deplasman değeri 3.13 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 7.25 tonluk yük ve 7.25 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Görüldüğü üzere etriye aralığının artmasıyla kiriş orta bölgesinde eğilme çatlakları gözlenmeden eğik çekme çatlakları gözlenmiş ve deney yaklaşık 45° açıyla oluşan eğik çekme kırılmasıyla sonlanmıştır. Ayrıca, etriye aralığının artmasıyla düşey yük taşıma kapasitesinde ve bu yük değerine karşılık gelen düşey deplasman değerinde düşüş gözlenmiştir. Şekil 4.7’de RB15 referans kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.7. *RB15* referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.8’de, *RB15* referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. *RB15* numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.9’da yer almaktadır.



Şekil 4.8. RB15 referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği

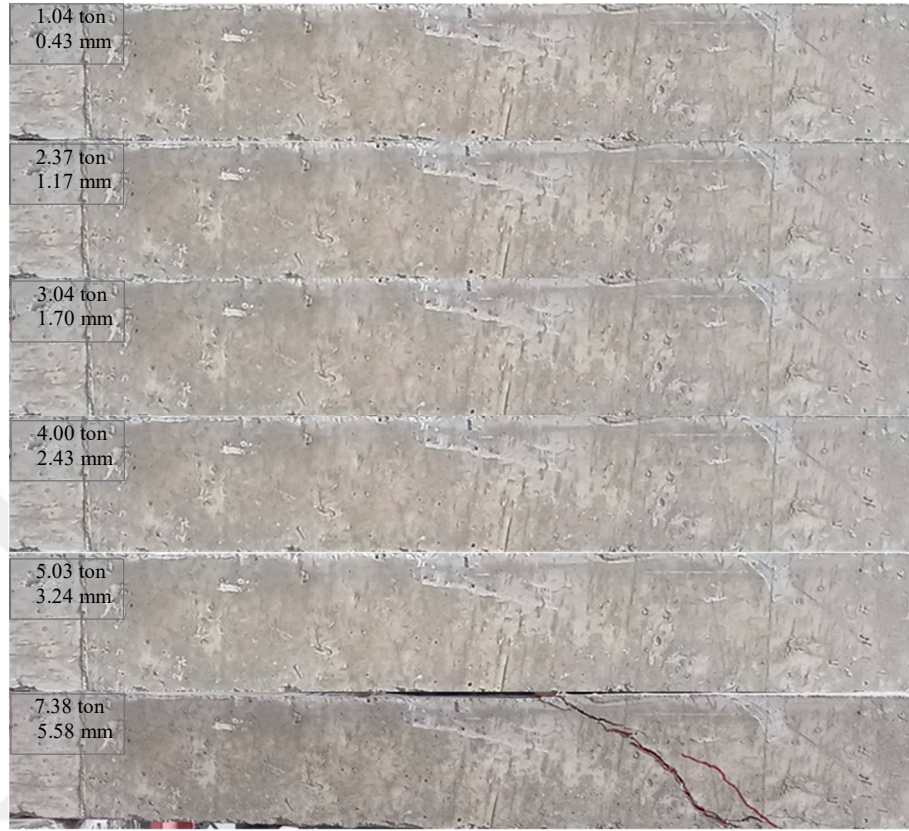


Şekil 4.9. RB15 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Bu aşamadan sonra öncelikle 5 cm etriye aralıklarına sahip 0 cm 1.5 cm ve 3.5 cm kanca boyuna sahip deney numuneleri test edilmiştir. Daha sonra 10 cm ve 15 cm etriye aralıklarına sahip 0 cm 1.5 cm ve 3.5 cm kanca boylarına sahip numuneler test edilmiştir.

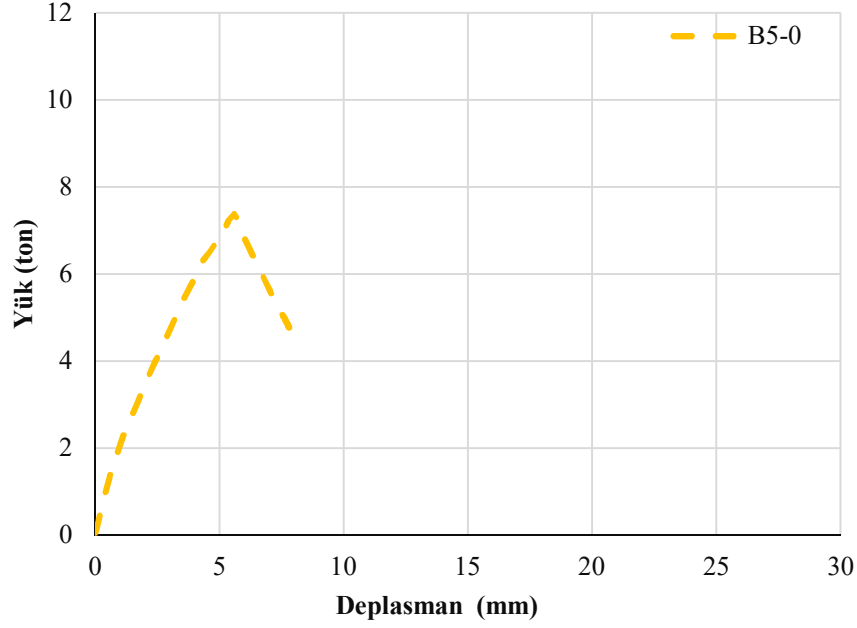
B5₀ numunesi 5 cm etriye aralığına ve 0 cm kanca boyuna sahip deney numunesidir. B5₀ kiriş numunesinde, uygulanan yük 6.51 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlemlenmiştir. Eğik çekme çatlağının meydana geldiği anda deplasman değeri 4.60 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 7.38 tonluk yük ve 5.58 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklıkta eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.10'da B5₀ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir. Görüldüğü üzere, eğilme çatlakları oluşmadan doğrudan eğik çekme kırılması sonucunda kirişte göçme gerçekleşmiştir. Ayrıca, B5₀

numunesinin taşıdığı maksimum yük, *RB15* numunesine çok yakın bir değerde elde edilmiştir.



Şekil 4.10. *B50* kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.11’de, *B50* referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. *B50* numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.12’de yer almaktadır.

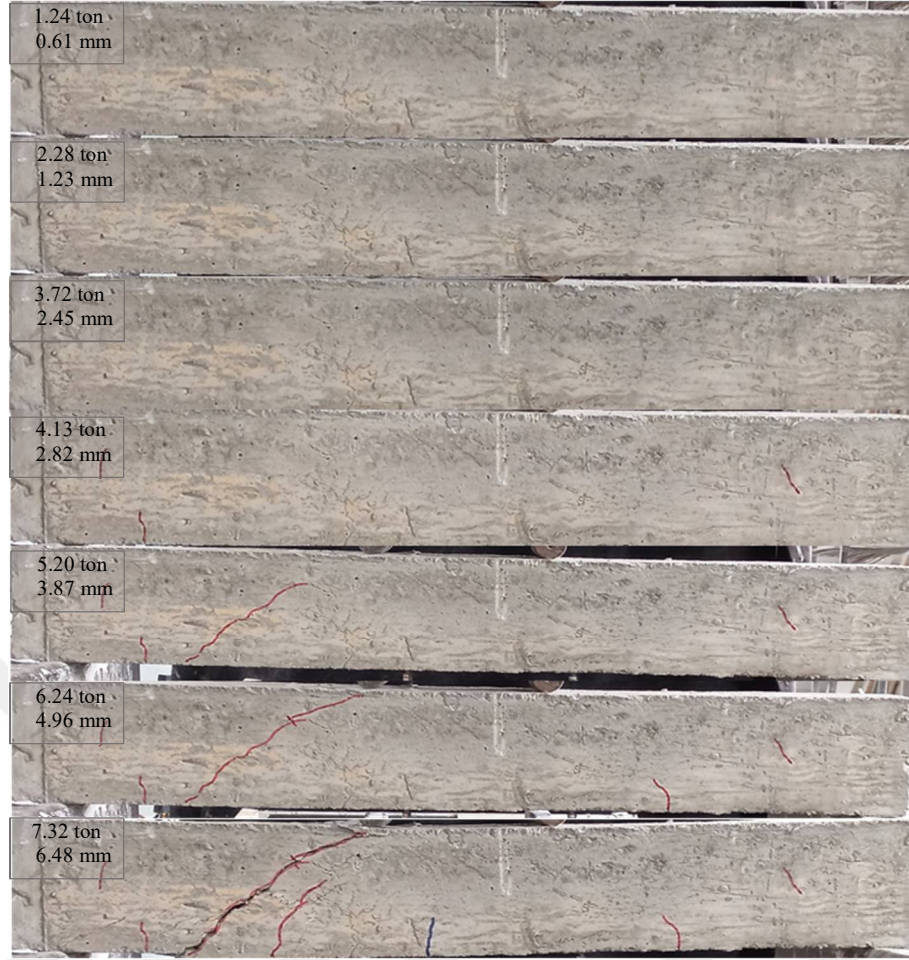


Şekil 4.11. B5₀ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



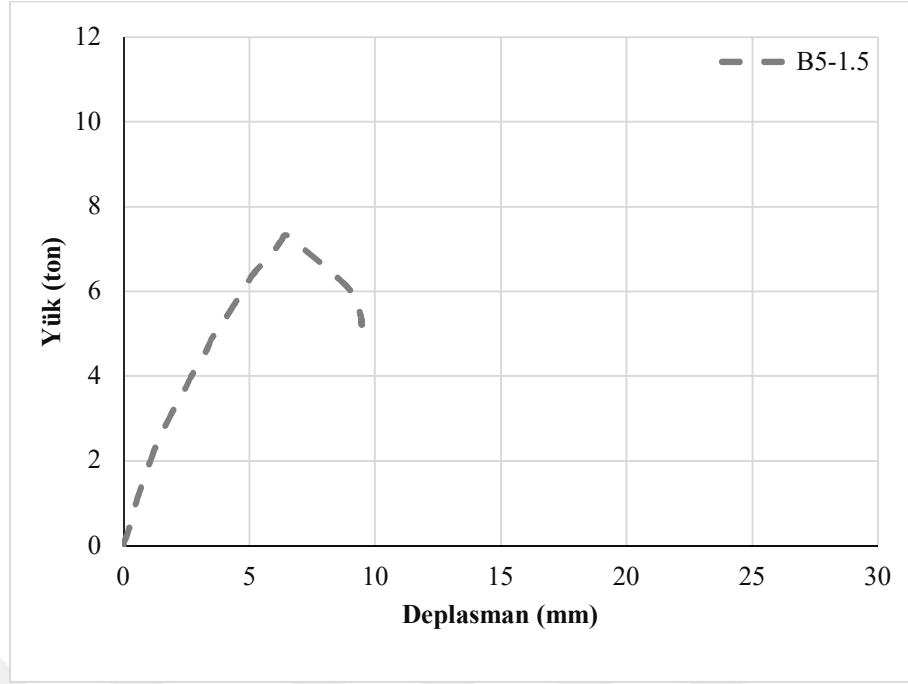
Şekil 4.12. B5₀ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

B5_{1.5} numunesi 5 cm etriye aralığına ve 1.5 cm kanca boyunca sahip deney numunesidir. B5_{1.5} kiriş numunesinde, uygulanan yük 4.13 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 2.82 mm olarak kaydedilmiştir. İlk eğilme çatlağı ise 6.24 ton yük yüklendiğinde kirişin orta bölgesinde meydana gelmiştir. Eğilme çatlağın meydana geldiği anda deplasman değeri 4.96 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş numunesi, 7.32 tonluk yük ve 6.48 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklıkta eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.13'te B5_{1.5} kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

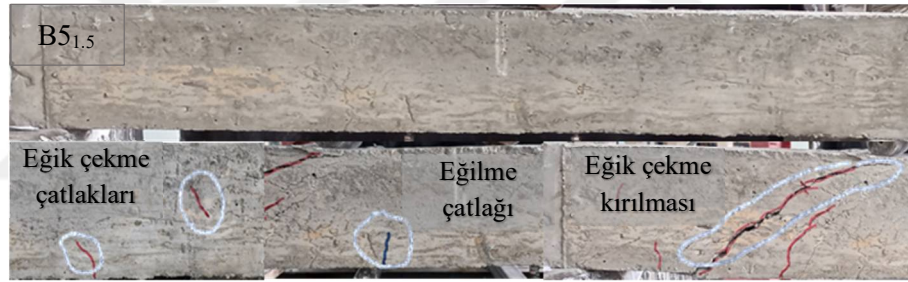


Şekil 4.13. $B5_{1.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.14'te, $B5_{1.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B5_{1.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.15'te yer almaktadır.

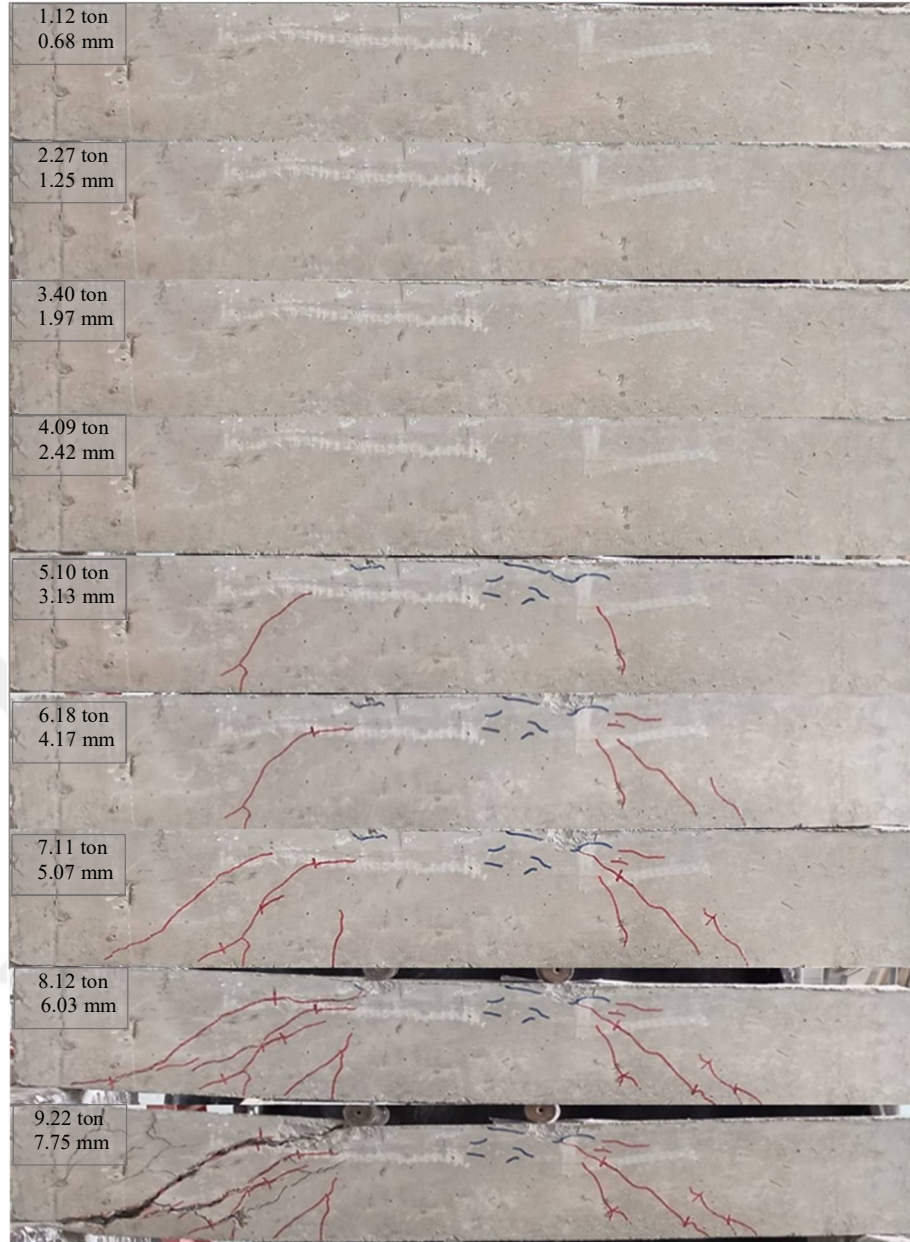


Şekil 4.14. $B5_{1.5}$ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



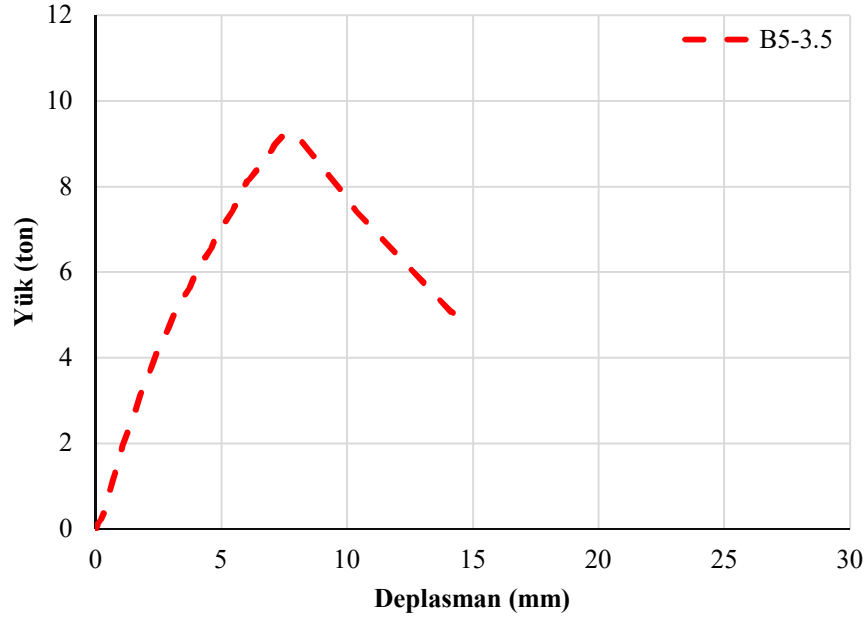
Şekil 4.15. $B5_{1.5}$ Kiriş numunesine ait göçme Sonrası Hasar Detayları

$B5_{3.5}$ numunesi 5 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyuna sahip deney numunesidir. $B5_{3.5}$ kiriş numunesinde, uygulanan yük 5.10 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları, orta bölgesinde ise ilk eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Eğik çekme ve eğilme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 3.13 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 9.22 tonluk yük ve 7.75 mm deplasman değerine ulaştığında, sol açıklıkta eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.16 da $B5_{3.5}$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

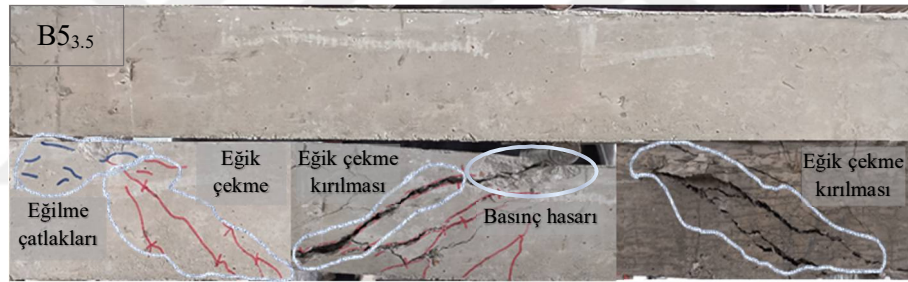


Şekil 4.16. $B5_{3.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.17’de, $B5_{3.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B5_{3.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.18’de yer almaktadır.

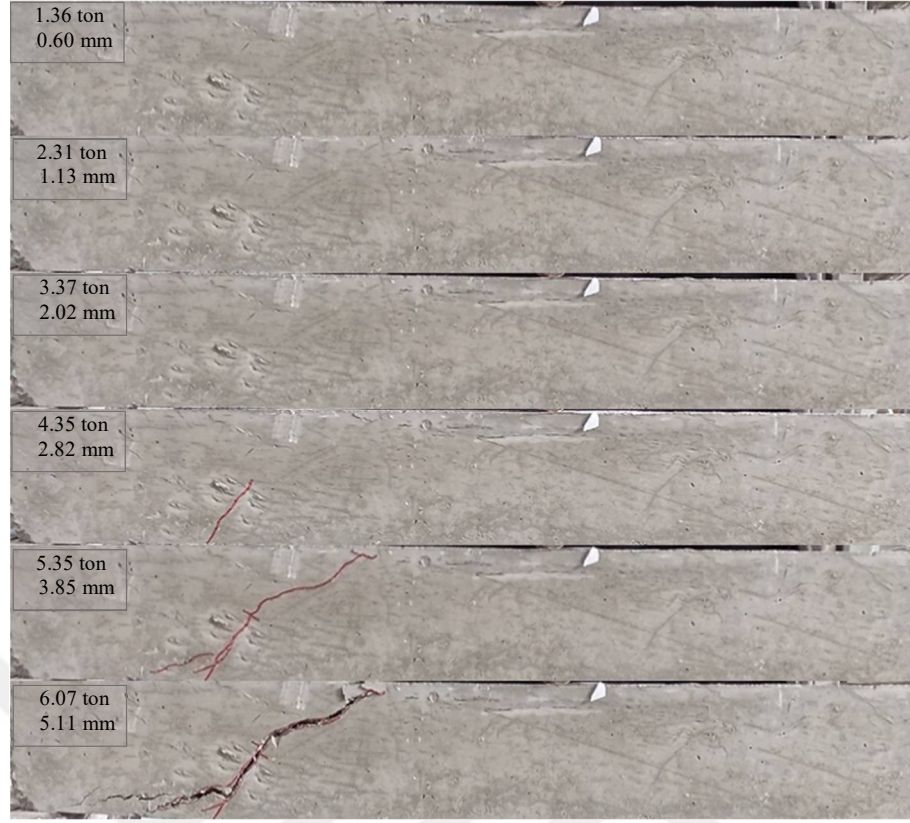


Şekil 4.17. B5_{3.5} kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



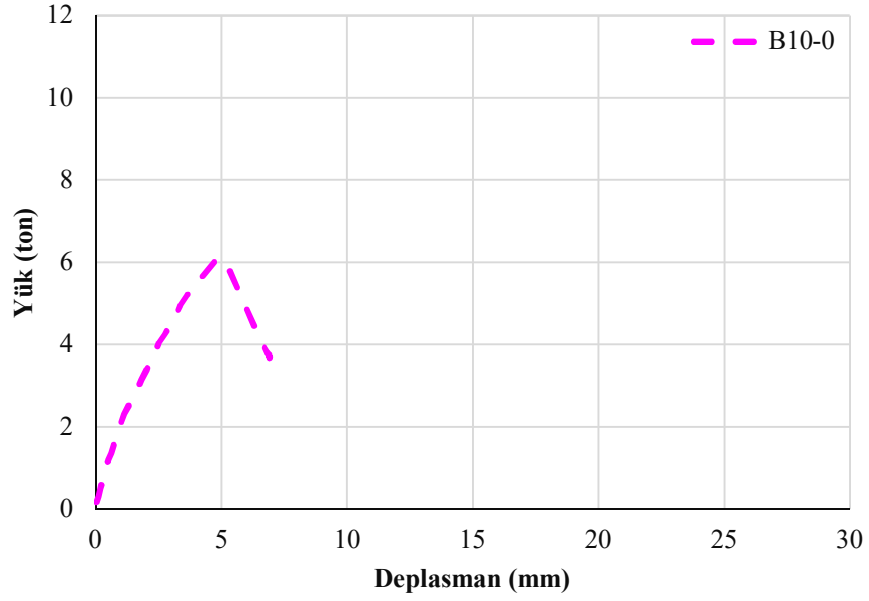
Şekil 4.18. B5_{3.5} kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

B10₀ numunesi 10 cm etriye aralığına ve 0 cm kanca boyuna sahip deney numunesini temsil etmektedir. B10₀ kiriş numunesinde, uygulanan yük 4.35 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sol bölgesinde kılcal düzeyde ilk eğik çekme çatlakları gözlemlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 2.82 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 6.07 tonluk yük ve 5.11 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklıkta ani ve gevrek bir şekilde gerçekleşen eğik çekme kırılması sonucu göçme meydana gelmiştir. Şekil 4.19’da B10₀ kiriş numunesinin çatlak ilerleme aşamaları gösterilmiştir.

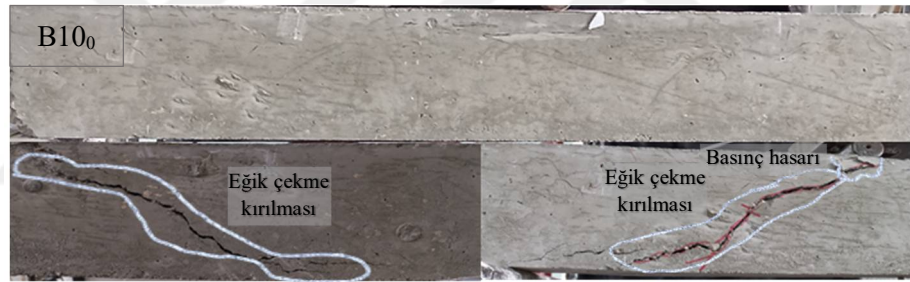


Şekil 4.19. $B10_0$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.20’de, $B10_0$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B10_0$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.21’de yer almaktadır.

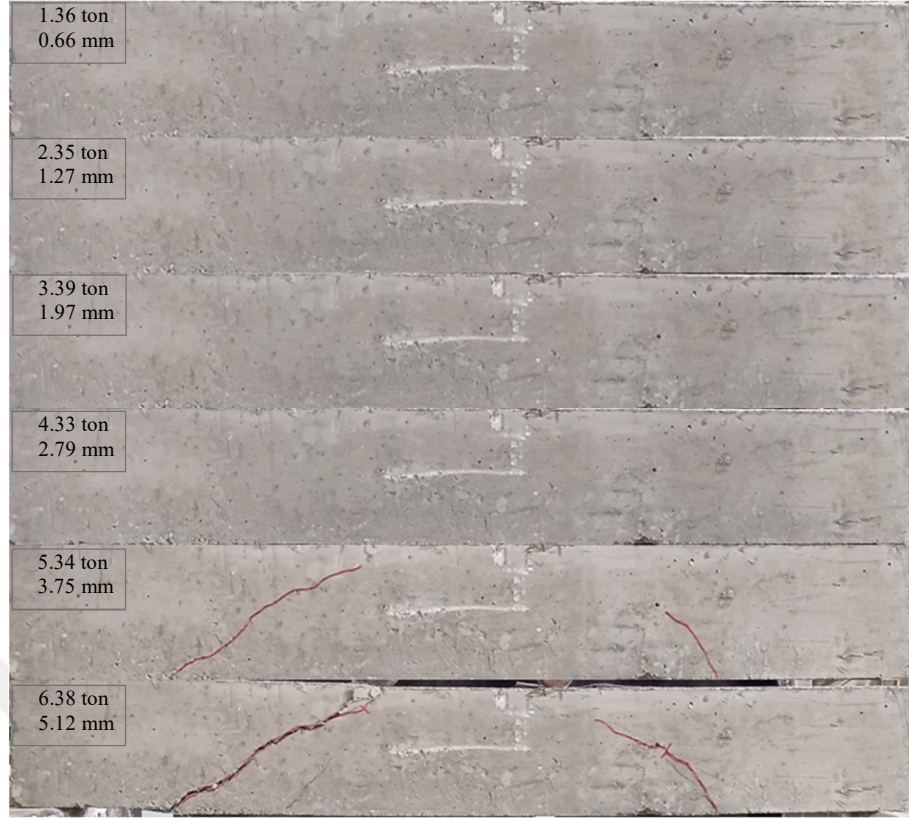


Şekil 4.20. B10₀ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



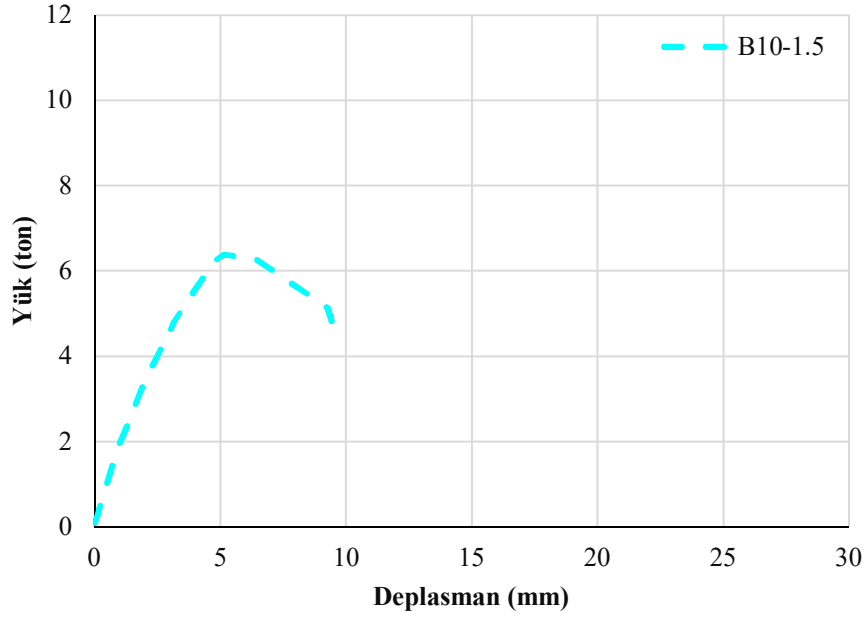
Şekil 4.21. B10₀ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

B10_{1.5} numunesi 10 cm etriye aralığına ve 1.5 cm kanca boyunca sahip deney numunesidir. B10_{1.5} kiriş numunesinde, uygulanan yük 5.34 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 3.75 mm olarak kaydedilmiştir. Deney boyunca kirişte belirgin bir düzeyde eğilme çatlakları meydana gelmemiştir. Kiriş numunesi, 6.38 tonluk yük ve 5.12 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklıkta eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.22’de B10_{1.5} kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.22. $B10_{1.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.23'te, $B10_{1.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B10_{1.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.24'te yer almaktadır.

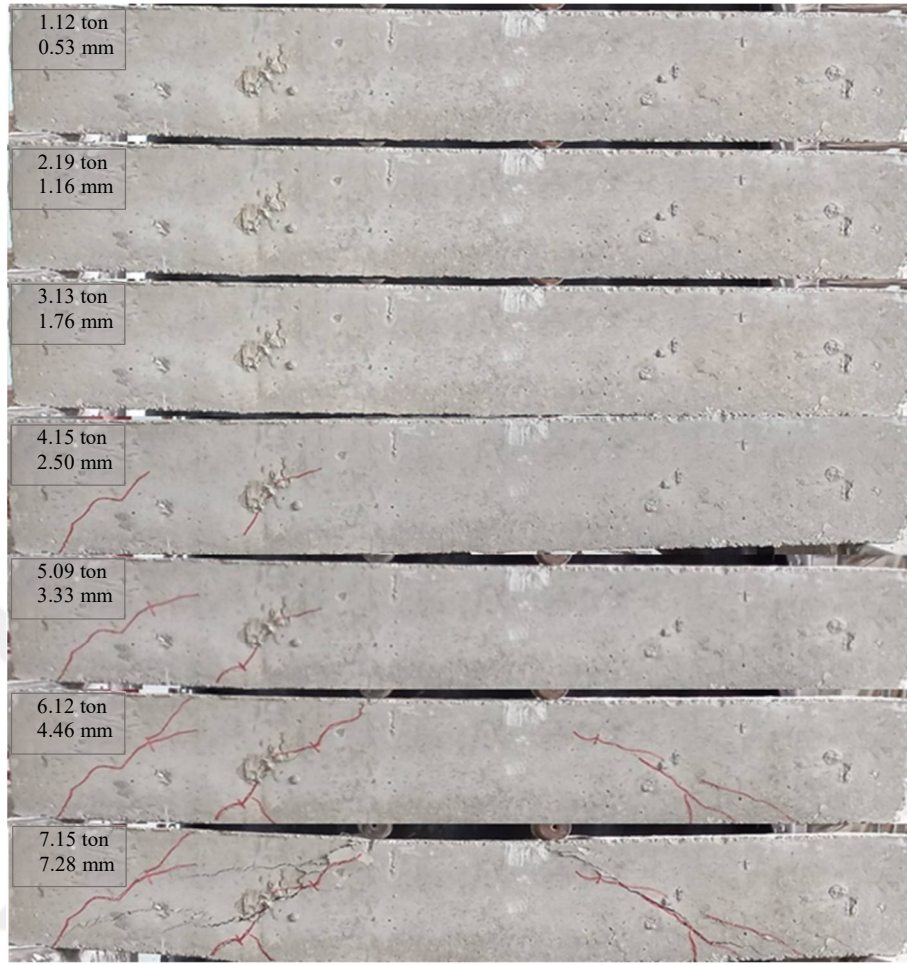


Şekil 4.23. $B10_{1.5}$ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



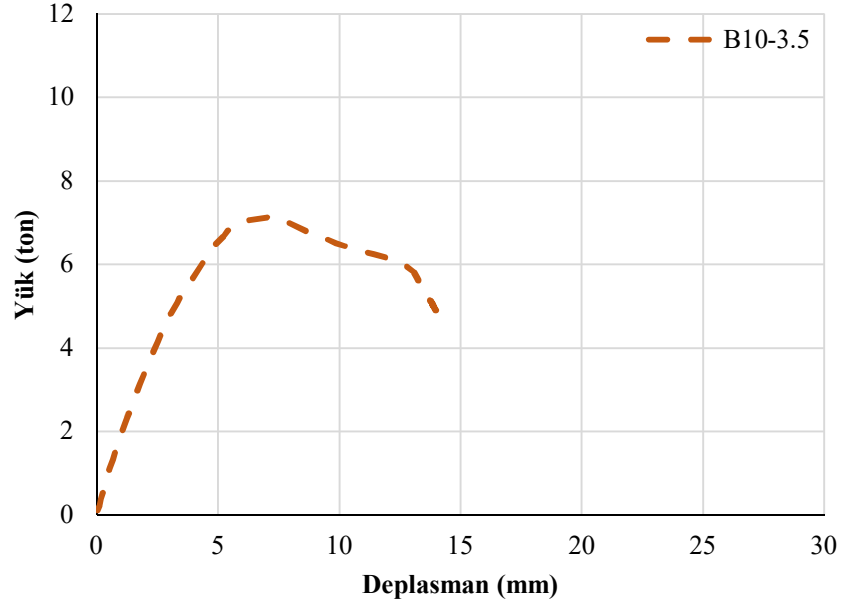
Şekil 4.24. $B10_{1.5}$ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

$B10_{3.5}$ numunesi 10 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyunca sahip deney numunesidir. $B10_{3.5}$ kiriş numunesinde, uygulanan yük 4.1 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında Şekil 4.25'te kırmızı renk ile belirtilen ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda düşey deplasman değeri 2.50 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş üzerindeki düşey yük arttıkça sağ ve sol kesme açıklığında meydana gelen eğik çekme çatlaklarının sayısında ve çatlakların genişliğinde artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, eğik çekme çatlakları mesnet noktasından yükleme noktasına doğru ilerlerken, basınç bölgesinin çatlak yayılımına karşı direnç göstermesi nedeniyle çatlaklarda dallanmalar meydana gelmiştir. Nihayet kiriş numunesi, 7.15 tonluk düşey yük ve 7.28 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.25'te $B10_{3.5}$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

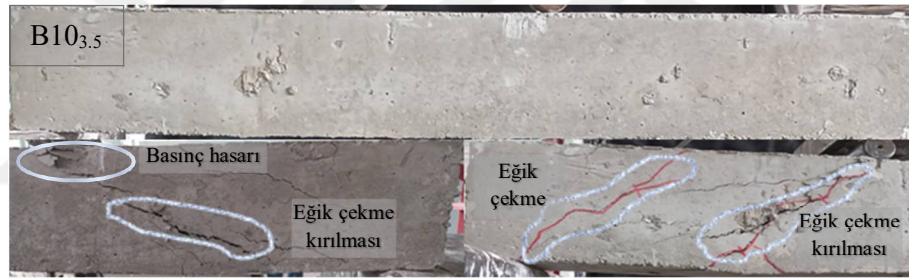


Şekil 4.25. $B10_{3.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.26'da $B10_{3.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B10_{3.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.27'de yer almaktadır.

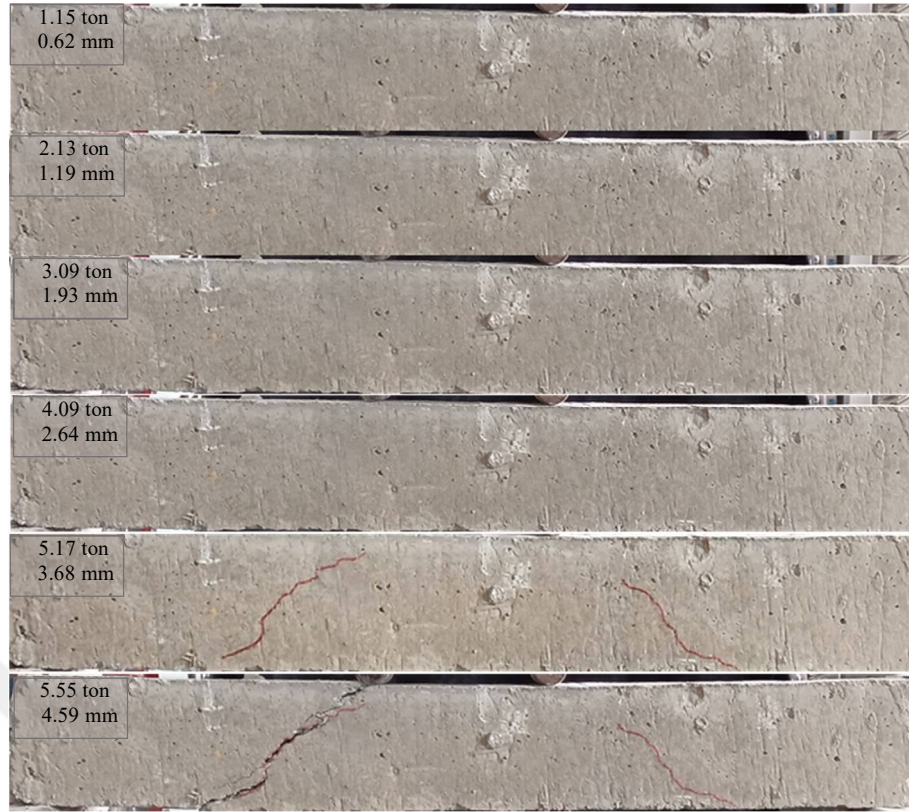


Şekil 4.26. $B10_{3,5}$ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



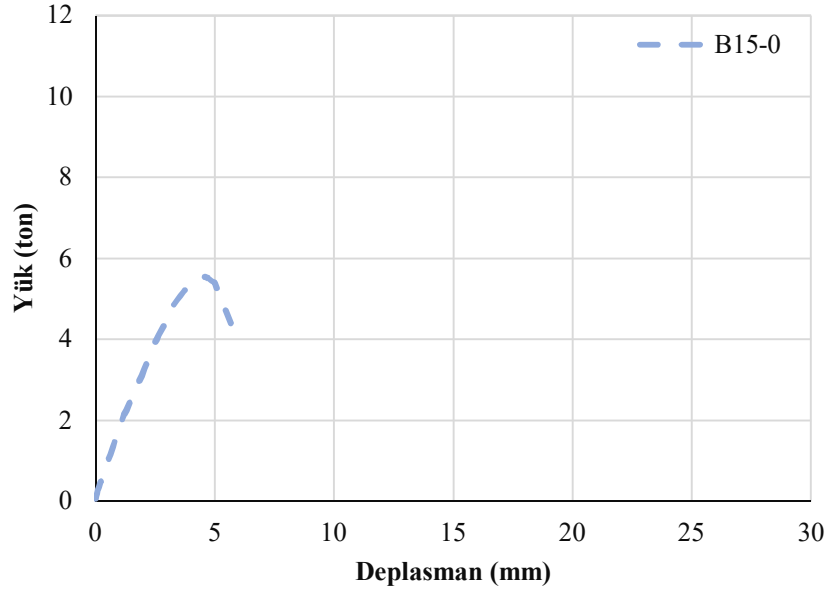
Şekil 4.27. $B10_{3,5}$ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

$B15_0$ numunesi 15 cm etriye aralığına ve 0 cm kanca boyuna sahip yani I etriye yerleşimine sahip deney numunesidir. $B15_0$ kiriş numunesinde, uygulanan düşey yük 5.17 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ ve sol kesme bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 3.68 mm olarak kaydedilmiştir. Yükleme protokolü süresince kirişte belirgin düzeyde eğilme çatlakları gözlenmemiştir. Kiriş numunesi, 5.55 tonluk yük ve 4.59 mm deplasman değerine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında daha önce meydana gelen eğik çekme çatlaklarının genişlemesi ve basınç bölgesini aşarak kiriş üst noktasına ulaşmasıyla eğik çekme kırılması gerçekleşmiştir. Şekil 4.28’de $B15_0$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

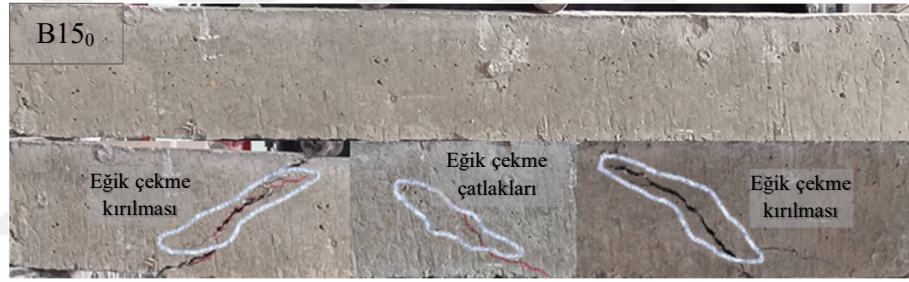


Şekil 4.28. $B15_0$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.29'da $B15_0$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B15_0$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.30'da yer almaktadır.

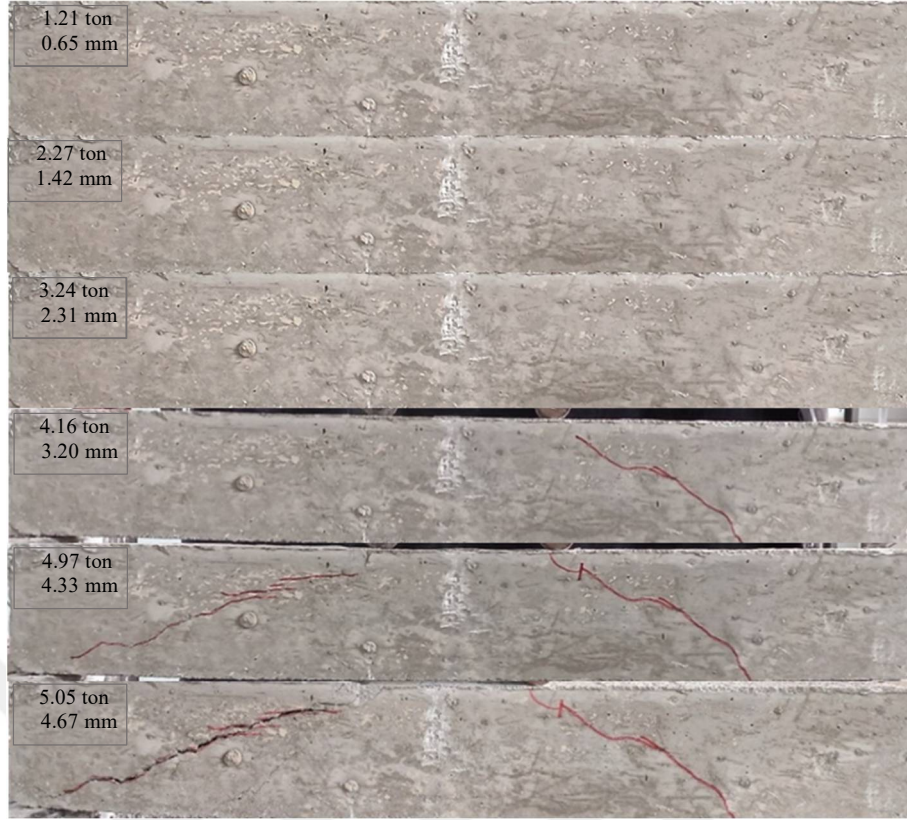


Şekil 4.29. $B15_0$ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



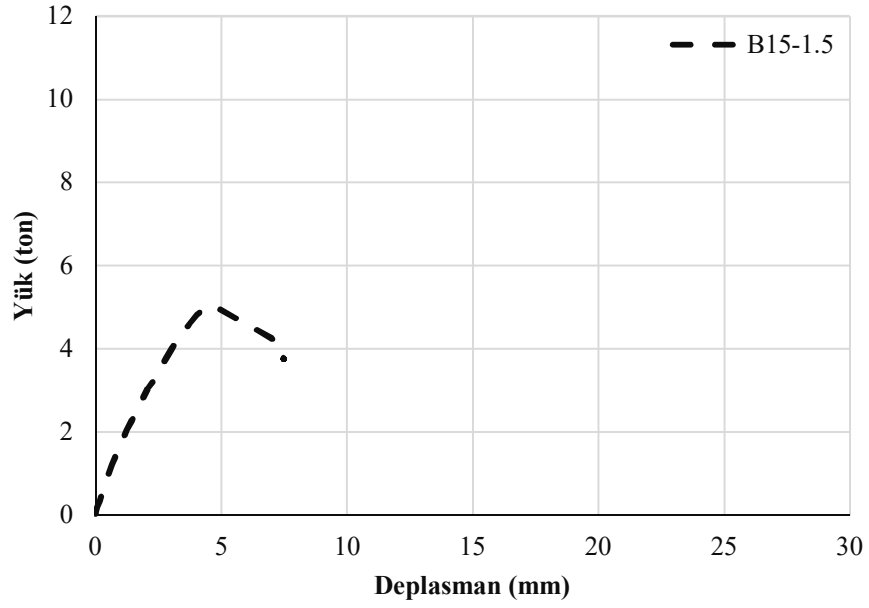
Şekil 4.30. $B15_0$ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

$B15_{1.5}$ numunesi 15 cm etriye aralığına ve 1.5 cm kanca boyuna sahip deney numunesini temsil etmektedir. $B15_{1.5}$ kiriş numunesinde, uygulanan düşey yük 4.16 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sağ kesme bölgesinde yaklaşık 45° açıyla oluşan ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda düşey deplasman değeri 3.20 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 5.05 tonluk düşey yük ve 4.67 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklığında gözlenen eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Benzer şekilde kirişte belirgin bir düzeyde eğilme hasarı gözlenmeden ani ve gevrek bir şekilde meydana gelen kırılmayla deney sonlanmıştır. Şekil 4.31’de $B15_{1.5}$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.31. *B15_{1.5}* kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.32’de *B15_{1.5}* referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. *B15_{1.5}* numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.33’te yer almaktadır.

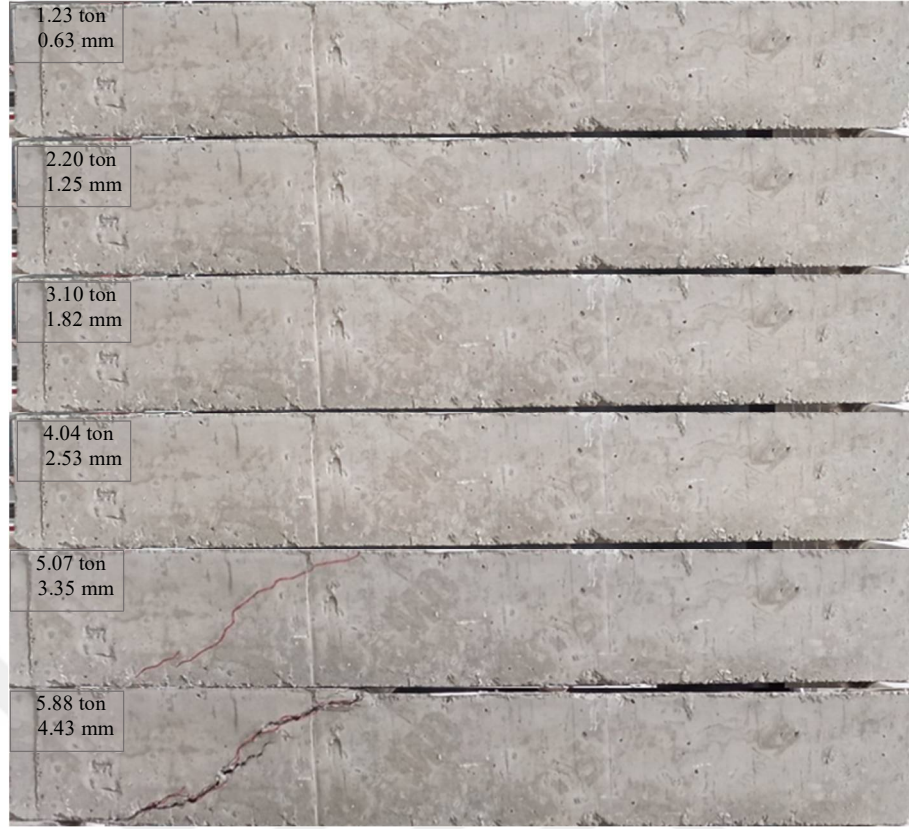


Şekil 4.32. $B15_{1.5}$ kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



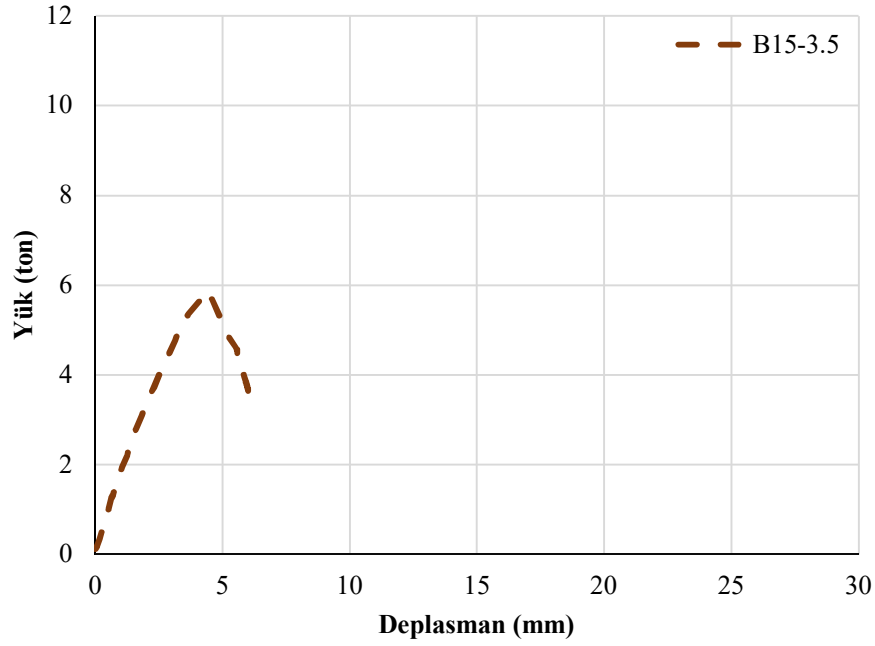
Şekil 4.33. $B15_{1.5}$ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Bu grubun son deney numunesi olan $B15_{3.5}$ numunesi, 15 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyuna sahip deney numunesidir. $B15_{3.5}$ kiriş numunesinde, uygulanan düşey yük 5.07 ton seviyesine ulaştığında, kirişin sol kesme bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 3.35 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 5.88 tonluk düşey yük ve 4.43 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.34’de $B15_{3.5}$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.34. $B15_{3.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.35'te $B15_{3.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $B15_{3.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.36'da yer almaktadır.



Şekil 4.35. B15_{3.5} kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği

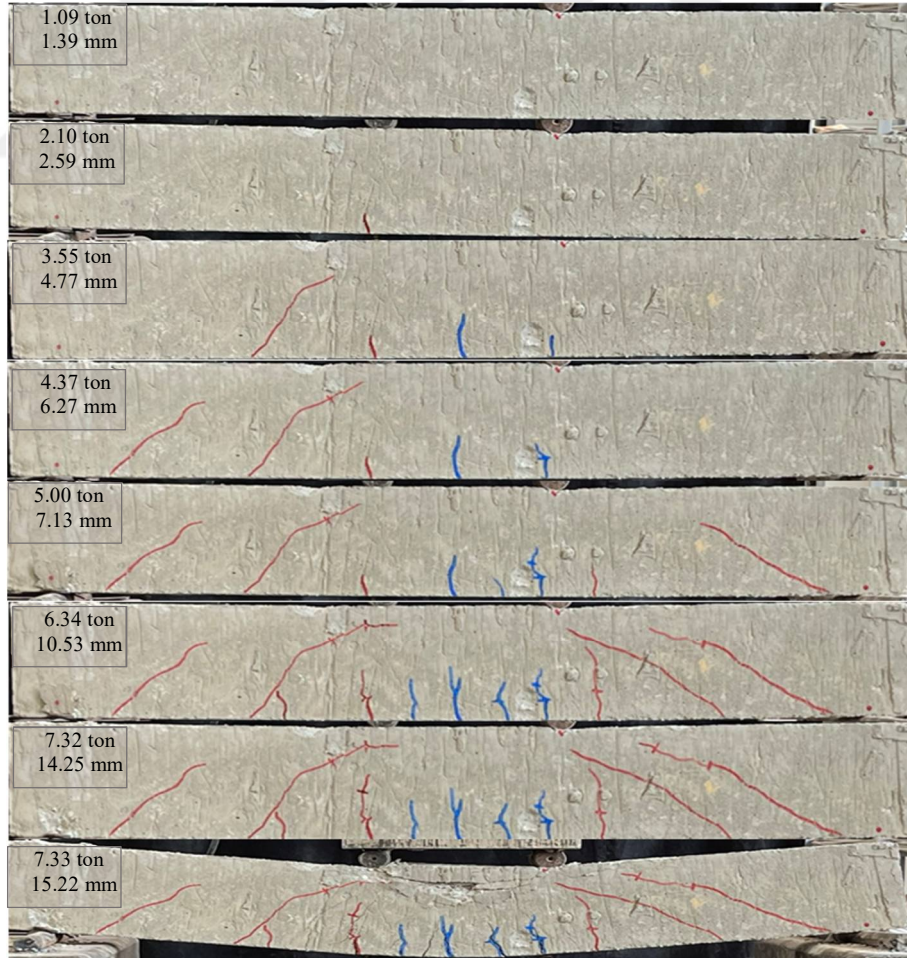


Şekil 4.36. B15_{3.5} kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.1.2. 2. Grup Deneyleri

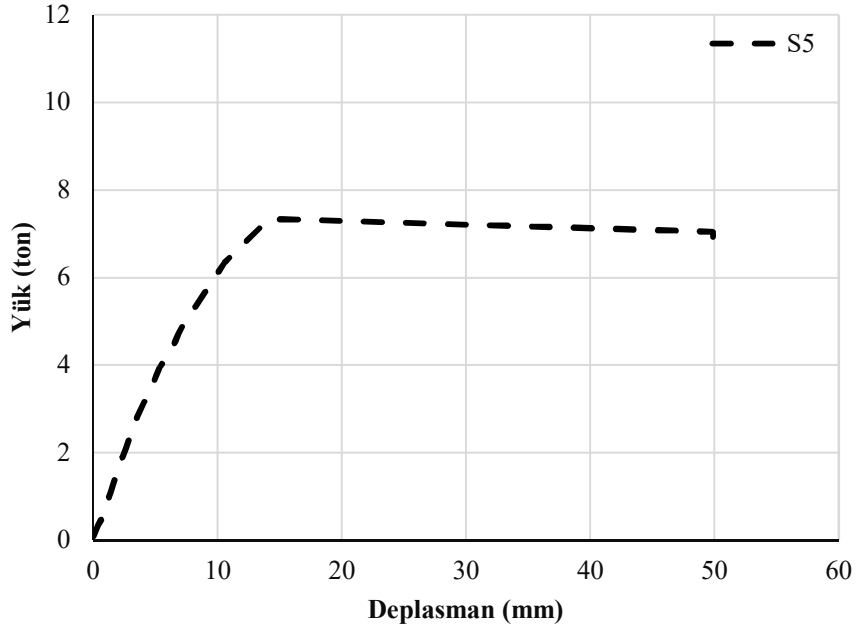
Tez çalışmasının ikinci grup deneylerinde benzer geometriye sahip 6 adet kiriş numunesi üretilmiştir. 3 tanesi referans yani tam sargılı ve yönetmeliklere uygun etriyeli, geriye kalanlar ise 3.5 cm kanca boyuna sahip 5 cm (S5), 10 cm (S10), ve 15 cm (S15) etriye aralıklarına sahip deney numuneleridir. İlk grup deneylerinden farklı olarak ikinci grup deney numunelerinde çekme donatısı 2Ø12 olarak seçilmiştir. Yani kirişin eğilme kapasitesi düşürülmüştür. Bu sayede ilk grup deneylerinde tam sargılı etriye davranışına en yakın olan 3.5 cm kancalı etriyelerin daha düşük çekme donatısı oranına sahip kirişlerdeki davranışı araştırılmak istenmiştir. Bu grupta üretilen kirişlerin diğer bütün özellikleri ilk grup deneyleriyle tamamen aynıdır.

Çalışma kapsamında ilk olarak, 5 cm etriye aralıklarıyla S5 tam sargılı referans numunesi test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, uygulanan düşey yük 2.10 ton ve düşey deplasman 2.59 mm seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesine yakın yerde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. İlk eğilme çatlakları ise 3.55 tonluk düşey yük uygulandığında oluşmuştur. Eğilme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 4.77 mm olarak kaydedilmiştir. Yükün artmasıyla kirişin eğilme ve kesme bölgesinde çatlaklar artmaya devam etmiştir. Özellikle eğilme bölgesinde gözlenen çatlakların artmasının nedeni, kirişin çekme bölgesindeki boyuna donatının 2Ø14'den 2Ø12'ye düşürülmesidir. Belli bir yük seviyesine kadar kirişin kesme ve eğilme bölgelerinde çatlaklar yoğunlaşmıştır. Nihayet kiriş numunesi, 7.33 tonluk düşey yük ve 15.22 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, eğilme hasarlarının yoğunlaşması ve beton basınç bölgesinin ezilmesi sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.36 incelendiğinde maksimum yük seviyesinde kirişte belirgin bir eğilmenin olduğu da görülmektedir. Şekil 4.37'de S5 referans kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

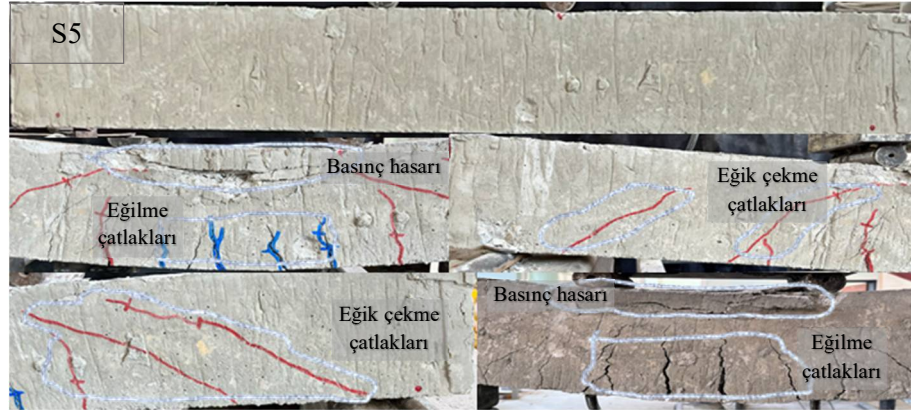


Şekil 4.37. S5 kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.38’de *S5* referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. *S5* numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.39’da yer almaktadır.



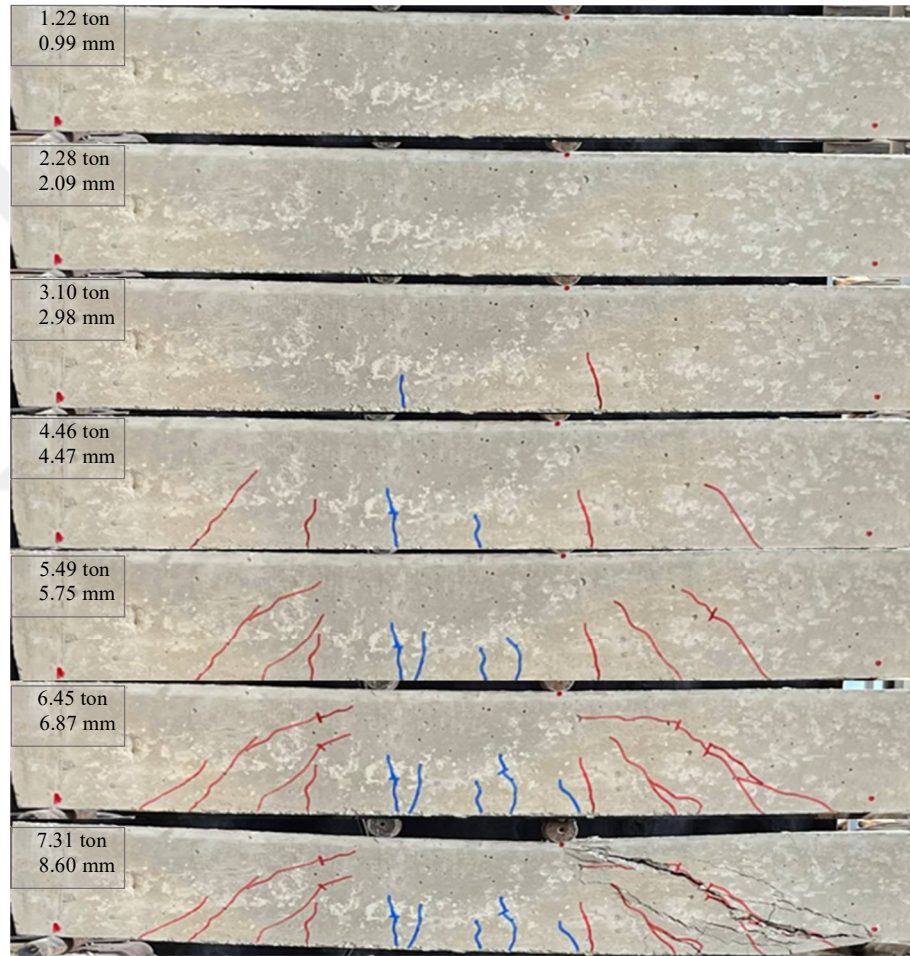
Şekil 4.38. *S5* kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.39. *S5* kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

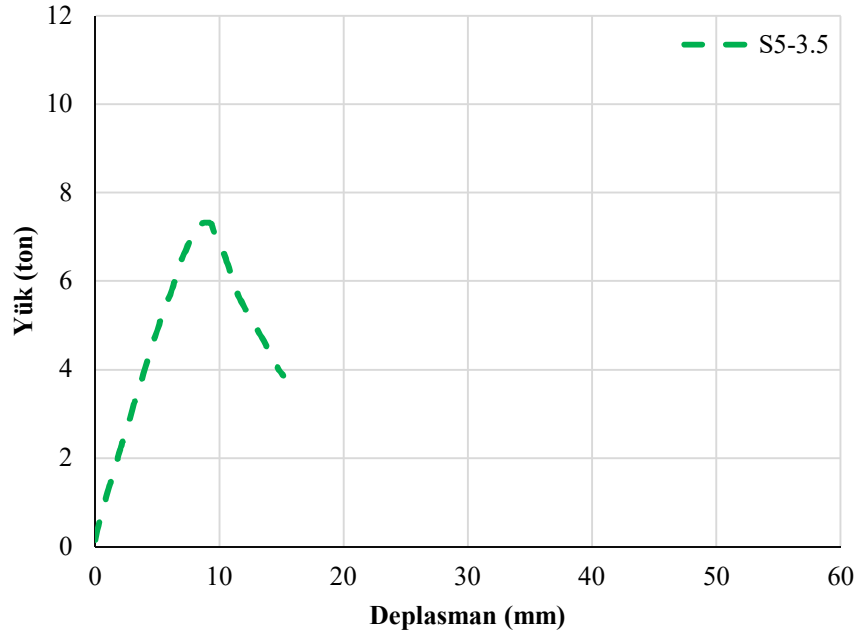
S5_{3.5} numunesi 5 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyuna sahip deney numunesidir. *S5_{3.5}* kiriş numunesinde, uygulanan yük 3.1 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesinde ilk eğilme çatlakları ve orta bölgeye yakın bölgede ilk eğik çekme çatlakları gözlemlenmiştir. Çatlakların meydana geldiği anda deplasman değeri 2.98 mm olarak kaydedilmiştir. Kirişe uygulanan düşey yükün artmasıyla eğilme ve eğik çekme

çatlaklarında artış gözlenmiştir. Nihayet kiriş numunesi, 7.31 tonluk düşey yük ve 8.60 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında gözlenen eğik çekme çatlaklarının genişlemesi ve kiriş üst noktasına ulaşması sonucu gevrek bir şekilde göçme gerçekleşmiştir. Görüldüğü üzere tam sargılı etriye ($S5$) ile benzer yük taşıma kapasitesine ulaşılmış ($S5_{3.5}$) olsa da sargılama yetersizliği kirişin kırılma davranışını değiştirmiştir. Ayrıca maksimum yük değerine karşılık gelen deplasman değerinde de azalma gözlenmiştir. Şekil 4.40'ta $S5_{3.5}$ kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

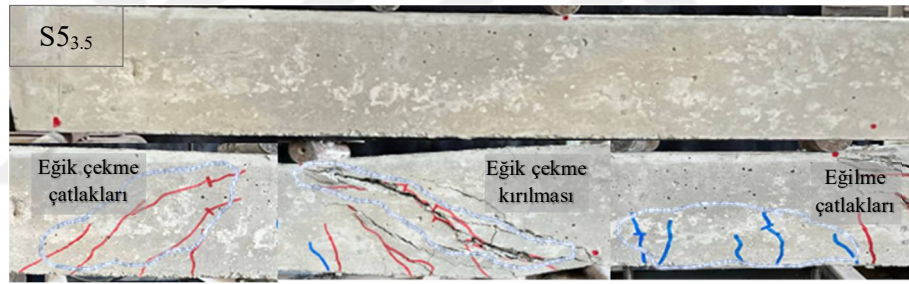


Şekil 4.40. $S5_{3.5}$ kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Şekil 4.41'de $S5_{3.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $S5_{3.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.42'de yer almaktadır.

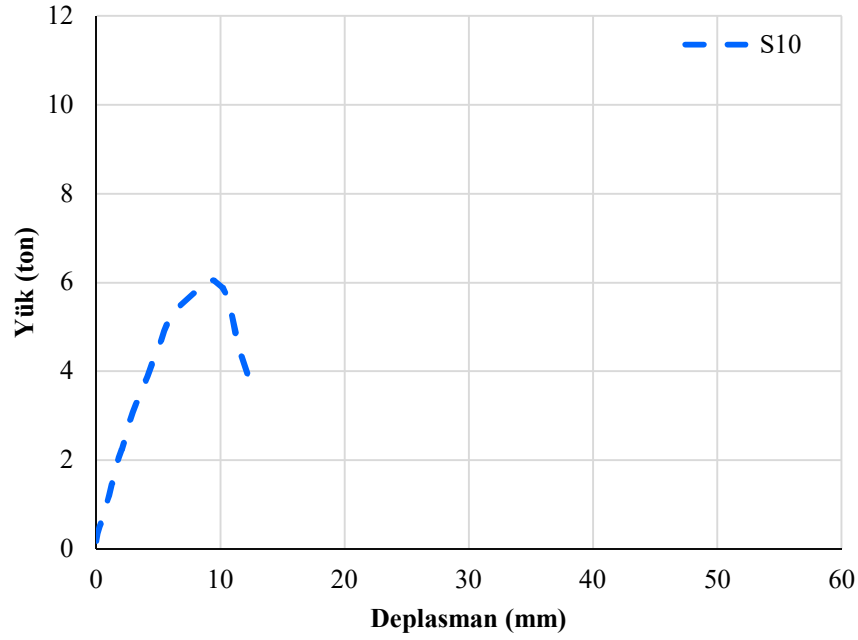


Şekil 4.41. S5_{3,5} kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.42. S5_{3,5} kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

S10 tam sargılı 10 cm etriye aralığına sahip referans numunesi daha sonra test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, uygulanan yük 2.05 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesinde mavi renk ile gösterilen ilk eğilme çatlakları gözlenmiştir (Şekil 4.42). İlk eğik çekme çatlakları ise 3.07 tonluk yük seviyesine ulaştığında oluşmuştur. Eğilme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 1.80 mm olarak kaydedilmiş, eğik çekme çatlaklarının oluştuğu andaki deplasman değeri ise 2.93 mm olarak ölçülmüştür. Kirişe uygulanan düşey yükün artmasıyla kiriş üzerinde eğik çekme ve eğilme çatlakları artmaya devam etmiştir. Ancak artan yüklerle beraber eğik çekme çatlakları daha fazla gözlenmiştir. Kiriş numunesi, 6.05 tonluk düşey yük ve 9.25 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, kirişin sağ kesme açıklığında gözlenen eğik çekme çatlaklarının genişlemesi ve kiriş basınç bölgesine ulaşmasıyla eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Her ne kadar kirişe tam sargılı etriye uygulanmış olsa da etriye aralığının

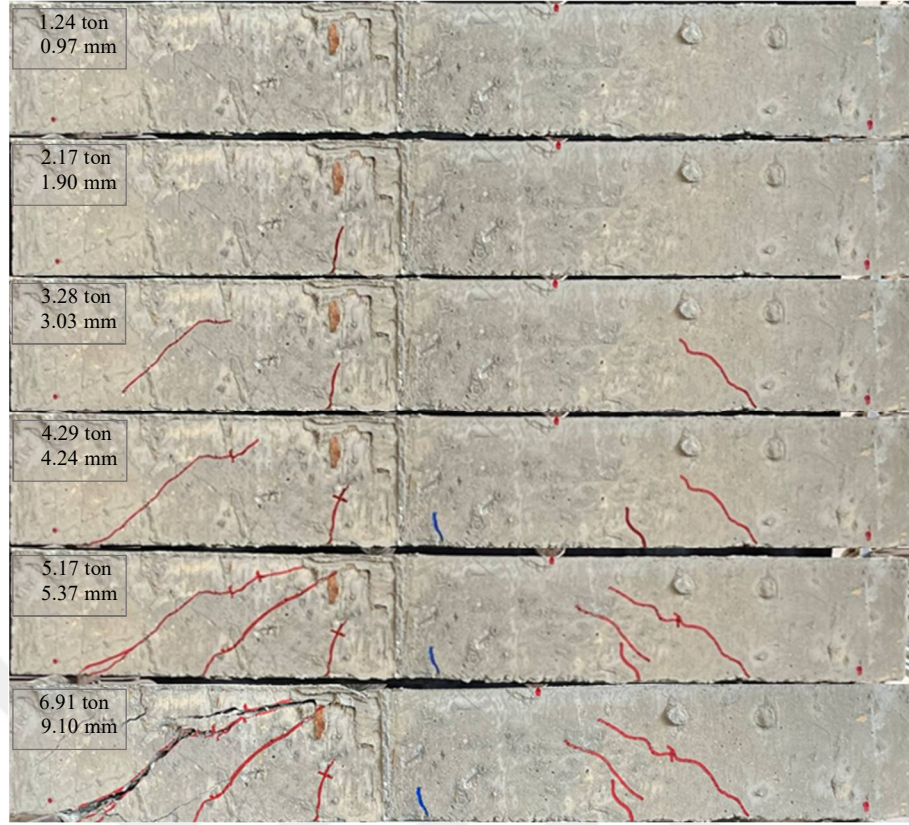


Şekil 4.44. S10 kiriş Numunesine Ait Yük-Deplasman Grafiği



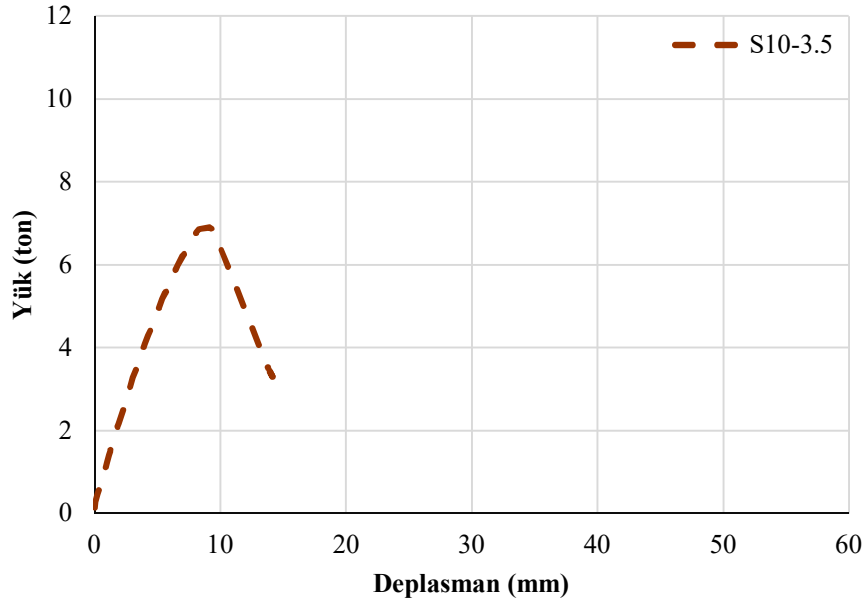
Şekil 4.45. S10 kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

S10_{3.5} numunesi 10 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyunca sahip deney numunesini temsil etmektedir. S10_{3.5} kiriş numunesinde, uygulanan yük 2.17 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesine yakın bölgede ilk eğik çekme çatlağı gözlenmiştir. Çatlağın meydana geldiği anda deplasman değeri 1.90 mm olarak kaydedilmiştir. Düşey yükün artmasıyla kılcal düzeyde meydana gelen eğilme çatlağında uzama gözlenmezken eğik çekme çatlaklarında uzama, dallanma ve sayısında artışlar gözlenmiştir. Nihayet kiriş numunesi, 6.91 tonluk yük ve 9.10 mm deplasman değerine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.46'da S10_{3.5} kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.46. $S10_{3.5}$ kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Şekil 4.47’de $S10_{3.5}$ referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. $S10_{3.5}$ numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.48’de yer almaktadır.

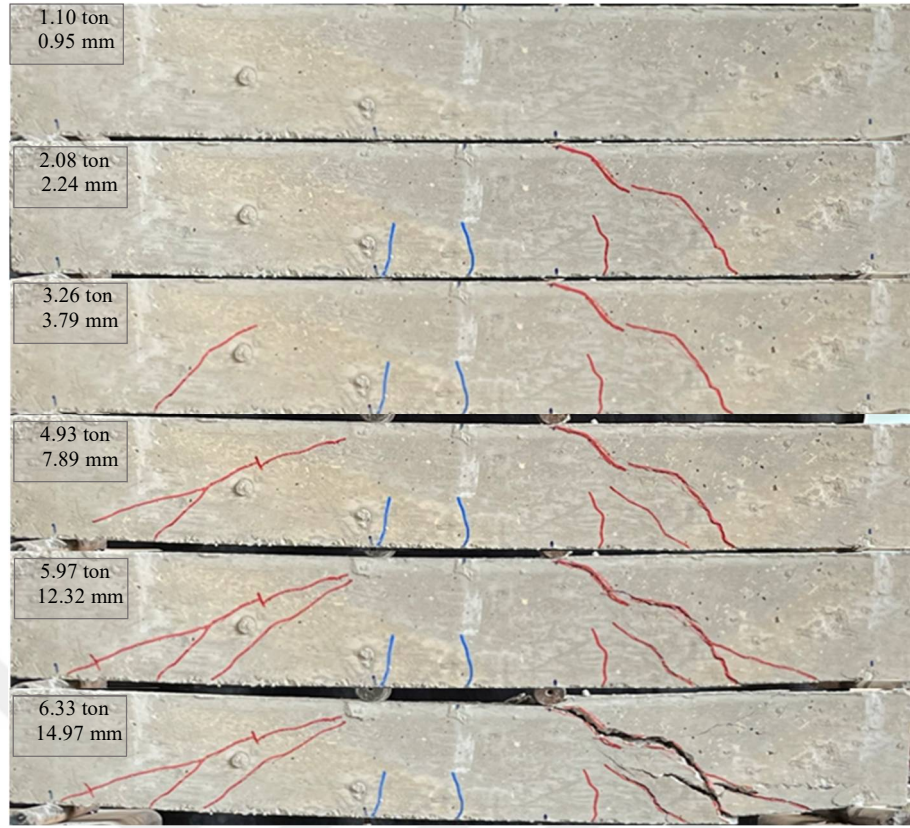


Şekil 4.47. S10_{3.5} kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



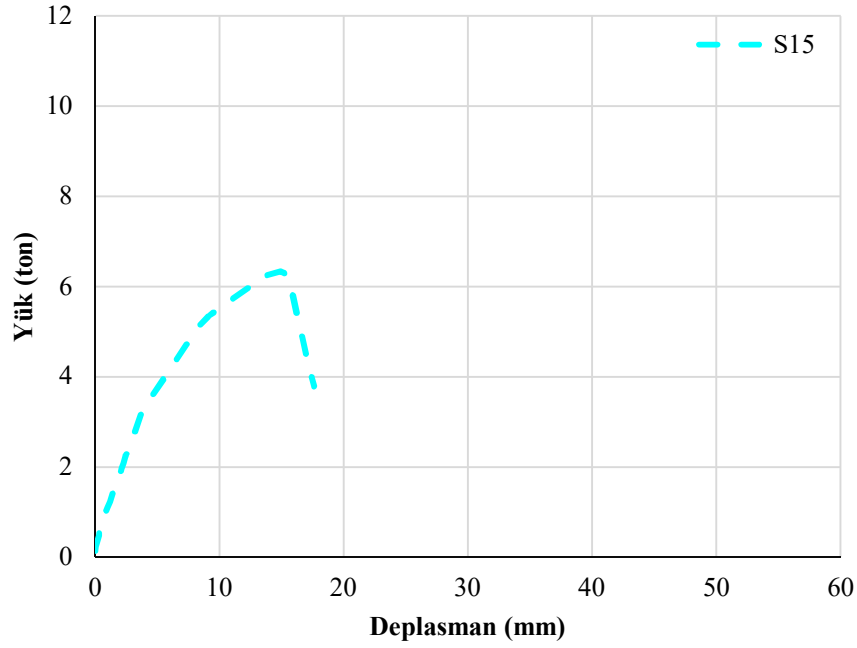
Şekil 4.48. S10_{3.5} kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Son olarak S15 tam sargılı 15 cm etriye aralığına sahip referans numunesi test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, uygulanan yük 2.08 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesinde ilk eğilme çatlakları ve kirişin sağ bölgesinde ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Eğilme ve eğik çekme çatlaklarının meydana geldiği anda deplasman değeri 2.24 mm olarak ölçülmüştür. Artan düşey yüklerle beraber eğilme çatlaklarında uzama gözlenmezken eğik çekme çatlaklarında artma, dallanma ve uzama gözlenmiştir. Nihayet kiriş numunesi, 6.33 tonluk yük ve 14.97 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında gözlenen çatlakların genişlemesi ile kirişte eğik çekme kırılması sonucu göçme gerçekleşmiştir. Etriye aralığının fazla olması kesme kapasitesinin eğilme kapasitesinden az olmasına yol açtığından nihai hasar olarak kesme kırılması (eğik çekme) gözlenmiştir. Şekil 4.49'da S15 referans kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

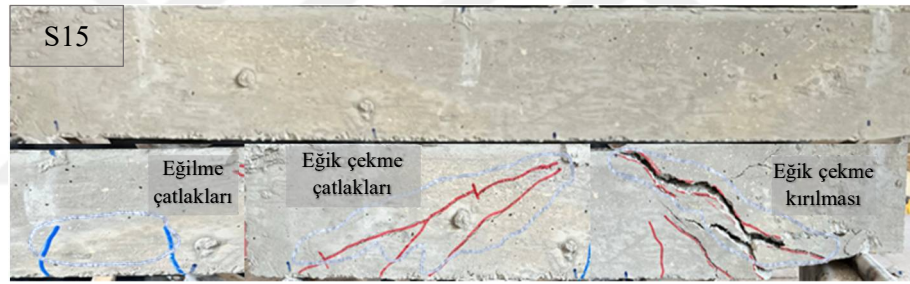


Şekil 4.49. S15 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Şekil 4.50’de S15 referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. S15 numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.51’de yer almaktadır.



Şekil 4.50. S15 referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



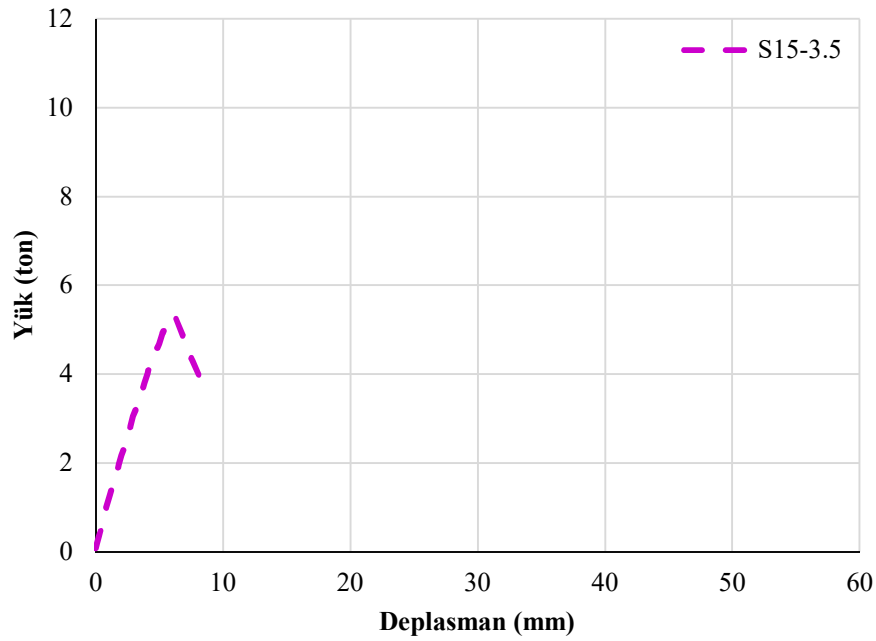
Şekil 4.51. S15 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

S15_{3.5} numunesi 15 cm etriye aralığına ve 3.5 cm kanca boyunca sahip deney numunesidir. S15_{3.5} kiriş numunesinde, uygulanan yük 2.17 ton seviyesine ulaştığında, kirişin orta bölgesinde ilk eğilme ve orta bölgeye yakın bölgede ilk eğik çekme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlakların meydana geldiği anda deplasman değeri 2.02 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesi, 5.33 tonluk yük ve 6.17 mm deplasman değerine ulaştığında, kirişin sağ kesme açıklığında meydana gelen eğik çekme çatlaklarının genişlemesiyle kesme hasarı (eğik çekme kırılması) gözlenerek göçme gerçekleşmiştir. Şekil 4.52’de S15_{3.5} kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

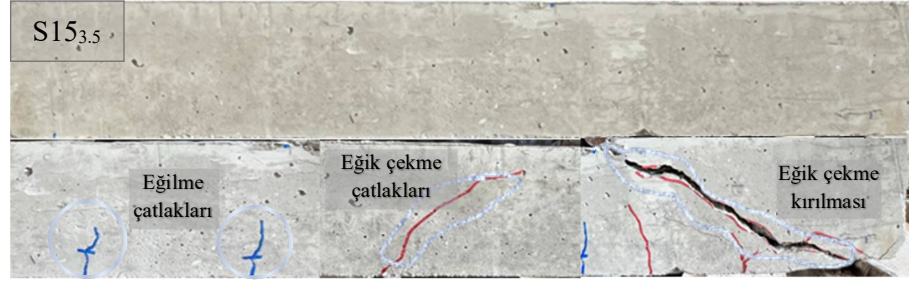


Şekil 4.52. S15_{3.5} kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

Şekil 4.53’de S15_{3.5} referans kiriş numunesine ait yük-deplasman ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından, kiriş üzerinde meydana gelen hasarlar ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. S15_{3.5} numunesinde gözlemlenen hasarlara ilişkin detaylı görseller ise Şekil 4.54’te yer almaktadır.



Şekil 4.53. S15_{3.5} Kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.54. S15_{3.5} Kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Deneysel çalışma, farklı etriye aralıklarına sahip tam sargılı, *I* ve *U* şeklindeki kesme donatılarının kesme kapasitesine etkisini incelemek amacıyla iki grup halinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, birinci grup deneylerde 12, ikinci grup deneylerde ise 6 adet kiriş numunesi olmak üzere toplam 18 adet kiriş düşey yük altında test edilmiştir. Numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve yükleme altındaki deplasmanları, bilgisayar destekli 8 kanallı veri toplama cihazı ile kaydedilmiş ve eş zamanlı olarak yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Deney sonuçları, değişken parametreler olarak belirlenen etriye aralığı ve kanca boyu dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, referans numunesine en yakın performansın 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyeler tarafından sağlandığı görülmüştür. Bu bulgu doğrultusunda, farklı etriye aralıkları (5 cm, 10 cm ve 15 cm) için 3 adet referans (*S5*, *S10* ve *S15*) ve 3 adet 3.5 cm (*S5_{3.5}*, *S10_{3.5}*, *S15_{3.5}*) kanca boyuna sahip kiriş numunelerinden oluşan ikinci grup deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen veriler, özet olarak Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Bu tablodaki simgeler sırasıyla δ_y ; akma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_{max} ; maksimum yük (P_{max}) seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_u ; kopma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), μ ; süneklik oranını (δ_u / δ_y), S_y ; nominal akma noktasındaki rijitliği (kN/mm), P_{max} ; maksimum yük değerini (kN) temsil etmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da tüm deney kirişlerinin yük-deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kirişlerde meydana gelen kırılma türleri için tablolarda kısaltmalar kullanılmış ve tablonun altında bu kısaltmaların açıklamaları verilmiştir.

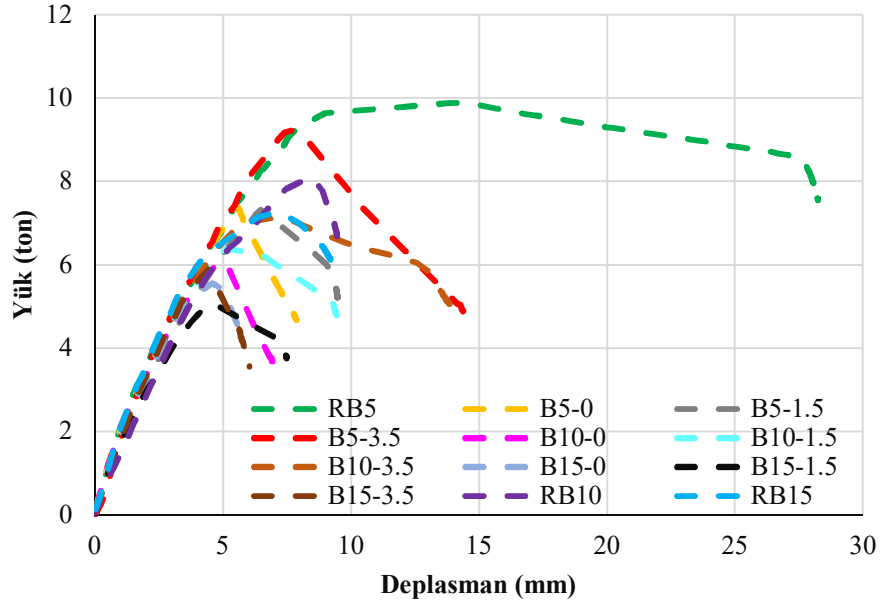
Çizelge 4.1. Deney elemanlarının göçme ve akma anındaki yer değiştirme değerleri

Kiriş Numunesi	P_{max} (ton)	$0.85P_{max}$ (ton)	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ (mm/mm)	S_y (ton/mm)
RB5	9.88	8.39	6.53	27.90	4.28	1.28
B5₀	7.38	6.28	4.30	6.57	1.50	1.46
B5_{1.5}	7.32	6.23	5.00	8.52	1.70	1.25
B5_{3.5}	9.22	7.34	5.34	10.27	1.92	1.37
RB10	8.10	6.88	6.12	9.42	1.54	1.12
B10₀	6.07	5.16	3.62	5.70	1.57	1.42
B10_{1.5}	6.38	5.42	3.75	5.12	1.36	1.44
B10_{3.5}	7.15	6.07	4.46	11.97	2.68	1.36
RB15	7.25	6.16	4.30	9.13	2.12	1.44
B15₀	5.55	4.67	3.11	5.66	1.82	1.50
B15_{1.5}	5.05	4.29	3.40	7.10	2.08	1.26
B15_{3.5}	5.88	4.99	3.35	5.36	1.60	1.47
S5	7.33	6.23	10.52	35.00	3.32	0.59
S5_{3.5}	7.31	6.21	6.60	10.5	1.51	0.94
S10	6.05	5.14	5.74	10.5	1.83	0.89
S10_{3.5}	6.91	5.86	6.34	10.2	1.61	0.92
S15	6.33	5.38	9.12	15.8	1.73	0.59
S15_{3.5}	5.33	4.53	4.80	6.50	1.35	0.94

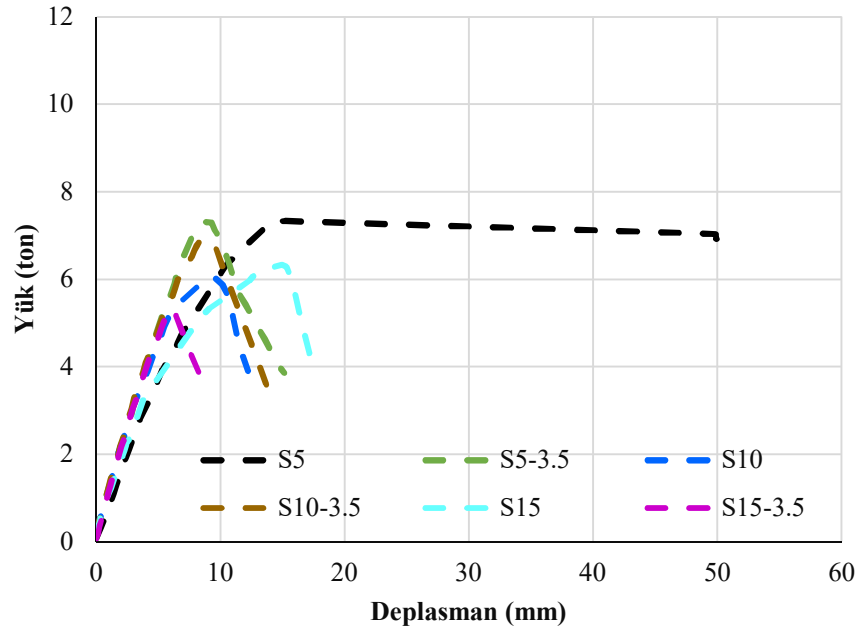
Çizelge 4.2. Deney sonuçları

Kirişler	İlk çatlak yükü (ton)	İlk çatlak deplasmanı (mm)	Max. yük (ton)	Max. Yük değerindeki deplasman (mm)	Kırılma Türü
RB5	4.14	2.45	9.88	14.21	EÇ
B5₀	6.51	4.75	7.38	5.58	EÇ
B5_{1.5}	4.13	2.82	7.32	6.48	EÇ
B5_{3.5}	5.10	3.13	9.22	7.75	EÇ
RB10	6.18	4.96	8.10	8.46	EÇ
B10₀	4.35	2.82	6.07	5.11	EÇ
B10_{1.5}	5.34	3.75	6.38	5.12	EÇ
B10_{3.5}	4.15	2.50	7.15	7.28	EÇ
RB15	5.11	3.13	7.25	7.25	EÇ
B15₀	5.17	3.68	5.55	4.59	EÇ
B15_{1.5}	4.16	3.20	5.05	4.67	EÇ
B15_{3.5}	5.07	3.35	5.88	4.43	EÇ
S5	2.10	2.59	7.33	15.22	E
S5_{3.5}	3.10	2.98	7.31	8.60	EÇ
S10	2.05	1.80	6.05	9.25	EÇ
S10_{3.5}	2.17	1.90	6.90	9.10	EÇ
S15	2.08	2.24	6.33	14.97	EÇ
S15_{3.5}	2.17	2.02	5.33	6.17	EÇ

*Burada EÇ Eğik çekme kırılmasını ve E eğilme kırılmasını temsil etmektedir.



Şekil 4.55. 1. Grup deney kirişlerinin yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.56. 2. Grup deney kirişlerinin yük-deplasman grafikleri

Bu çalışmanın temel amacı, tam sargılı, I ve U şeklindeki kesme donatılarının kesme kapasitesine katkısını incelemek ve etriyeye alternatif bir donatı tasarımı olup olmadığını belirlemektir. Bu doğrultuda, deney kirişlerinde değişen kanca boyuna bağlı olarak deney sonuçları karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında

gerçekleştirilen karşılaştırma ve analizler, deney sonuçlarının daha anlaşılır olmasını sağlamak amacıyla aşağıdaki alt başlıklar altında düzenlenmiştir:

- ✓ Maksimum yük kapasitesinin değerlendirilmesi
- ✓ Göçme tiplerinin değerlendirilmesi
- ✓ Rijitlik açısından değerlendirme
- ✓ Süneklik ve eğilme kapasitesi açısından değerlendirme

4.2.1. Maksimum yük kapasitesinin değerlendirilmesi

1. grup deney sonuçları incelendiğinde, referans kiriş numuneleri *RB5*, *RB10* ve *RB15* sırasıyla 9.88 ton, 8.10 ton ve 7.25 ton yük seviyelerine ulaşmış ve göçme bu yük seviyelerinde gerçekleşmiştir. Etriye aralığının sıklaştırılması, kanca boyundan bağımsız olarak (etriye kancası bulunmayan numuneler dahil) tüm kirişlerde kesme kapasitesinin artmasına ve dolayısıyla maksimum yük taşıma kapasitesinin artmasına katkı sağlamıştır. *B15* numunesi gibi daha seyrek etriyeli kirişlerin, asal çekme gerilmelerini karşılamada daha yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Daha geniş etriye aralığına sahip numunelerde eğik çatlakların etriyelere denk gelmemesi, kirişin kesme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu durum, eğik çekme gerilmelerinin yeterince karşılanamaması ve bu sayede kesme kapasitesinde düşüş yaşanmasına yol açmaktadır.

Yapılan çalışmada, kanca boyunun da kirişlerin kesme kapasitesini etkileyen önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Özellikle, kanca boyu 3.5 cm olan numuneler, daha kısa kanca boyuna sahip olanlara göre daha yüksek kesme kapasitesine ulaşmıştır. Elde edilen verilerden, farklı kanca boylarına sahip numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, aynı özelliklere sahip tam sargılı etriyeli referans numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmış ve kirişlerin referans kirişlere ne kadar yakınlığı hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda, etriye aralığı 5 cm olan kirişlerde, sırasıyla 0 cm kanca boyu numuneler %77, 1.5 cm kanca boyu numuneler %76 ve 3.5 cm kanca boyu numuneler %96 oranında; etriye aralığı 10 cm olan kirişlerde, sırasıyla 0 cm kanca boyu numuneler %75, 1.5 cm kanca boyu numuneler %79 ve 3.5 cm kanca boyu numuneler %89 oranında; etriye aralığı 15 cm olan kirişlerde ise, sırasıyla 0 cm kanca boyu numuneler %76, 1.5 cm kanca boyu numuneler %70 ve 3.5 cm kanca boyu numuneler %82 oranında referans numunenin yük taşıma kapasitesine yaklaşmaktadır. 3.5 cm kanca boyu etriyeye sahip kiriş numunelerinde, tam sargılı referans numunelerine oldukça yakın yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Kanca boyunun artması,

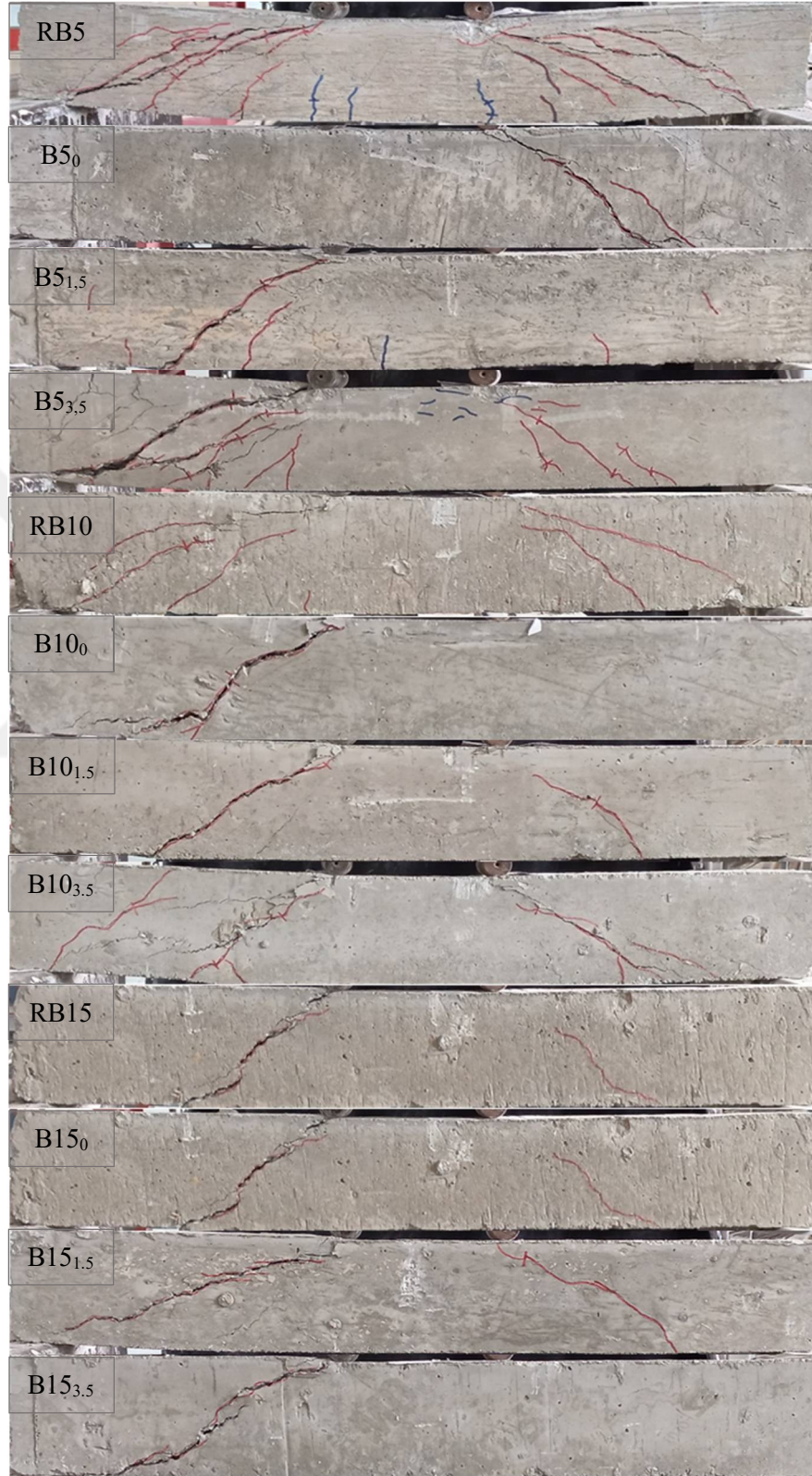
etrijelerin betona daha iyi tutunmasını sağlayarak çekme gerilmelerine karşı daha yüksek direnç oluşturmaya katkıda bulunmuştur. Özellikle asal çekme gerilmelerinin yüksek olduğu durumlarda, uzun kanca boyları etrijelerin yerinden çıkmasını engelleyerek kirişin kesme kapasitesini artırmış ve tam sargılı etriye davranışına yaklaştırmıştır.

4.2.2. Göçme tiplerinin değerlendirilmesi

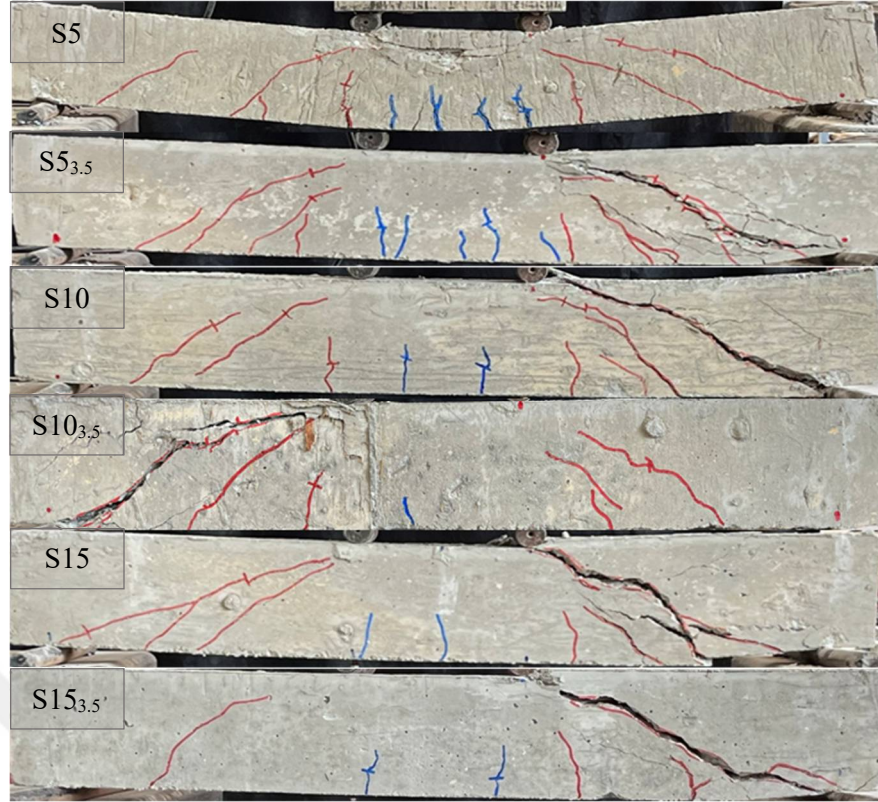
Şekil 4.57’de çalışma kapsamında deneyleri yapılan kirişlerin göçme sonrası hasar görüntüleri verilmiştir. Hasar görüntülerinden de görüldüğü üzere 1.grup kirişlerin tamamında eğik çekme kırılması (diagonal tension) gözlenmiş ve 2.grup kirişlerde ise sadece S5 numunesinde eğilme kırılması oluşurken geriye kalan kiriş numunelerinde de eğik çekme kırılması görülmüştür. Kirişlerde meydana gelen çatlaklar incelendiğinde, kesme kuvvetlerinin etkisiyle kirişte asal çekme gerilmeleri oluşmakta ve bu gerilmeler, kesme kuvvetinin etkidiği yüzeyle yaklaşık 45° açı yaparak yükleme noktası ile mesnet noktaları arasında aktarılmaktadır. Bu gerilme aktarımı sürecinde, kesme gerilmelerinin neden olduğu asal çekme gerilmeleri betonun iç yapısında belirli yönlerde yoğunlaşarak çekme dayanımını zorlamaktadır. Betonun çekme dayanımı aşıldığında ise, asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda uzanan eğik çekme çatlakları meydana gelir. Bu çatlakların oluşumu, kirişin kesme kapasitesinin azalmasına ve eğik çekme kırılmasının oluşumuna sebep olmaktadır (Uysal, 2024). Kirişlerde görülen bu çatlaklar, genellikle eğik çekme çatlakları olarak tanımlanan kırmızı renkte işaretlenmiş olup, yaklaşık 45° ’ye yakın eğik bir açıyla ilerlemektedir. Bunun yanı sıra, özellikle ikinci grup deney kirişlerinde çekme donatısının azaltılmasıyla birlikte, kirişin orta bölgesinde eğilme çatlaklarının sayısının arttığı ve deplasman yapabilme kapasitesinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Özellikle en sık etriye aralığına sahip olan tam sargılı S5 kiriş numunesinde kesme kapasitesinin aşılmadığı ve göçme mekanizmasına eğilme kırılmasının hâkim olduğu belirlenmiştir.

Göçme mekanizmaları kanca boyu açısından değerlendirildiğinde, kesme davranışının baskın olduğu kiriş numunelerinde 3.5 cm kanca boyuna sahip numunelerin, tam sargılı etriyeye sahip kirişlere oldukça benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Buna karşılık, 0 cm ve 1.5 cm kanca boyuna sahip numuneler, tam sargılı etriye sisteminin sağladığı dayanımdan uzak kalmış ve asal çekme gerilmelerine karşı yeterli direnç gösterememiştir. Eğilme davranışının da etkili olduğu numunelerinde (S5, RB5 ve S5_{3.5}), 3.5 cm kanca boyuna sahip etrijeler, yük taşıma kapasitesini tam sargılı etriyeye sahip numunelere yaklaştırmış ancak kesme gerilmelerine karşı yeterli dayanım

sağlayamamıştır. Bu nedenle, kirişin eğilme kapasitesine ulaşmadan kırılma meydana gelerek ani göçme gerçekleşmiştir.



Şekil 4.57. Deney kirişlerinin göçme durumları (Devamı)



Şekil 4.57. Deney kirişlerinin göçme durumları (Devamı)

4.2.3. Rijitlik açısından değerlendirme

Rijitlik, bir yapı elemanının üzerine etkiyen kuvvetler karşısında gösterdiği deformasyona karşı koyma direncine denir. Başka bir ifadeyle, yapı elemanının uygulanan yükler altında mevcut konumunu koruma ve dengeyi sürdürebilme yeteneği şeklinde de ifade edilebilir (Uysal, 2024). Deney elemanlarına ait yük-deplasman eğrileri kullanılarak kirişlerin rijitliklerinin belirlenmesinde, yükleme durumuna bağlı olarak orijinden geçen doğruların eğimleri temel alınmıştır. Akma noktası olarak bilinen $0.85P_{max}$ yük değerinin o andaki deplasman değerine oranı ($0.85P_{max} / \delta_y$) olarak kabul edilen akma rijitlikleri (S_y) hesaplanmıştır. Akma rijitliği değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Birinci ve ikinci grup deneylerinde elde edilen yük-deplasman verileri karşılaştırıldığında, alternatif kesme donatısı olarak kullanılan 3.5 cm kanca boyuna sahip *I* ve *U* tipi donatılarla üretilen numunelerin bazı durumlarda, özellikle düşük etriye aralıklarında, yönetmeliğe uygun tam sargılı etriyelere sahip referans numunelere kıyasla daha yüksek rijitlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Birinci grup deneylerinde farklı kanca

boyları (0 cm, 1.5 cm, 3.5 cm) kullanılarak kanca boyunun rijitlik ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmış; 3.5 cm kanca boyuna sahip numuneler, rijitlik ve yük taşıma kapasitesi açısından referans numunelere yaklaşıp da, göçme şekli açısından gevrek ve ani kırılmalar sergileyerek süneklik yönünden yetersiz kalmıştır. Bu grupta, referans numuneler daha fazla deplasman yaparak sünek davranış sergilerken, kısa kancalı numunelerde aderans eksikliği nedeniyle düşük rijitlik ve ani kesme kırılmaları meydana gelmiştir.

İkinci grup deneylerinde, 3.5 cm kanca boyuna sahip *I* ve *U* tipi alternatif kesme donatıları kullanılarak üretilen numunelerin, bazı durumlarda yönetmeliğe uygun tam sargılı etriye içeren referans numunelere kıyasla daha yüksek rijitlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumu açıklayan temel faktör, göçme mekanizmasındaki farklılıktır. Deneysel bulgulara göre, referans numunelerden biri olan *S5*, 7.33 ton maksimum taşıma kapasitesine ulaşmış ve göçme, eğilme kapasitesine ulaşıldıktan sonra gerçekleşmiştir. Bu durum, daha fazla deplasman oluşmasına ve dolayısıyla yük-deplasman eğrisinin eğiminin daha düşük, yani rijitlik değerinin daha sınırlı olmasına neden olmuştur. Alternatif donatı içeren *S5_{3.5}* numunesi ise 7.31 ton taşıma kapasitesine erişmiş olup, bu değer referansa sadece %0.27 oranında daha düşüktür. Ancak bu numune, göçmesini ani kesme kırılması ile gerçekleştirmiş; daha az yer değiştirme ile kırıldığı için yük-deplasman eğrisi daha dik seyretmiş ve bu nedenle rijitlik değeri referans numuneye kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, rijitliğin kiriş boyuna donatı oranı değişimi ile değişebileceğidir. Kesme etkisinin baskın olduğu bu deney grubunda, alternatif donatılar rijitlik açısından avantaj sağlasa da süneklik açısından yetersiz kalmış ve gevrek göçme davranışı sergilemiştir. Ayrıca bu deney grubunda çekme donatısı bilinçli olarak azaltılmış (2Ø12), bu da numunelerin eğilme kapasitesini sınırlandırarak kesmeye duyarlılığı artırmıştır. Örneğin, 15 cm etriye aralığına sahip referans numune *S15*, 6.33 ton taşıma kapasitesine ulaşırken, aynı aralığa sahip 3.5 cm kancalı alternatif numune *S15_{3.5}*, yalnızca 5.33 ton taşıyabilmiştir. Bu fark %15.8 oranında kapasite kaybına karşılık gelmektedir ve alternatif sistemin özellikle geniş etriye aralığında yeterli performansı sağlayamadığını göstermektedir.

Bu nedenle, alternatif donatılarla üretilen numunelerin rijitliği artmış görünse de taşıyıcı sistemlerin performansı açısından değerlendirildiğinde tam sargılı etriyeler ile sağlanan sünek ve kontrollü göçme davranışı halen üstünlük taşımaktadır.

4.2.4. Süneklik ve eğilme kapasitesinin değerlendirilmesi

1.grup kirişlerinde kullanılan yoğun çekme donatısı (2Ø14), kiriş uzunluğunun da nispeten kısa olmasından dolayı kirişlerin eğilme kapasitesine ulaşmadan önce kesme kapasitesinin aşılmasına sebep olmuştur. Kesme kırılması (eğik çekme kırılması) gevrek bir mekanizma ile gerçekleştiğinden, kesme kapasitesinin aşıldığı nokta, ilgili kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi olmuştur. Deneyler sonucunda, 1. grup kirişlerinin tamamında kesme kapasitesinin aşılmasıyla göçme meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada değişken parametre olarak ele alınan etriye kanca boyunun, eğilme kapasitesine ulaşabilen tam sargılı kirişlere ne ölçüde yaklaştığını belirlemek amacıyla ilave deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda, 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyeler farklı aralıklarla (5 cm, 10 cm ve 15 cm) yerleştirilerek ikinci grup deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde, eğilme davranışının daha etkili olması için kiriş numunelerinin alt bölgesinde 2Ø14 yerine 2Ø12 çekme donatıları kullanılmıştır.

2. grup deneylerde çekme donatısı azaltılmış olmasına rağmen, test edilen kirişler arasında yalnızca S5 numunesinde (5 cm aralıklı tam sargılı etriye) eğilme kapasitesi aşıldığı için göçme eğilme olarak meydana gelmiştir. Aynı etriye aralığına sahip S5_{3.5} numunesinde ise S5 ile çok yakın değerlerde yük taşıma kapasitesine ulaşılmış, ancak göçme eğilme nedeniyle değil, kesme nedeniyle ani ve gevrek bir şekilde gerçekleşmiştir. Sonuçlar, 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyelerin hem kesme hem de eğilme davranışının baskın olduğu durumlarda tam sargılı etriyelerin yük taşıma kapasitesine oldukça yaklaştığını göstermektedir. Ancak, eğilme davranışının baskın olduğu kirişlerde yeterli sargılama etkisi oluşturamadığı için deplasman kapasitesinin sınırlı kaldığı ve eğilme kapasitesine ulaşılmadığı görülmüştür. Bu nedenle kanca boyu 3.5 cm olan kiriş numunesinde sünek davranış oluşmadan gevrek kırılma meydana gelmiştir. Bu durum ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde tam sargılı etriye kullanımının zorunluluk gerekçesini açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1’de verilen kirişlerin sünekliği ($\mu = \delta_u/\delta_y$) değerlendirildiğinde, daha sık etriye aralığına ve uzun kanca boyuna sahip numunelerin daha yüksek süneklik katsayısı (μ) değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Örneğin, RB5 (μ :4.28) ve S5 (μ :3.32) numunesi B5_{3.5} (μ :1.92) ve S_{3.5} (μ :1.51) numunesine kıyasla daha yüksek süneklik katsayısına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Burada referans numunesine göre B5_{3.5} ve S5_{3.5} deney elemanları %56 ve %55 oranında daha düşük değer göstermiştir. TBDY-2018’e göre tam sargılı etriyelere sahip olmamasına rağmen referans numunesi olan

kirişlere (*RB5* ve *S5*) daha benzer yük taşıma kapasitesine ulaşılmış (*S5_{3.5}* ve *RB5_{3.5}*) olsa da sargılama yetersizliğinden dolayı kirişin kırılma biçimi eğilme kırılmasından eğik çekme kırılmasına dönüşmüştür. Bu bağlamda tam sargılama etkisinin sağlanmadığı (kanca boyunun 0, 1.5, 3.5 cm) numunelerde süneklik katsayısının ortalama %30-35 oranında düştüğü ve kesme dayanımının azaldığı görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan tez çalışması kapsamında I ve U şeklindeki donatıların tam sargı donatılara alternatif olup olamayacağı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma iki grup halinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, 6 adet referans numunesi ile birlikte; kanca boyları 0 cm, 1.5 cm ve 3.5 cm olan, etriye aralıkları ise 5 cm, 10 cm ve 15 cm olarak belirlenen toplam 18 adet kiriş numunesi üretilmiş ve bu numuneler üzerinde dört noktalı eğilme deneyi uygulanarak düşey yük altındaki davranışları gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda her bir kirişin hasar şekli, taşıyabildiği maksimum yük, süneklik düzeyi, eğilme dayanımı ve rijitlik özellikleri değerlendirilerek analiz edilmiştir.

1. Tam sargılı etriyeler ile karşılaştırıldığında, 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyelerin (örneğin $B5_{3.5}$ ve $S5_{3.5}$) kesme kapasitesine en yakın performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak süneklik değerlerinde ortalama %55 düşüş gözlemlenmiştir.
2. Etriye aralığı 5 cm olan kirişlerde 3.5 cm kanca boylu numuneler ilk grup deneylerde %96 ikinci grup deneylerde ise %99 oranında referans numunesinin yük taşıma kapasitesine yaklaşmaktadır.
3. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada kullanılan 3.5 cm kancalı I ve U tipi donatılar, 5 cm etriye aralığında taşıma kapasitesi açısından geleneksel etriyelere %99 oranında yaklaşmıştır. Ancak, Lee ve ark. (2009), FSS ile kesme dayanımını %60–70 artırarak çelik etriyeye benzer performans elde etmiş; Yang ve ark. (2010), T uçlu çubuklarla %30’a kadar kesme dayanımı ve %35’e kadar süneklik artışı sağlamıştır. Kawamura ve ark. (2021) ise U tipi etriyelerin çatlak yayılımını %20–30 oranında artırdığını, ancak kapalı etriyeye göre daha düşük kesme dayanımı sağladığını belirtmiştir. Bu veriler, önerilen donatıların sınırlı koşullarda etkili olsa da özellikle süneklik açısından literatürdeki sistemlerin gerisinde kaldığını göstermektedir.
4. Tam sargılı etriyeye sahip referans numuneleri genellikle kontrollü ve sünek kırılma davranışı sergilemiştir.
5. Kanca boyunun 0 cm ve 1.5 cm olduğu numunelerde, kesme dayanımının düştüğü ani ve gevrek kırılmaların meydana geldiği belirlenmiştir.

6. 5 cm etriye aralığına sahip numuneler 10 cm ve 15 cm etriye aralığına sahip numunelere kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşmış ve daha kontrollü bir kırılma biçimi sergilemiştir.
7. Etriye aralığının artması, çatlak genişliğini artırmış ve taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemiştir.
8. 0 cm 1.5 cm ve 3.5 cm etriye kanca boyuna sahip numuneler yeterli sargılama etkisi oluşturamadığı için kesme bölgesinde gevrek kırılmaya yol açtığı belirlenmiştir.
9. Alternatif kesme donatıları kullanılarak üretilen numunelerde (I ve U), geleneksel etriyelerle aynı seviyede kesme dayanımı sağlanamamış ancak belirli koşullarda kısmi bir iyileşme elde edilmiştir.
10. Alternatif kesme donatıları, sünekliği artırmada kısmen etkili olmuştur ancak geleneksel tam sargılı etriyelerin sağladığı dayanım seviyesine ulaşamamıştır.
11. Alternatif donatıların kullanımı, özellikle kesme kırılmasının baskın olduğu bölgelerde yeterli güvenliği sağlamamakta ve taşıyıcı sistemlerde uygulanabilirlik açısından bazı sınırlamalar içermektedir.
12. Kesme dayanımı açısından I ve U şeklindeki donatıların, yönetmeliklerin öngördüğü minimum enine donatı gereksinimlerini tam olarak karşılamadığı belirlenmiştir.
13. TS 500'de, asmolon dişli döşemelerde diş enine donatısı için $V_d < V_{cr}$ olması durumunda etriyelerin uçlarının kapalı olması zorunlu tutulmamakta ve açık uçlu etriye kullanımına izin verilmektedir. Ancak yaptığımız bu çalışmada, 3.5 cm ve daha kısa kanca boyuna sahip I ve U tipi alternatif donatıların kullanıldığı kirişlerde, teorik çatlak sınırı olan $V_{cr} < V_d$ daha düşük yük seviyelerinde eğik çekme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, açık uçlu donatı detaylarında aderans yetersizliği nedeniyle çatlamanın erken başladığını ve TS 500'de belirtilen bu durumun, bazı durumlarda yapısal güvenlik açısından yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Ayrıca $V_d < V_{cr}$ durumları için 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyelerin alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebileceği, ancak bu yaklaşımın geniş kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalarla desteklenmesi gerektiği söylenebilir.
14. Ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde tam sargılı etriye kullanımının zorunluluk gerekçesi yapılan deneysel çalışmalarla da ortaya konulmuştur.

5.2 Öneriler

Bu çalışmanın bulguları ışığında, alternatif kesme donatılarının kullanımına dair öneriler geliştirilmiştir:

1. Özellikle 3.5 cm kanca boyuna sahip etriyeler, tam sargılı etriyelerle yakın taşıma kapasitesine ulaşmış olmakla birlikte, kanca boyunun yetersizliğinin aderans kaybına neden olduğunu ve gevrek kırılmaya yol açtığı belirlenmiştir. Bu nedenle alternatif kesme donatıları (*I* ve *U*) uygulamalarda kullanılması yükün belli bir seviyenin üstüne çıkması durumu için güvenilir değildir.
2. Kesme dayanımının önemli olduğu taşıyıcı sistemlerde, geleneksel tam sargılı etriyeler halen en güvenilir seçenek olarak değerlendirilmelidir. Yönetmeliklerin etriyeler için 135° kanca zorunluluğu oldukça önemlidir.
3. Alternatif donatı sistemlerinin etkinliğini daha iyi anlamak için farklı boyut ve beton sınıflarında ek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
4. Alternatif kesme donatılarının TBDY-2018 ve diğer uluslararası standartlara entegrasyonu için ileri düzey analizler ve uzun vadeli performans testleri yapılmalıdır.
5. Gelecekteki çalışmalarda, farklı açılarda (özellikle 45°) yerleştirilen *I* ve *U* tipi donatıların yapısal performansı detaylı bir şekilde incelenmeli ve optimum konfigürasyonlar belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abd, S. M., Mhaimeed, I. S., Tayeh, B. A., Najm, H. M., & Qaidi, S., (2022), Flamingo technique as an innovative method to improve the shear capacity of reinforced concrete beam, *Case Studies in Construction Materials*, 17,1-11 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01618>
- Abdullah, M., Nakamura, H., Kawamura, K., Takemura, M., & Miura, T., (2023), Experimental study on the effect of different shear reinforcement shapes and arrangement on 3D crack propagation and shear failure mechanism in RC beams. *Structures*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105453>
- ACI 318-19, (2019), *Yapısal Beton ve Yorumlar için Bina Kodu Gereksinimleri*. Amerikan Beton Enstitüsü: ACI Komitesi 318
- Aksoylu, C., (2021), Experimental analysis of shear deficient reinforced concrete beams strengthened by glass fiber strip composites and mechanical stitches. *Steel and Composite Structures*, 40(2), 267–285. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.40.2.267>
- Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Arslan, M. H., (2022), Mechanical Steel Stitches: An Innovative Approach for Strengthening Shear Deficiency in Undamaged Reinforced Concrete Beams, *Buildings*, 12(10) <https://doi.org/10.3390/buildings12101501>
- Aksoylu, C., Uysal, Y., Özkılıç, Y. O., Başaran, B., & Arslan, M. H., (2023), Strengthening shear deficiency in undamaged reinforced concrete beams using innovative 45° mechanical steel stitches, *Structures*, 58, 1-12 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105523>
- Al-Alawi, A. R., & Mashrei, M. A., (2022), Shear capacity of sustainable ultra-high performance concrete beam reinforced with macro synthetic fiber as a sustainable alternative for stirrups and steel fiber, *Case Studies in Construction Materials*, 17. 1-12 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01443>
- Al-Darraj, S. Y., (2018), Kendiliğinden Yerleşen Betonla Üretilmiş Değişken Kesitli Kirişlerde Etriyenin Yerine Çelik Liflerin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-93
- Bello, B. R., Dela Cruz, O. G., Muhi, M. M., & Guades, E. J., (2024), Enhancing the Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beam by Using Modified Shear Reinforcement, *Civil Engineering Journal*, 10(6), 1720–1741. <https://doi.org/10.28991/cej-2024-010-06-02>
- Beyaz, A. (2021). Betonarme kirişlerinde etriyeye alternatif çelik tellerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-41

- CAN/CSA S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcing bars, Canadian Standards Association, 2012.
- Chen, C., Li, C., Zhou, Y., Sui, L., & Li, X., (2022), Applying Flax FRP in an Innovative Closed-Shape Stirrup for Concrete Beams, *Materials*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/ma15082927>
- De Corte, W., & Boel, V., (2013), Effectiveness of spirally shaped stirrups in reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 52, 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.032>
- Demir, S. (2019), Çelik Tel Örgülerin Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışına Etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 477-487
- Emara, M., Elsamak, G., Ghalla, M., Hu, J. W., Badawi, M., & Salama, M. I., (2024), Shear improvement of defected RC beams with sustainable aluminum boxes incorporating high performance concretes, *Case Studies in Construction Materials*, 21, 1-26 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03500>
- Erdem, F., (2022), Betonarme Kirişlerde Yeni Bir Etriye Kancasının Davranışının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 1-157
- Ersoy, U., Özcebe, G. ve Canbay, E., (2019), Betonarme: Davranış ve hesap politikaları, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Esen, B., Gündoğay, A., Yaman, S., Tekeli Kabaş, H., & Demir, F., (2022), Betonarme Kirişlerin Davranışını Etkileyen Parametrelerin Deneysel İncelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27, 1043–1060. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1120435>
- Eurocode 2, 2004, Design of concrete structures- Part 11: General rules and rules for buildings, 2004.
- Gülşan, M. E., Al-Sammarraie, K. T. F., & Al-Darraji, S. Y. H., (2022), Steel Fiber Reinforced Concrete Haunched Beams, *Gaziantep University, Civil Engineering Department*, 1-15
- Kadı, M. E., (2019), Cam Elyaf Takviyeli Polimer Etriye Donatılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerinin Kesme Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-83
- Kawamura, K., Nakamura, H., Takemura, M., & Miura, T., (2021), Analytical Study on the Effect of Different Shear Reinforcement Shapes on Shear Failure Behavior and Shear Resistance Mechanism of RC Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(6), 571–584. <https://doi.org/10.3151/jact.19.571>

- Kawamura, K., Takemura, M., Nakamura, H., & Miura, T., (2021), Experimental Study on the Effect of Different Shear Reinforcement Shapes on Shear Failure Behavior and Internal Crack Pattern of RC Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(1), 82–94. <https://doi.org/10.3151/JACT.19.82>
- Lee, C., Jeong, S. M., & Park, J. W., (2009), Use of fibre sheet strip stirrups for internal shear reinforcement of concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, 61(9), 731–743. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.61.9.731>
- Less, T., Demir, A., & Sezen, H., (2022), Structural performance and corrosion resistance of fiber reinforced polymer wrapped steel reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 354, 129202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129202>
- Lycka, L., & Stepanek, P., (2018), Shear resistance of concrete beams with FRP grating as a shear reinforcement, *Solid State Phenomena*, 272, 115–120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.272.115>
- Merthol, H., (2023), 6 Şubat 2023 Depremlerinde Gözlenen Betonarme Binalardaki Sorunların Hiyerarşik Bir Üçgen ile Açıklanması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2717-2729.
- Mohamed, H. A., (2017), Effect of using swimmer bars on the behavior of normal and high strength reinforced concrete beams, *Ain Shams Engineering Journal*, 8(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.07.007>
- Öztürk, M., (2016), Etriyesiz polipropilen lifli betonarme kirişlerin kesme mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.1-44
- Park, C. W., & Sim, J. S., (2006), Shear failure analysis of concrete beams reinforced with newly developed gfrp stirrups, *Key Engineering Materials*, 324–325, 995–998 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.324-325.995>
- Shatarat, N., Katkhuda, H., Abdel-Jaber, M., & Alqam, M., (2016), Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforcement in shear, *Construction and Building Materials*, 125, 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.070>
- Şavluk, M. E., (2019), Betonarme kirişlerde helezonik biçimli geogrid etriye uygulamasının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*,1-76
- TBDY-2018, (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem etkisi altındaki detayların tasarımı için esaslar, Ankara, 1–416.
- TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Uysal, Y., (2024), Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin 45 Derece Açılı Mekanik Çelik Dikişlerle Güçlendirilmesinde Optimum Tasarımın Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-145
- Ünal, A., (2016), Sabit dikdörtgen kesitli kirişlerin farklı mesnet koşullarında kesme kapasitesinin araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-375
- Üstün, S., (2020), Betonarme Kirişlerde Etriye Açısının Kesme Davranışına Etkisinin Deneysel ve Teorik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-118
- Yang, J.M., Min, K.H, Shin, H.O., & Yoon, Y.S., (2010), The use of T-headed bars in high-strength concrete members, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 1328-1334
- Zaki, M., Tobaa, A., Shehata, A., Mohamed, F., Khalef, R., Hagra, Y., Abou-Ali, R., Farag, M., Ghaly, A., Madi, M., Sayed-Ahmed, E., El-Maghraby, Y., & Abou-Zeid, M., (2021), Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel, *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 107–122 <https://doi.org/10.1080/14488353.2020.1816638>