



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KESME KAPASİTESİ YETERSİZ
BETONARME KİRİŞLERİN MEKANİK
ÇELİK DİKİŞLERLE
GÜÇLENDİRİLMESİNDE KESME
AÇIKLIĞI/FAYDALI YÜKSEKLİK ORANI VE
KİRİŞ YÜKSEKLİĞİ DEĞİŞİMİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Fadimana BAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Fadimana BAŞ tarafından hazırlanan “**Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin Mekanik Çelik Dikişlerle Güçlendirilmesinde Kesme Açıklığı/Faydalı Yükseklik Oranı Ve Kiriş Yüksekliği Değişiminin Araştırılması**” adlı tez çalışması 25/06/2024 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

İmza

Başkan

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt Uyan
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 122M091 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

Fadimana BAŞ
25/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN MEKANİK ÇELİK DİKİŞLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNDE KESME AÇIKLIĞI/FAYDALI YÜKSEKLİK ORANI VE KİRİŞ YÜKSEKLİĞİ DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Fadimana BAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
İkinci Danışman: Doç. Dr. Boğaçhan BAŞARAN

2024, 104 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişleri güçlendirmek için yenilikçi bir yöntem olan mekanik çelik dikişlerin (MÇD), kirişlerde kesme açıklığı/faydalı yükseklik ($a_v/d = 2.5, 3.3$ ve 4.9) oranı ile kiriş yüksekliği ($h=250$ ve 360 mm) değişimindeki performansları deneysel ve karşılaştırmalı olarak iki bölümde incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kesme kapasitesi yetersiz kirişlerde yaklaşık 17MPa beton basınç dayanımına sahip beton ile sabit boyuna ($3\phi 16$ çekme ve $2\phi 12$ basınç) ve enine ($\phi 6/1.5d$) donatılar kullanılmıştır. Referans kirişler haricinde kirişler 10Ø ankraj derinliğine sahip, 6 mm çapındaki MÇD'ler ile çeşitli aralıklarda ($\sim d/1.7, d/2, d/2.5, d/3, d/5$) güçlendirilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, a_v/d oranının incelenmesi için 11 adet 125x250x2500mm ölçülerinde deney kirişi hazırlanmıştır. $a_v/d = 2.5$ deney grubu için 1 referans 5 adet farklı aralıklarla güçlendirilmiş kiriş ve $a_v/d = 4.9$ deney grubu için 1 referans 4 adet güçlendirilmiş kiriş deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürden temin edilen $a_v/d = 3.3$ olan MÇD ile güçlendirilmiş betonarme kirişler ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda $a_v/d = 2.5$ olan deney kirişlerinde MÇD uygulaması, referans kirişlere kıyasla kesme kapasitesinde %40 ile %86 arasında artış sağlamıştır. Buna karşın, $a_v/d = 3.3$ olan deney kirişlerinde kesme kapasitesi artış oranı %29 ile %54 arasında gözlemlenmiştir. En yüksek a_v/d oranına sahip olan deney kirişlerinde ise ($a_v/d = 4.9$), MÇD uygulamasının kesme kapasitesine etkisi daha sınırlı kalmış, bu oran %-1.8 ile %15 arasında değişmiştir. MÇD'ler düşük a_v/d oranlarında daha iyi performans göstermişlerdir. Ancak a_v/d oranı 2.5'ten 4.9'a doğru arttıkça kirişlerde kesme kuvveti talebi azalmakta ve kirişlerin gitgide eğilme kirişi olarak davranmaları sonucunda oluşan eğilme çatlakları dikleşmekte ve MÇD'ler daha etkisiz kalmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kiriş yüksekliğindeki değişimin etkisini araştırmak için 125x360x2500mm boyutlarında 1 referans 5 adet olmak üzere toplam 6 deney kirişi ($a_v/d = 3.3$) hazırlanmıştır. Hazırlanan kirişler 125x250x2500mm boyutlarına sahip kirişler ($a_v/d = 3.3$) ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda 360 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerinde, 250 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerine kıyasla, değişen MÇD aralıkların %5 ile %27 oranları arasında kesme kapasitesinde daha az artış gözlenmiştir. Ancak bu durum her iki deney grubunda aynı MÇD oranına sahip olmasından kaynaklanmıştır. Daha yüksek kirişlerde betonun kesme kapasitesine katkısının daha fazla olmasından dolayı toplam kesme kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle esasen MÇD'lerin kesme kapasitesine etkisi neredeyse aynı olmasına karşın, toplam kesme kuvveti içindeki MÇD'nin payı azaldığından MÇD'nin kesme kapasitesine daha az oranda katkıda bulunuyor gibi algılanmasına yol açmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çelik dikiş, güçlendirme, kesme hasarı, mekanik dikiş, onarım

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE SHEAR SPAN TO DEPTH RATIO AND BEAM HEIGHT VARIATION IN STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH INSUFFICIENT SHEAR CAPACITY USING MECHANICAL STEEL STITCHES

Fadimana BAŞ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Boğaçhan BAŞARAN
2024, 104 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Asst. Prof. Dr. Ali Serdar ECEMİŞ

In this study, the performance of mechanical steel stitches (MSS), an innovative method for strengthening reinforced concrete beams with inadequate shear capacity, was investigated in two parts experimentally and comparatively. The variations in the shear span-to-effective depth ratio ($a_v/d = 2.5, 3.3$, and 4.9) and beam height ($h = 250$ and 360 mm) were examined. In experimental studies, beams with inadequate shear capacity were strengthened with concrete having an approximate compressive strength of 17 MPa, along with longitudinal ($3\phi 16$ tension and $2\phi 12$ compression) and transverse ($\phi 6/1.5d$) reinforcements. Apart from reference beams, beams were strengthened with 6 mm diameter MSS at various spacings ($\sim d/1.4, d/2, d/2.5, d/3, d/5$) and anchorage depths of 10ϕ .

In the first part of the study, experimental beams measuring $125 \times 250 \times 2500$ mm were prepared to investigate the a_v/d ratio. For the $a_v/d=2.5$ test group, there was 1 reference beam and 5 beams strengthened with varying intervals. Similarly, for $a_v/d=4.9$ test group, there was 1 reference beam and 4 reinforced beams tested. The results were compared with strengthened concrete beams strengthened with MSS (mechanical steel stitches) having an $a_v/d=3.3$ obtained from the literature. The study concluded that applying MSS to beams with $a_v/d=2.5$ increased shear capacity by 40% to 86% compared to reference beams. In contrast, beams with $a_v/d=3.3$ showed an increase in shear capacity ranging from 29% to 54% . For beams with the highest a_v/d ratio ($a_v/d=4.9$), the impact of MSS application on shear capacity was more limited, ranging from -1.8% to 15% . MSS demonstrated better performance at lower a_v/d ratios. However, as the a_v/d ratio increased from 2.5 to 4.9 , the demand for shear force in the beams decreased, leading them to behave more like flexural beams, resulting in increased flexural cracks that reduced the effectiveness of MSS.

In the second part of the study, five experimental beams measuring $125 \times 360 \times 2500$ mm were prepared to investigate the effect of beam height variation, all having an a_v/d ratio of 3.3 . These beams were compared with beams of dimensions $125 \times 250 \times 2500$ mm also with an a_v/d ratio of 3.3 . At the end of the study revealed that in beams with a height of 360 mm, compared to beams with a height of 250 mm, there was a lesser increase in shear capacity ranging from 5% to 27% across different MSS intervals. However, this difference arose primarily due to both experimental groups having the same MSS ratio. The higher contribution of concrete to shear capacity in taller beams inherently increases the total shear capacity. Therefore, while the effect of MSS on shear capacity per se remains nearly the same, its relative contribution to the total shear force decreases, leading to a perception that MSS contributes less to shear capacity.

Keywords: Steel stitch, strengthening, shear damage, mechanical stitch, repair

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmamın tüm sürecinde yanımda olan, değerli bilimsel yaklaşımlarını, tecrübelerini paylaşan, bana yol gösteren bu tezin ortaya çıkmasında ve tamamlanmasında büyük paya sahip olan her koşul da destekleyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca ikinci danışmanım olarak tez çalışmam sırasında, yardım ve tecrübelerine başvurduğum tezi hazırlarken bakış açısından istifade ettiğim tez çalışmamın daha iyi hale gelmesi için bana yol gösteren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Boğaçhan BAŞARAN'a teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük katkıları olan aynı zamanda 122M091 nolu TÜBİTAK projesinde danışman olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Musa Hakan Arslan'a yardım ve destekleri için çok teşekkür ederim. Bu çalışmanın ilerlemesinde destek veren hocam Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının oluşmasında ve her aşamasında benden desteğini esirgemeyen, tez çalışmasının iyileştirilmesinde, sonuca ulaşmasında yardımcı olan kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Yusuf UYSAL'a tüm destekleri için çok teşekkür ederim.

Tezin deneysel aşamalarının gerçekleştirilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı emekli teknisyeni Sayın Yüksel ÇİFTÇİ'ye ve deneylerin yapılmasında desteklerini esirgemeyen Yardımcı Prefabrik Yapı Elemanları A.Ş., Haşçelik San. ve Tic. A.Ş. ve Konya Çimento San. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimimde, TÜBİTAK-3501 Kariyer Geliştirme Programı 122M091 nolu projesi kapsamında tez çalışmamın gerçekleşmesine katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı beni her zaman destekleyen ve sevgileriyle bana güç veren, dünyadaki en büyük şansım olan anneme, babama ve kardeşlerime armağan ediyorum. Sadece bu süreçte değil, tüm hayatım boyunca vermiş oldukları destek ve emeklerine, sevgilerimi ve minnetlerimi sunarım.

Fadimana BAŞ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	6
1.2. Tezin Önemi	7
1.3. Tezin İçeriği	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Deney Mekanizması	27
3.2. Deney Numuneleri	28
3.2.1. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı değişiminin araştırılması.....	29
3.2.2. Kiriş yüksekliği değişiminin etkisinin araştırılması	31
3.3. Deney Numunelerinin Boyutlandırılması	32
3.4. Deney Numunelerinin Detaylandırılması	33
3.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması	34
3.5.1. Kalıp hazırlanması	34
3.5.2. Donatıların hazırlanması.....	34
3.5.3. Beton.....	36
3.6. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri.....	38
3.6.1. Beton.....	38
3.6.2. Donatı.....	39
3.6.3. Epoksi	40
3.7. Mekanik Dikiş Uygulaması	41
3.8. Deneysel Çalışma	44
3.8.1. Süneklik	44
3.8.2. Enerji yutma kapasitesi	45
3.8.3. Rijitlik	47
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	49
4.1. Kesme Açıklığı/Faydalı Yükseklik (a_v/d) Oranı Değişimi	49
4.1.1. N0.0/125-250/2.5 numunesi	50
4.1.2. S1.7/125-250/2.5 numunesi	51
4.1.3. S2.0/125-250/2.5 numunesi	53
4.1.4. S2.5/125-250/2.5 numunesi	55
4.1.5. S3.0/125-250/2.5 numunesi	57
4.1.6. S5.0/125-250/2.5 numunesi	59

4.1.7. N0.0/125-250/4.9 Numunesi.....	61
4.1.8. S2.0/125-250/4.9 numunesi	63
4.1.9. S2.5/125-250/4.9 numunesi	65
4.1.10. S3.0/125-250/4.9 numunesi	67
4.1.11. S5.0/125-250/4.9 numunesi	69
4.2. Kiriş Yüksekliği Değişimi	71
4.2.1. N0.0/125-360/3.3 numunesi	71
4.2.2. S1.4/125-360/3.3 numunesi	73
4.2.3. S2.0/125-360/3.3 numunesi	75
4.2.4. S2.5/125-360/3.3 numunesi	76
4.2.5. S3.0/125-360/3.3 numunesi	78
4.2.6. S5.0/125-360/3.3 numunesi	80
4.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	81
4.3.1. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı değişimi.....	82
4.3.2. Kiriş kesit yüksekliğinin değişimi	91
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
5.1. Sonuçlar	97
5.2. Öneriler	98
KAYNAKLAR	100

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_v :	Yükleme noktasının mesnet yüzüne uzaklığı, mm
A_s :	Kesitteki toplam çekme donatısı alanı, mm ²
A'_s :	Kesitteki toplam basınç donatısı alanı, mm ²
$B420c$:	Akma dayanımı en düşük 420 MPa olan nervürlü donatı tipi
b :	Kiriş gövde genişliği, mm
$C15$:	28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 15 MPa olan beton
$C20$:	28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 20 MPa olan beton
d :	Kesitin faydalı yüksekliği, mm
d' :	Pas payı, mm
$E_{elastik}$:	$0.85 P_{max}$ yük seviyesine kadar olan enerji tüketimi
E_{max} :	P_{max} yük seviyesine kadar olan enerji tüketimi
$E_{plastik}$:	P_{max} yük seviyesi ile $0.85P_{max}$ yük seviyesi arasında kalan enerji tüketimi
E_s :	Elastisite modülü, MPa
h :	Kiriş toplam yüksekliği, mm
P_{max} :	Maksimum yük değeri, kN
P_y :	$0.85P_{max}$ yük değeri (akma noktası) (kN)
s :	Enine donatı aralığı, mm MÇD aralığı, mm
S_y :	Akma noktasındaki rijitlik (kN/mm)
S_{max} :	Maksimum yük seviyesindeki rijitlik (kN/mm)
δ :	Deplasman değeri, mm
δ_{max} :	P_{max} yük seviyesindeki maksimum deplasman değeri (mm)
δ_u :	$0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değeri (nihai deplasman) (mm)
δ_y :	$0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değeri (akma noktası) (mm)
$\emptyset$:	Donatı çapı, mm
μ :	Süneklik katsayısı
ρ' :	Basınç donatısı oranı
ρ :	Çekme donatısı oranı
ρ_b :	Dengeli donatı oranı
ρ_{min} :	Minimum donatı oranı

Kısaltmalar

ACI : Amerikan Beton Enstitüsü

BFRP : Bazalt Fiber Takviyeli Polimer

CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimer

EN : Avrupa Standartları

FRP : Fiber Takviyeli Polimer

GFRP : Cam Elyaf Takviyeli Polimer

IMP : İzole Ölçüm Bölmeleri

MÇD : Mekanik Çelik Dikiş

UHPC : Ultra Yüksek Performanslı Beton

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023'te dokuz saat arayla meydana gelen, merkez üsleri sırasıyla Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan, $7.8 M_w$ ve $7.5 M_w$ büyüklüklerindeki iki deprem ciddi can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Deprem sonrası yıkılan yapılar ve can kayıpları ülkemizdeki mevcut yapı stoğunun oldukça kötü durumda olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Mevcut betonarme yapıların hasarı günümüzde yapı sektöründe en önemli sorunlar arasındadır. Bunun nedeni de tasarım veya uygulama sırasında yapılan hatalar, yapının tasarım yüklerinden daha fazla yüklere maruz kalması, yapı üzerinde çalışan ağır makineler veya araçlar, binanın kullanım amacında değişiklik yapılması, yapı mevcut taşıyıcı sistemine müdahale edilmesi (duvar veya kolon kaldırma gibi), beton veya donatı çeliğinin hasar görmesi gibi durumlar sayılabilir. Haliyle bu tip yapılar için güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Özellikle deprem yönetmeliklerinin değişmesi veya güncellenmesi gibi nedenlerle, yapısal güvenlik gereksinimleri artabilir. Bu durumda, yapısal dayanıklılığı artırmak ve yapısal güvenliğini sağlamak için uygun güçlendirme yöntemleri ve uygulamaları önem kazanmaktadır. Güçlendirme uygulamaları hasarsız elemanlara yapılırken onarım uygulamaları hasarlı elemanlar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Yani hasar tanımı bu noktada anahtar rol oynamaktadır.

Betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarında kesit sünekliği, yani yük taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş olmaksızın deformasyon yapabilme yeteneği, yapının deprem güvenliği açısından kritik öneme sahiptir (Haselton ve ark., 2010). Yapı tasarımında, taşıyıcı elemanların kesitleri sünek davranış sergileyecek şekilde belirlenmelidir. Bu yaklaşım, yapıdaki sistemsal olarak sünek davranışın sağlanmasına ve gevrek kırılmanın önlenmesine katkıda bulunabilir. Örneğin, basit eğilme altındaki bir kirişte, kiriş davranışı kesitteki donatıya bağlıdır. Benzer şekilde, bileşik eğilme (eğilme ve eksenel kuvvet bir arada) altındaki bir kolonda, kolon davranışı eksenel yük ile eğilme yükü etkileşimine bağlıdır. Yapıya gelen yüklerin güvenli bir şekilde taşınması ve elemanlar arası yük aktarımının doğru bir şekilde gerçekleşmesi için yapı elemanlarının doğru tasarlanması, boyutlandırılması ve sahada uygulanması son derece önemlidir (Pampanin ve ark., 2002). Eğilme ve eksenel yüklerin birlikte etkilediği bir kolon elemanda, gevrek kırılmaların önlenmesi için eksenel yük miktarının sınırlanması gerekmektedir. Bu yaklaşım, betonarme elemanların istenilen sünekliği tam anlamıyla

sağlamasını mümkün kılmayabilir ancak yapının genelinde sünek davranışın sergilenmesine olumlu katkı yapabilir (Ersoy ve ark., 2019).

Türkiye'de, 2007 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Yönetmeliği (TDY-2007) ve daha sonra 2019'da güncellenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2019) ile depreme dayanıklı yapı tasarımında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, 1998 öncesi inşa edilen yapıların genellikle yeterli düzeyde rijitlik, süneklik ve dayanıma sahip olmadığı bilinmektedir (Arslan ve Korkmaz, 2007; Kaltakci ve ark., 2007; Öztürk ve ark., 2018). Yapı stoğu analizleri, Türkiye'deki bazı yapıların sadece deprem yükleri altında değil, düşey yükler altında bile kapasite açısından yetersiz olduğunu ortaya koymuştur (Şenol ve ark., 2023).

Yapılarda tasarım ve uygulama hataları, kullanım amacının değiştirilmesi, çevresel etkiler ve taşıyıcı elemanlarda korozyon gibi faktörler, yapıların güçlendirilmesini zorunlu kılabilir. Bu durumda, mevcut yapının tamamen yıkılıp yeniden inşa edilmesi veya güçlendirilmesi gerekebilir. Güçlendirme kararı alınırken, genellikle güçlendirme maliyetinin, yeniden inşa maliyetine oranının %40'ı geçmemesi önerilmektedir (Yılmaz ve Karakaya, 2018). Güçlendirme kararı verilirken, yapının rijitlik, süneklik ve dayanım performansı ile güçlendirme maliyeti, uygulanabilirlik ve mimari kaygılar gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, yapıların istenilen dayanım düzeyine ve güçlendirme hedeflerine ulaşabilmesi için çeşitli onarım ve güçlendirme teknikleri kullanılmaktadır.

Bu tekniklerden bazıları;

- Lifli polimerler ile güçlendirme; FRP ile güçlendirme son yıllarda en sık başvuru yöntemleri arasında yer almaktadır. AFRP, BFRP, CFRP ve GFRP gibi birçok çeşitleri bulunmaktadır. Lifli polimerlerin kesit kayma dayanımına katkısı, kesit geometrisi, sarma şekli ve beton basınç dayanımına bağlıdır. Kirişlerin lifli polimerlerle kesme kuvveti dayanımının artırılmasında kullanılan yönetmeliklerde ve teknik raporlarda belirtilmiş olan üç adet sarma yöntemi vardır. Birinci ve en verimli yöntem; döşemenin gerekli yerlerden kırılarak kirişin tüm kesit çevresinin tamamen sarılması (tam sargı), daha sonra kırılan bölgenin yüksek dayanımlı, yapısal tamir harcıyla onarılmasıdır. İkinci yöntem; döşemenin kırılmasının mümkün olmadığı veya zor olduğu durumlarda kirişin 3 tarafından sarılarak (U-sargı) kesme kuvveti dayanımının artırılmasıdır. Üçüncü yöntem; lifli polimerin kiriş kesitinde her iki yanına yapıştırılarak kayma dayanımının artırılması. Sargılama şeklinde uygulama yapılması, hafifliği, anti korozyon oluşu,

yüksek dayanımı, işçilik kolaylığı, kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı ve mimari alan kaybına sebep olmayışı avantajları arasında yer almaktadır (Polat, 2014). CFRP ile ilgili literatürde birden çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar sonucunda kirişlerde yük taşıma kapasitesinde ve kiriş sünekliğinde artışlar meydana gelmiştir (Özcan, 2005). BFRP ile yapılan literatür çalışmalarında tam sarım metodu kullanılarak yapılan güçlendirmelerde kesme kapasitesinde %67 ve %80 oranında artış olmuştur (Balcı ve ark., 2019).

- Çelik plakalar ile güçlendirme; Epoksi bağlayıcıların gelişmesiyle önem kazanan çelik levha yapıştırılması tekniği uygulama kolaylığı, uygulandığı elemanın geometrik boyutlarında değişimin çok az oluşu ve ekonomik maliyetin düşüklüğü gibi nedenlerden dolayı tercih edilmektedir. Epoksi uygulamasında işçilik kalitesinin yüksek olması, çelik plaka yapıştırılacak bölgelerin dikkatli belirlenmesi gerekmektedir (Tekeli ve ark., 2015). Arslan (1991) ve Tankut ve Arslan (1992), betonarme kirişlere epoksi ile çelik levha yapıştırarak, onarılmaları ve güçlendirilmeleri üzerine çalışmıştır. Yapılan çalışmadaki deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi, rijitlik bakımından irdelenmiş, güçlendirme levhali kirişin iyi davranış sergilediği gözlenmiştir.
- Betonarme mantolama; Bu yöntem kısaca, mevcut elemanın çevresine, içinde yeni boyuna ve enine donatı bulunan betonarme bir tabaka eklenerek eleman kesitinin büyütülmesi olarak ifade edilebilir (Çakıroğlu ve ark., 2010). Uygulamanın yapılacağı yapılarda güçlendirme uygulaması esnasında beton dökümü yapılmasından dolayı yapı bölgesel olarak ya da tamamen kullanılamamaktadır. Mevcut binaların bitişik nizam olması, mimariyi etkileyecek durumların olması gibi sebeplerden kolonun her kenardan mantolanması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu da güçlendirme uygulamasının deprem etkileri altında beklenen etkiyi göstermemesine neden olabilmektedir. Mevcut yapı sisteminin davranışı değişeceğinden yapının deprem talebi değişecektir. Bu durum yapının temelinin güçlendirilmesini gerektirebilir. Haliyle güçlendirme maliyetinin artmasına sebep olabilir.
- Mekanik bağlayıcılar; İşlemleri çok kolay olduğundan daha az işçi sayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Güçlendirme yöntemlerinin maliyeti en ucuz olanlardandır. Kıрма dökme uygulamadan yapılmaktadır. Güçlendirme işlemlerini yapmak için binanın kullanımının durdurulmasına gerek yoktur.

Güçlendirme, elemanın boyutlarını değiştirmemektedir ve alan kaybı olmamaktadır (Alslash, 2019).

Güçlendirme uygulamaları, yapının genel dayanıklılığını ve deformasyon yapabilme kapasitesini iyileştirmesinin yanı sıra, özellikle yapı elemanlarının kesme dayanımını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye ve benzeri ülkelerde yapı stokunun büyük bir kısmı betonarme binalardan oluşmakta olup, bu binaların birçoğu yeterli mühendislik hizmeti almadan ve nispeten daha eski yıllarda inşa edildiği için betonarme elemanlarda yeterli kesme dayanımının bulunmadığı bilinmektedir (Arslan ve Korkmaz, 2007; Oztürk ve ark., 2023). Bu sebeple, güçlendirme yöntemleri seçilirken kesme dayanımı kritik bir faktör olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Eğilme çatlakları, çekme etkisinin en yüksek olduğu bölgede meydana gelmektedir. Bu tür çatlaklar, denge altı kesit tasarımı halinde donatının aktığını, denge üstü tasarımı halinde ise çekme bölgesindeki betonun kapasite yük değerine ulaştığını göstermektedir. Eğilme momentlerinden kaynaklanan çatlaklar, çoğunlukla mesnetlerin üst yüzünde ve açıklıkta kesitin alt yüzünden üst yüzüne doğru düşey doğrultuda eğilme çatlağı olarak kendini gösterir. Çatlak, çekme kuvvetine dik yönde oluşur ve giderek genişleyerek kesit yüksekliğince yol alır. Bu çatlağa eğilme çatlağı veya çekme çatlağı denir. Basınç bölgesindeki beton ezilir ve kiriş göçer (Erkan ve ark., 2019a).

Güncel yönetmeliklerde tasarım yapılırken ilk aşamada eğilme hasarlarını önlemek amacıyla bir tasarım yapılır ve sonrasında kesme dayanımı için yeterli olup olmadığı kontrol edilir. Çünkü yükleme altında oluşan eğilme çatlakları, yükleme devam ettikçe betonarme elemanda yayılmasından dolayı kesme dayanımı açısından sorunlara sebep olabilir (Muttoni ve Ruiz, 2008; Ruiz ve ark., 2015). Kesme hasarları ani ve gevrek bir şekilde meydana gelmektedir. Kesme çatlakları, kiriş uçlarında yaklaşık 45 derecelik bir açı ile kesme kuvveti değerinin yüksek olduğu bölgelerde kirişin alt yüzünden üst yüzüne doğru oluşmaktadır.

Laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar, kesme davranışını etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesinin de kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) olduğunu göstermiştir (Bazant ve Kim, 1984).

Kirişlerde a_v/d oranının 1'den küçük olduğu zamanlarda eğik çatlak meydana geldikten sonra eğilme önemini yitirir ve kiriş bundan sonra bir gergili kemer benzeri davranır (Ersoy ve Özcebe, 2012). Doğrudan kuvvet aktarımının daha çok olduğu kirişlerde gergili kemer hasarı adı verilen göçme tipi sıklıkla görülmektedir (İsmail, 2016; Türk, 2020). Bu tür kirişler yükleme altında eğilmeye zorlandığında, eğik çatlaklar

oluştuktan sonra kiriş artık eğilme özelliğini kaybeder ve tamamen gergili bir kemer gibi davranmaya başlar. Bu durumda, kirişin alt bölgesinde yer alan çekme donatıları gergi görevini üstlenirken, asal basınç gerilmeleri ile aynı düzlemdeki beton kemer görevi görür.

Ancak bu kırılma türünde, kirişin göçmeden önce boyuna donatısının akma noktasına ulaşacağı düşünüldüğünde, kirişin eğilme kapasitesine ulaşabileceği söylenebilir. Bu durumda, kirişin davranışı, gergili kemer kırılması olarak adlandırılan bu özgün hasar moduna uygun olarak şekillenir.

Kirişlerde a_v/d oranının 1 ile 2.5 arasında olduğu durumlarda, genellikle kesme-çekme kırılması veya kesme-basınç kırılması olarak bilinen hasar modları meydana gelebilir. Yerel basınç gerilmeleri aşılmadığında, yaklaşık 45°'lik bir çatlağın düzleminde kayma gerilmeleri aktarılır. Bu aşamada, yükleme noktasından mesnete doğru bir basınç çubuğu oluşturularak yük mesnete aktarılır. Kiriş numunesi, eğilmenin yanı sıra kısmen de olsa gergili kemer davranışı sergiler. Bu noktada, çekme donatısı gergi görevi üstlenirken, asal basınç gerilmeleri ile aynı düzlemdeki beton ise, kemer gövdesi şeklinde davranır.

Yüklemeye devam edildiğinde, yerel basınç gerilmelerinin aşılma durumuna bağlı olarak kirişte göçme meydana gelir. Eğer mesnet bölgesindeki yerel basınç gerilmeleri aşılsa, artan gerilmeler çekme donatısı boyunca yarıma oluşturarak kesme-çekme kırılmasına neden olurlar. Eğer yükleme noktası altındaki yerel basınç gerilmeleri aşılsa, artan gerilmeler yükleme noktasına ulaştığında veya yükleme noktasına ulaşmadan önce betonun ezilmesine sebep olurlar. Bu kırılma tipi kesme-basınç kırılması olarak adlandırılır.

Her iki kırılma türünde de kiriş yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve göçme gerçekleşmiştir. Ancak, bu tür kırılmalar, eğik çekme kırılmaları kadar ani ve gevrek değildir. Yükleme altında eğik çatlaklar oluştuğundan sonra göçme aniden olmaz; yerel basınç gerilmeleri sayesinde bir süre daha kiriş yük taşımaya devam eder. Bu nedenle, bu tür hasar modlarında kırılma yükü, çatlama yükünden daha büyüktür (Lafta ve Ye, 2016).

Kirişlerde a_v/d oranının 2'den büyük olduğu halde önce numune eksenine dik olacak şekilde eğilme çatlakları meydana gelecek ve yük arttığı zamanda kesme açıklığında meydana gelecek eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru ilerleyecektir. Eğik çekme kırılması olarak bilinen bir hasar modu ortaya çıkar.

Eğilme çatlaklarından dolayı oluşan eğik çekme çatlakları, kiriş kesitinin üst bölgelerine doğru ilerlerken basınç bölgesinde bir dirençle karşılaşılır. Bu direnç, yerel

basınç gerilmeleri tarafından sağlanır. Noktasal yüklemekten kaynaklanan bu yerel basınç gerilmeleri, kirişin alt bölgelerinde dikey olarak meydana gelen eğilme çatlaklarının, yüklemeye devam edildikçe kirişin üst bölgelerine doğru çatlak eğiminin azalmasına neden olur. Bu esnada, kirişin alt bölgelerindeki eğilme çatlakları yayılmaya devam eder.

Yükleme devam ettiğinde, eğik çekme çatlağı daha zayıf olan kirişin alt bölgesinde ilerler ve kirişin ani bir şekilde göçmesine yol açar. Bu gevrek kırılma türü, literatürde eğik çekme kırılması olarak adlandırılır (Jaber, 2021). Bu kırılma türünde, eğik çekme çatlağının oluştuğu yük ile kırılma yükü aynıdır.

a_w/d oranının çok büyük olduğu durumlarda ($a_w/d > 7$), eğilme momenti çok yüksek değerlere erişeceğinden kesme etkisinden bağımsız olarak göçme gerçekleşmekte ve kiriş eğilme kapasitesine ulaşmaktadır (Özkal, 2017). Bu biçimde olan bir kirişte eğik çatlaklar meydana gelmeyeceğinden kırılmada kesme kuvvetinin etkisi olmamakta olup bunun ana sebebi kesme açıklığının çok büyük olmasından ve kiriş eğilme kapasitesine eriştiren kesme kuvvetinin düşük düzeyde kalmasıdır (Turan, 2022).

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, kesme kapasitesi yetersiz ve düşük beton dayanımına sahip mevcut betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini artırmak için diğer güçlendirme yöntemlerine göre (çelik, lifli polimer ve betonarme vb.) daha az maliyete sahip ve etkili bir güçlendirme alternatifi olan Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) tekniğinin etkinliği araştırılmıştır. Bu kapsamda MÇD etkinliğinin belirlenebilmesi için kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ve kiriş geometrisindeki değişim araştırma parametresi olarak seçilmiştir. Bu çalışma patent olarak tescillenmiş (Erkan ve ark., 2022) MÇD tekniğinin etkili olduğu alanların tespiti için oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu tez çalışması Aksoylu, (2021); Aksoylu ve ark., (2022, 2023); Uysal ve ark., (2023); Aslan ve ark., (2024) tarafından yapılan deneysel çalışmaların devamı niteliğindedir. Bu tez çalışması Aksoylu ve ark. tarafından MÇD'nin kesme kapasitesi zayıf hasarsız kirişlerde etkisini görmek üzere gerçekleştirdiği kapsamlı TÜBİTAK projesinin içerisinde yer alan bir bölümü temsil etmektedir. Bu tez çalışması ile kesme açısından yetersiz hasarsız kirişlerde ekonomik ve uygun güçlendirme alternatifinin MÇD ile sağlanabileceği ortaya konulmak istenmiştir. Yine Uysal ve ark., (2022) yaptığı çalışmayla MÇD ile yapılan güçlendirme uygulamalarında en etkili açının 45° olduğunun belirlenmesi önemli bir adım olmuştur. Aksoylu ve ark., (2023) tarafından yayımlanan makalede MÇD'nin

optimum aralığı araştırılmıştır. Bu makalenin daha kapsamlı anlatımı Uysal (2024) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında yapılmıştır. İlgili tez çalışmasında kesme kapasitesi zayıf hasarsız kirişlerin, farklı MÇD aralıklarını dikkate alarak güçlendirmeler yapılmış ve optimum MÇD aralığının bulunması amaçlanmıştır. Uysal (2024) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasının devamı niteliğinde olan bu tez çalışması ile MÇD'nin etkili olduğu diğer alanlar belirlenmeye çalışılmış ve Uysal (2024) tez çalışması ile de karşılaştırılarak MÇD'nin uygulama alanına katkısı görülmek istenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar Uysal (2024)'deki tez çalışmasında $a_v/d=3.3$ olan kiriş deney sonuçlarıyla yapılmıştır. Yani bu tez kapsamında kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı değişiminin araştırılmasında Uysal (2024)'deki tez çalışmasından da faydalanılmıştır. Bu sayede daha kapsamlı yargılara ulaşılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında literatürdeki diğer güçlendirme yöntemlerinde olduğu gibi MÇD yöntemi için de farklı deneyler yapılmış ve optimum davranış sergilediği sınırlar araştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı literatür ve uygulamadaki geleneksel kiriş güçlendirme alternatiflerine göre daha pratik olacağı düşünülen MÇD'ler için “kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve betonarme kiriş geometrisine ait yüksekliğin (h)” değiştirilmesinin kiriş davranışını nasıl etkilediğinin araştırılmasıdır.

1.2. Tezin Önemi

Betonarme bir binada, hasar genellikle ilk olarak kirişlerde ortaya çıkar. Kirişlerde meydana gelen hasarlar kesme veya eğilme hasarı şeklinde görülür. Özellikle kesme hasarları, ani ve gevrek bir kırılma şeklinde ortaya çıktığı için yapı davranışı üzerinde daha kritik bir rol oynar.

Literatürdeki çalışmaların bir kısmı hasarlı kirişlerin onarılmasına odaklanırken, diğer bir kısmı ise hasarsız kirişlerin güçlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle hasarlı kirişlerde, çatlaklar üzerinden çelik plakalar veya karbon fiber malzemeler kullanılarak betonarme kiriş üzerinde sabitlenerek kirişin onarımı ve güçlendirilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir (Askar ve ark., 2022).

Güçlendirme yöntemi seçilirken, yapının rijitliği, sünekliği ve taşıma gücü kapasitesine ne kadar katkı sağladığı dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, Aksoylu'nun (2021) çalışması, kesme kapasitesi zayıf hasarsız kirişlerin lifli polimerler içerisinde en ucuz ve etkili olan GFRP ile MÇD'nin karşılaştırılması üzerine odaklanılmış literatürdeki ilk çalışmayı temsil etmektedir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda MÇD uygulaması

ile kiriş kesme kapasitesinde %16,8 artış meydana gelmiş olup referans kirişe göre %600 enerji tüketim kapasitesinde de artış sağlandığı ifade edilmiştir. Ayrıca kesme kırılmasından göçen referans kirişin MÇD ile güçlendirilmesi sonucunda sünek davranış sergilediği belirtilmiştir.

Uysal ve ark., (2022) yılında, MÇD uygulamasında optimum açığı bulmak için hasarsız kesme kirişlerinde 90° ve 45° mekanik dikişler uygulayarak kesme kapasitelerindeki artışı ve kiriş davranışını incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, kirişlerde %54 yük taşıma kapasite artışı ve %262 enerji tüketme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Bu durumda, mekanik dikişlerin 45° açılı ile uygulanmasının dayanıklılık ve süneklik açısından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sayede bundan sonra yapılacak çalışmalarda 45° açılı MÇD uygulaması önerilmiştir.

Aksoylu ve ark., (2023), çalışmada mekanik dikişlerin aralıklarını değiştirerek ($d/5$ 'ten d 'ye) optimum dikiş aralığını bulmayı hedeflemiştir. $d/5$ aralığından $d/2$ aralığına doğru gidildikçe oluşan hasarın asal çekme gerilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Yani MÇD aralığının artırılmasıyla kirişin kesme kapasitesi azalmakta ve kirişte asal çekme gerilmesinden kaynaklı hasarın meydana geldiği belirtilmiştir. Kesme kapasitesi $d/1.7$ ve $d/1.4$ oranlarında sırasıyla %28.85 ve %26.18 artmasına rağmen, MÇD aralığı d olduğunda referans kirişe göre kapasite %2.65 azalmıştır. Yani kiriş üzerinde oluşan kayma çatlaklarının en az bir MÇD ile çakışması için MÇD aralığının en fazla $d/2$ olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu durum, kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için seçilecek en düşük MÇD aralığının $d/2$ olması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada uygulanacak olan MÇD yönteminin diğer güçlendirme yöntemlerinden daha ekonomik olması da tercih edilmesi için sebep oluşturmaktadır. Bununla birlikte MÇD yönteminin uygulamaya yönelik kullanılması açısından çalışmanın sonunda MÇD yöntemi için optimum seviye ve sınırın belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu sayede yenilikçi bir güçlendirme yöntemi olan MÇD yöntemi, diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha pratik bir çözüm olarak sunulmaktadır.

Bu çalışmada betonarme kiriş geometrisi (125x250x2500mm), hedef beton basınç dayanımı (15~20 MPa), boyuna (3Ø16 alt ve 2Ø12 üst) ve enine donatılar (Ø6/350mm) sabit tutularak yalnızca kesme açıklığı değiştirilerek kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ($a_v/d=2.5$; $a_v/d=4.9$) değişimi ile kiriş kesme bölgesine ($a_v=54$ cm ve $a_v=105$ cm) uygulanması gereken optimum MÇD sayısı ve betonarme kiriş geometrisine ait yükseklik ($h=360$ mm) değiştirilerek kiriş kesme bölgesine ($a_v=105$ cm) uygulanması gereken optimum MÇD sayısı araştırılmıştır. Literatürde mekanik dikişlerin görece yeni bir

güçlendirme yöntemi olması ve araştırılacak konunun özgünlüğü, bu çalışmanın önemini vurgulamaktadır.

1.3. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması literatür için oldukça yeni bir güçlendirme tekniği olan Mekanik Çelik Dikişlerin (MÇD) kesme kapasitesi zayıf kirişler üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları itibariyle literatür için ilk çalışmaları temsil etmekte olup gelecek çalışmalar için referans niteliğinde olacağı düşünülmektedir. Tez çalışmasının;

1. Bölümünde deprem, yapısal hasarlar, tezin amacı ve öneminden bahsedilmiştir.
2. Bölümde literatürdeki özellikle MÇD ile güçlendirilen kirişlerin davranışları incelenmiştir.
3. Bölümde MÇD'nin kirişlere uygulanması ile farklı a_v/d oranı ve kiriş kesit yükseklik değişiminin dikkate alındığı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.
4. Bölümde deneysel çalışma sonuçları ve karşılaştırmaları detaylı olarak açıklanmıştır.
5. Bölümde ise MÇD'nin kiriş kesme kapasitesine etki aralığı belirlenerek gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

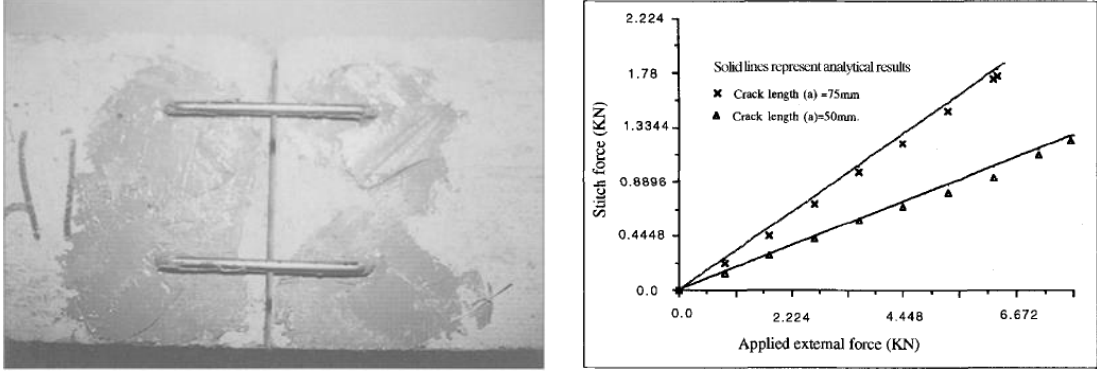
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Betonarme yapılarda, yapısal dayanıklılığı artırmak ve taşıyıcı sistem elemanlarının taşıma kapasitesini iyileştirmek için çeşitli güçlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, literatürde geleneksel ve yenilikçi olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel yöntemler arasında betonarme mantolama ve çelik levha ile güçlendirme gibi uygulamalar bulunurken, son yıllarda araştırmacılar tarafından lifli polimerler ile güçlendirme ve mekanik bağlantılar gibi yenilikçi yöntemler de yoğun ilgi görmektedir. Bu çalışmaların bir kısmı, hasarlı betonarme kirişlerin onarılmasına odaklanırken, diğer bir kısmı ise hasarsız betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Son yıllarda, ön hasarlı ve hasarsız kirişlerin güçlendirilmesinde, alternatif yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve daha pratik olan patentli bir güçlendirme tekniği yani Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) yöntemi geliştirilmiştir (Erkan ve ark., 2022). İlk olarak literatürde MÇD ile ilgili yapılan çalışmalar kronolojik sırayla özetlenmiştir. Daha sonra farklı güçlendirme teknikleri anlatılarak MÇD'nin etkinliği gösterilmeye çalışılmıştır.

Johnson (1965), betonarme yapı elemanlarında ortaya çıkan çatlaklar için farklı onarım yöntemleri önermiştir. Bu çalışmada, ilk kez dikiş benzeri bir onarım tekniğinin betonarme elemanlardaki çatlakların onarılmasında kullanılabileceği vurgulanmıştır. Bu teknik, çatlaklardaki gerilmeleri dikişler aracılığıyla daha geniş alanlara yayarak yapısal bütünlüğü artırmayı amaçlamaktadır. Her ne kadar bu çalışma deneysel verilere dayanmasa da çatlak tipine göre uygulanabilecek onarım yöntemleri konusunda rehber niteliği taşımaktadır.

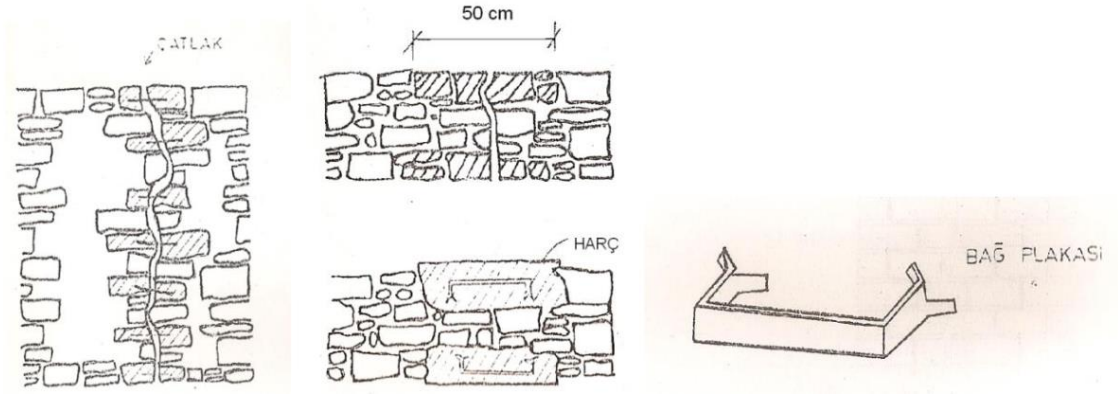
Johnson (1965) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın ardından Hamoush ve Ahmad (1997) yaptığı deneysel çalışmada, beton kirişlerin eğilme bölgelerinde yer alan çatlakların onarılması için dikiş mantığında onarım tekniği (mekanik dikiş) kullanmıştır (Şekil 2.1). Bu çalışmanın deneysel bulguları oldukça sınırlı olsa da literatürde bu onarım tekniğinin deneysel olarak kullanıldığı ilk çalışmalar arasında yer alması bakımından önemli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada araştırılan mekanik dikiş yönteminde, çatlakların her iki tarafından ankraj delikleri açılmakta ve U-şeklindeki dikiş elemanları çatlak karşılayacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, sadece donatısız beton kirişlerin eğilme bölgelerinde yer alan çatlakların onarılması amacıyla mekanik dikişin nasıl kullanılabileceği araştırılmıştır. Ancak, deneysel bulguların sınırlı olması, yöntemin etkinliği ve uygulanabilirliği hakkında kesin sonuçlara ulaşmayı

zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, mekanik dikişin etkinliğinin belirlenmesi için daha geniş kapsamlı çalışmaların yapılması gerektiği öngörülmektedir.



Şekil 2.1 Mekanik dikişlerin onarım tekniği olarak kullanılması ve çalışmada elde edilen grafikler (Hamoush ve Ahmad, 1997)

Karakuş, (2009) tarafından yapılan çalışmada yapıda oluşan çatlaklar 10 mm'den büyükse veya duvarı oluşturan taşlar düşmüşse, enjeksiyon işleminden daha geniş bir uygulama yapılması gerektiğini belirtmiştir. Dikiş yönteminde demir ve paslanmaz çelik elemanlar kullanılarak duvarın iki yüzeyi birleştirilerek kapatılmıştır. Düşey çatlaklarda çatlağa bitişik taş ya da tuğlalar çıkarılmış ve dikiş elemanları ya da çelik dikişler eklenmiştir, duvarın boşlukları, orijinaline uygun harç ile doldurulmuştur. Bu işlemin duvarın diğer yüzünde de uygulanması gerektiği belirtilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Taş duvarlarda düşey çatlakların dikiş yöntemi ile onarımı (Karakuş 2009)

Hwang ve ark. (2010) Ultra yüksek performanslı beton (UHPC), geleneksel betona kıyasla daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir. UHPC için makul tasarım spesifikasyonları oluşturmak için yapısal davranış üzerine çeşitli deneysel testler önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada, ultra yüksek performanslı beton kirişlerin eğilme

davranışı için deneysel test sonuçlarının ayrıntılı bir sunumunu vermişlerdir. UHPC, iri agregalar içermediğinden ve yüksek akışkanlık sergilediğinden, çelik liflerin yönü ve dağılımı, UHPC'nin yerleştirme sırası veya yapının şekli nedeniyle akış yönüne bağlı olabileceğini belirtmişlerdir. Sadece birkaç çalışmada lifin gerilme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmaların sonuçları, lif dağılımının ve oryantasyonunun UHPC yerleştirme yönteminden etkilenebileceğini ima etmektedir.

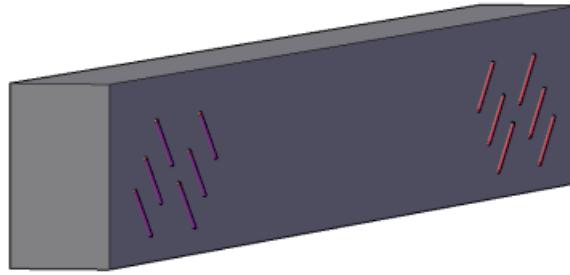
Aksoylu ve ark. (2019) yaptığı çalışmada, Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) ile yapılan güçlendirme uygulamalarının, inceltilmiş uçlu aşık kirişlerinin kesme dayanımına katkısını araştırmıştır. Bu amaçla, 3200 mm uzunluğundaki kirişler üzerinde tam sargı ve yarım sargı uygulamalarını gerçekleştirilmişlerdir. Dört noktalı eğilme deneyi (Şekil 2.3), 1 referans ve 2 güçlendirilmiş kiriş numunesi üzerinde yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, referans numuneye kıyasla tam sargı ile güçlendirilen kirişte %60 ve yarım sargı ile güçlendirilen kirişte ise %49 oranında kesme kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, tam sargılı güçlendirmede gereğinden fazla CFRP kullanımı nedeniyle istenilen süneklik düzeyinin sağlanamadığı ancak ideal sünek davranışın yarım sargılı güçlendirme uygulamasıyla elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.3. CFRP ile kesme bölgesi güçlendirilen aşık kirişleri ve deney düzeneği (Aksoylu ve ark., 2019)

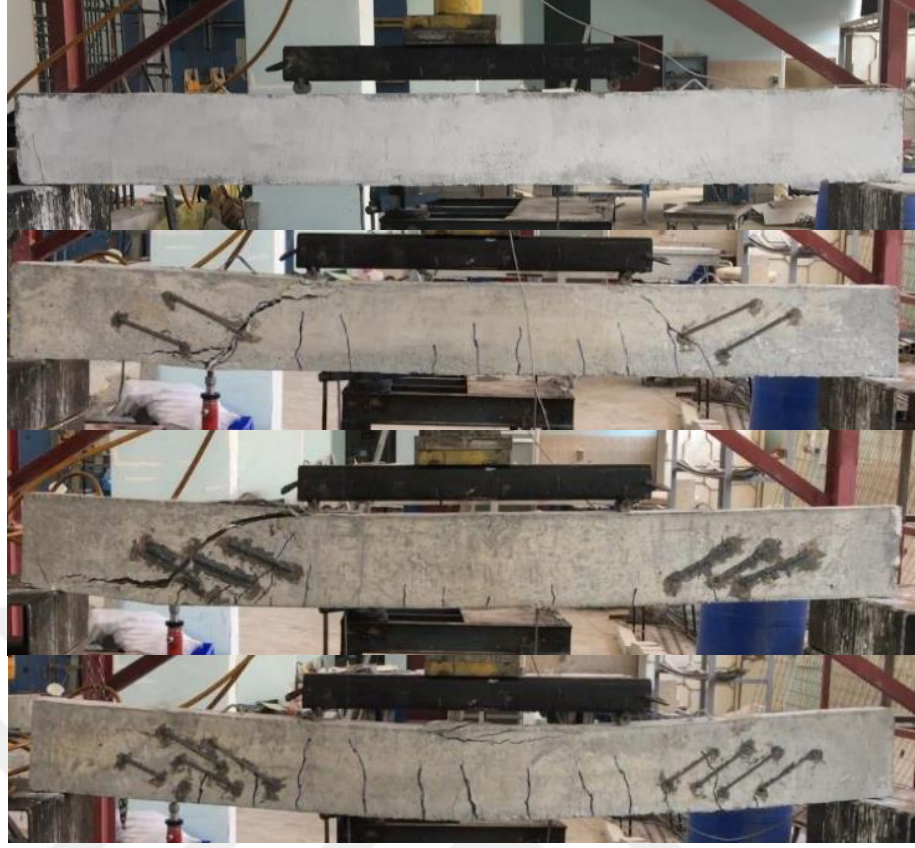
Hamoush ve Ahmad (1997) yaptığı deneysel çalışmanın ardından Alshlash ve ark. (2019) tarafından yürütülen araştırmada, ön hasarlı yapı elemanlarının eski performanslarına geri dönmesinden ziyade, mevcut performanslarının üzerinde bir kapasite hedeflenerek güçlendirme işlemi yapmışlardır. Çalışmada, ön hasar görmüş betonarme kirişlerin taşıma kapasitelerini artırmak için kesme çatlaklarının bulunduğu bölgelere ve çevresine karbon fiber kumaş, çelik plaka ve mekanik dikiş gibi çeşitli yöntemlerle güçlendirme uygulamışlardır. Bu yöntemler, zaman ve maliyet açısından karşılaştırılarak en uygun onarım ve güçlendirme yönteminin seçilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, ön hasar görmüş kesme kirişlerinin güçlendirilmesi için Mekanik Çelik

Dikiş (MÇD) yöntemini literatürde ilk defa bu çalışmada uygulamışlardır. Bu çalışmada karbon fiber kumaş, çelik plaka ve mekanik çelik dikiş olmak üzere üç farklı grupta dört noktalı yükleme deneyleri yapılmıştır. Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) yönteminin kullanıldığı grupta, biri referans olmak üzere %50, %65 ve %85 oranlarında önceden hasar verilmiş deney kirişlerine testler uygulanmıştır. MÇD uygulamasının Şekil 2.4'te ve hasarlı kirişler Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, çatlak yönüne bağlı olarak eğik açılı mekanik dikişlerle güçlendirilmiştir. Bu mekanik dikişlerin kullanılmasıyla kirişlerin kesme kapasitelerinde sırasıyla %16, %40 ve %37 oranında artış meydana gelmiştir, bu da yöntemin yük taşıma kapasitesine olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, %85 oranında önceden hasar görmüş kirişin her iki kesme açıklığının ön ve arka yüzüne dört adet mekanik dikiş ile güçlendirilmesi sonucunda kapasitede belirgin bir artış olmuş ve kirişin kesme hasarından tipik eğilme hasarına doğru davranış sergilemesi, yöntemin etkili ve pratik bir çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Hasarın artmasıyla birlikte kirişlere uygulanan mekanik dikiş sayısı artmış ve süneklikleri karşılaştırıldığında, dikiş sayısına bağlı olarak süneklik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mekanik dikişlerin sünek davranış sergilemesi sonucunda, diğer yöntemlere göre daha fazla enerji tükettiği belirlenmiştir. Bu yeni güçlendirme yönteminin oldukça pratik ve etkili olduğu ve gelecekte kullanılabileceği belirtilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve maliyet analizleri, bu çalışmada kullanılan yöntemler arasında onarım ve güçlendirme için en ekonomik seçeneğin MÇD olduğunu göstermiştir. Şekil 2.4'te çalışmada kullanılan MÇD yöntemi model üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.5'te çalışma kapsamında kesme açıklığı MÇD yöntemiyle güçlendirilen kiriş numuneleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Mekanik Dikiş Uygulaması (Alshlash ve ark, 2019)

Referans

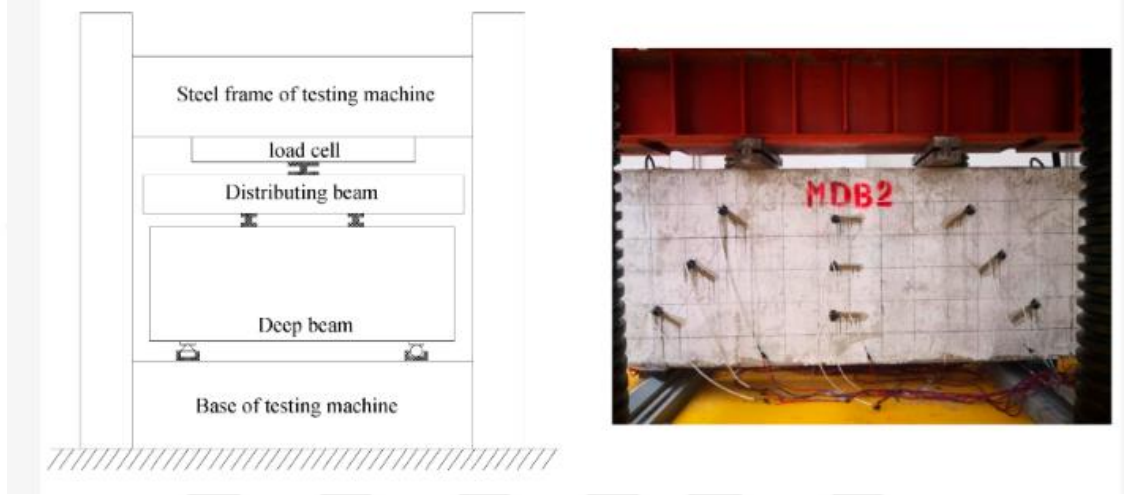
%16
kesme
kapasitesi
artışı%40
kesme
kapasitesi
artışı%37
kesme
kapasitesi
artışı

Şekil 2.5. Ön hasarlı kirişlerde mekanik dikiş ile güçlendirme (Alshlash ve ark. 2019)

Qin ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, düşey yükleme altında hasar görmüş kirişlerin güçlendirilmesi için Bazalt Fiber Takviyeli Polimer (BFRP) ve çelik plakaların bir arada kullanılarak yapılan güçlendirmenin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, C40 dayanımına sahip 200×300×2400 mm boyutlarında 6 adet kiriş numunesi üretilmiş ve bir tanesi referans kirişi olmak üzere beş tane kiriş farklı konfigürasyonlarla BFRP ve çelik plaka birlikte kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme işleminden sonra kirişler dört noktalı eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, ciddi hasar görmüş olan kirişlerin BFRP ve çelik levhalarla güçlendirilmesinin, kirişin rijitliğini ve eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Farklı güçlendirme konfigürasyonlarına bağlı olarak güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitelerinde referans kirişe göre %25.74 ila %49.68 arasında artışlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, izlenen deneylerde BFRP malzemesinin çelik plakalardan daha önce moment yükü ve çekme gerilmelerine maruz kaldığı, çelik plakaların ise kirişin taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra devreye girdiği tespit edilmiştir.

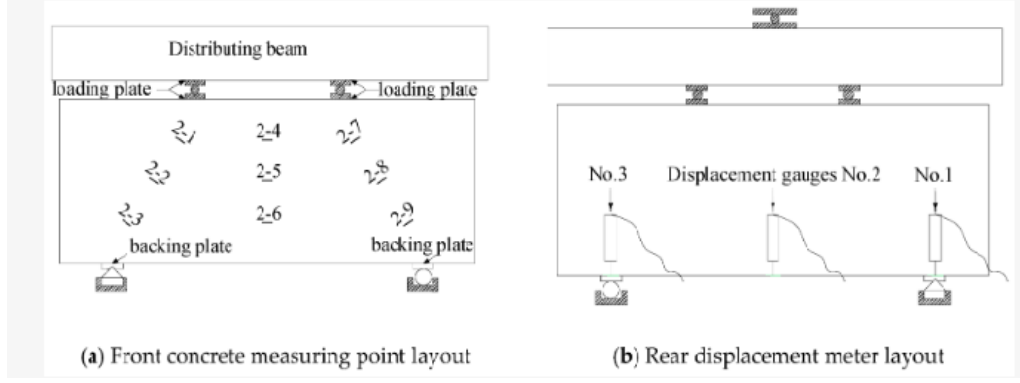
Zhang ve ark. (2020), derin kirişlerde kesme davranışını etkileyen parametreleri incelemek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, kesme kapasitesi yüksek olan

derin kirişlerin kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a_v/d), boyuna donatı oranı ve enine donatı oranı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. İnceleme için, 200×600 mm kesit boyutlarına ve 1600 mm uzunluğa sahip 8 kiriş numunesi üretilmiştir. Etkili açıklık (l_0/h) oranı 2.0 olarak belirlenmiştir. Çalışmada değişken olarak seçilen parametreler şunlardır: a_v/d oranı için 0.3, 0.6 ve 0.9; boyuna donatı oranı için %0.67, %1.05 ve %1.27; enine donatı oranı için ise %0.00, %0.25, %0.33 ve %0.50 oranları kullanılmıştır



Şekil 2.6. Test yükleme cihazı (Zhang ve ark. 2020)

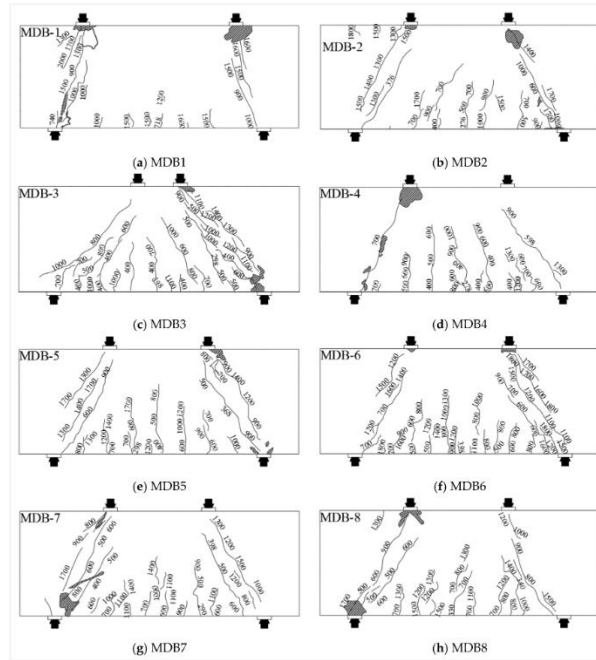
Derin kiriş numunelerindeki yüzeylerine dokuz beton gerinim ölçer yerleştirmişlerdir. Deney düzeneği Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Bu ölçerlerin üçünü orta açıklıklı normal bölümlere, kalan üçünü ise sırasıyla sol ve sağ diyagonal bölümlere konumlandırmışlardır (Şekil 2.7.). Bu ölçerler, beton gerilimini takip etmek için orta açıklıklı normal kesitin beton gerilimini ölçmektedir. Ayrıca, derin kirişin kesme açıklığındaki diyagonal bölümleri izlemek için kullanılmaktadır. Gerinim ölçerler, derin kiriş numunelerinin uzunlamasına takviyeleri ve yatay dağıtıcı takviyeleri üzerindeki çelik çubukların gerinim değişimini kaydetmek için kullanılmaktadır. Her iki orta açıklığın ucuna üç yer değiştirme ölçer yerleştirmişler ve test numunesinin desteğini izlemek için kullanmışlardır. Beton gerinimi, donatı gerinimi ve yer değiştirme verileri, izole ölçüm bölmeleri (IMP) veri otomatik toplama sistemi kullanılarak toplanmıştır. Ayrıca, beton çatlak genişliği de ölçülmektedir ve minimum 0,01 mm ölçekli çatlak gözlem cihazı kullanılarak kaydedilmiştir. Bu cihaz aynı zamanda çatlağın yayılma durumunu da izlemektedir.



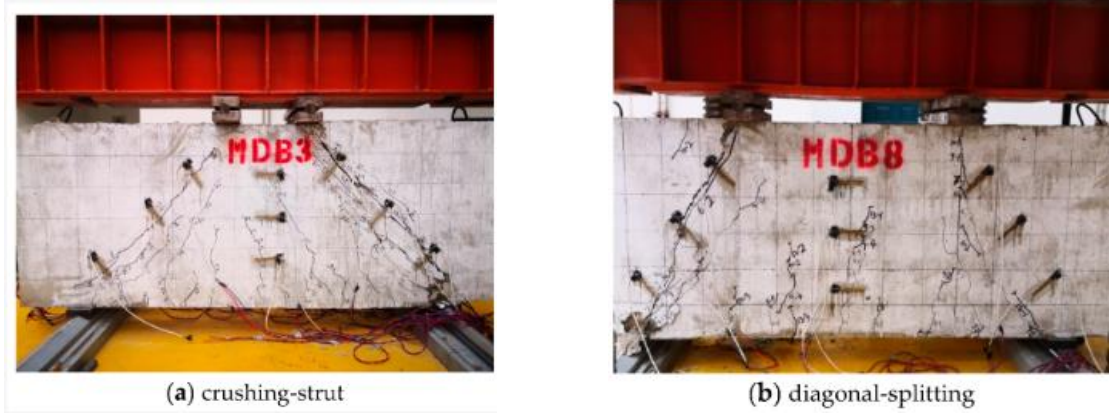
Şekil 2.7. LVDT yerleşim görseli (Zhang ve ark. 2020)

Deneyisel çalışmada, kirişlerin içerisindeki boyuna donatıların gerilmesi, betonun gerilmesi, deformasyonlar, hasar tipleri, göçme mekanizması ve yük-deplasman eğrileri incelenmiştir. Deneyisel çalışmada kirişlerde meydana gelen hasarlar Şekil 2.8’de çizim üzerinde Şekil 2.9’da deney sonu olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre,

- a_v/d oranı küçüldükçe kirişlerin göçme modu kesme-basınç kırılması olarak değişmiştir.
- a_v/d oranının azalması ve boyuna donatı oranının artması, kirişin kesme kapasitesini etkili bir şekilde artırmıştır.
- Enine donatı oranının kesme kapasitesi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

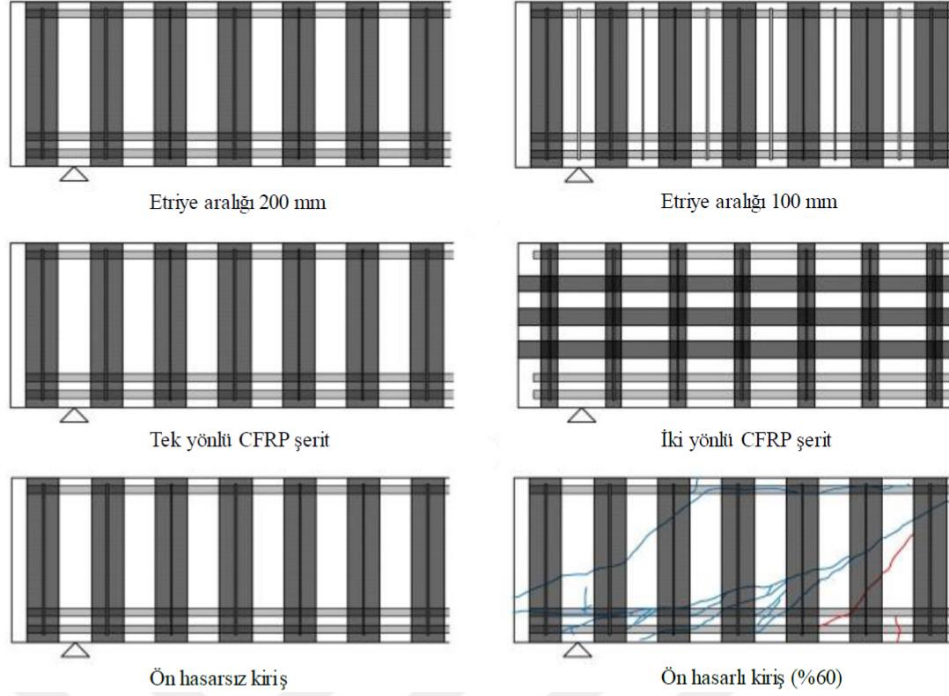


Şekil 2.8. Kirişlerde oluşan çatlaklar (Zhang ve ark. 2020)



Şekil 2.9. Kiriş numunesinde meydana gelen çatlaklar (Zhang ve ark. 2020)

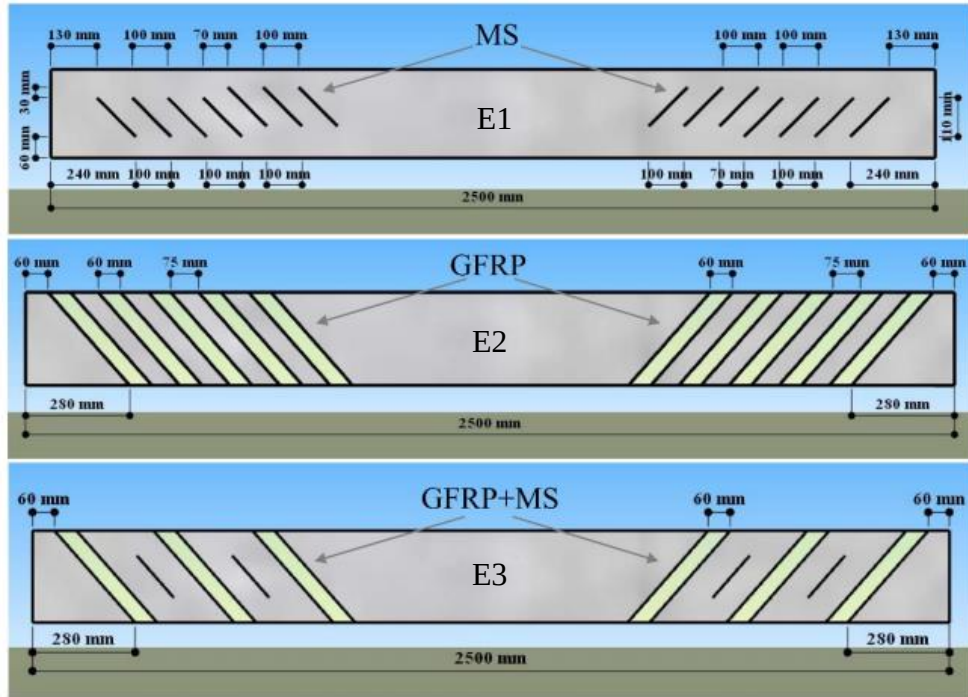
Haroon ve ark., (2021) yaptıkları deneysel çalışmada kesme kapasitesi yetersiz kirişleri, Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) ile güçlendirmişlerdir. Bu kapsamlı çalışmada değişken parametreler olarak etriye aralığı (100 mm ve 200 mm), CFRP yerleşimi (tek yönlü ve iki yönlü), kullanılan CFRP katman sayısı (tek ve çift katman), CFRP konfigürasyonları (yan, U şeklinde ve tam sargı) ve kirişe ön hasar verilmesi durumu (maksimum göçme yükünün %60'ı kadar yükleme yapılarak hasar verilmiştir) araştırılmışlardır (Şekil 2.10). Bu amaçla iki seri olmak üzere birinci seride 10 tane kiriş ve ikinci seride ise 8 tane kiriş numunesi üretmişlerdir. Birinci seride kullanılan kiriş boyutları 300×500×2200 mm ve ikinci seride kullanılan kiriş boyutları 300×500×2600 mm şeklindedir. Deney kirişlerinde a_w/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı birinci seri için 3 ve ikinci seri için 2.1 olarak dikkate alınmıştır. Deney numunelerini dört noktalı yükleme düzeneğinde test etmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre iki yönlü CFRP kullanılan deney kirişlerinde kullanılan CFRP miktarının tek yönlü CFRP uygulanan kirişlerden fazla olmasına rağmen kesme kapasitesine olan katkıları açısından kayda değer miktarda artış görülmemiştir. Ayrıca ön hasar verilen deney kirişlerinde yapılan güçlendirmenin kesme kapasitesi artışı ile ön hasarsız deney kirişlerinde yapılan güçlendirmenin kesme kapasitesi artışı yakın olmuştur. Güçlendirme uygulamasında kullanılan yatay CFRP şeritlerinin deney sonundaki göçme durumları dikkate alındığında dikey CFRP şeritlerinin beton yüzeyden ayrılmasını yeterli ölçüde engelleyemediği tespit edilmiştir. Yazarlar CFRP ile güçlendirme uygulamasında kullanılan ankraj uygulamasının yerine yatay CFRP şeritlerinin kullanımının uygun olmadığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.10. Deneysel çalışmada incelenen parametreler (Haroon ve ark., 2021)

Alshlash ve ark. (2019) tarafından yürütülen çalışmanın ardından Aksoylu (2021), Mekanik çelik dikiş (MÇD) yönteminin yaygınlaşması yolunda önemli bir adım atmıştır. Bu çalışmasında, özellikle hasarsız kesme kirişlerinin MÇD ile güçlendirilebileceğini belirlemiş ve bu bulgu, literatürde bir ilk olarak yerini almıştır. Yaptığı deneysel çalışmalarda, düşük kesme kapasitesine sahip hasarsız kirişlerin MÇD yöntemiyle güçlendirilebileceğini kanıtlamıştır. Bu sayede, literatüre diğer güçlendirme yöntemlerine alternatif olabilecek yenilikçi, pratik ve ekonomik bir yöntem kazandırmıştır. Çalışmasında, ön hasarsız ve kesme dayanımı yetersiz kiriş numunelerine MÇD uygulamış ve bu güçlendirme yönteminin kiriş davranışına etkisini değerlendirmek üzere bir grup deney gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada, $\frac{1}{2}$ ölçekli ve $125 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$ boyutlarında dört kiriş numunesi hazırlanmıştır. Denge altı sünek davranışa uygun olarak, kirişin çekme bölgesine 3Ø12 ($p = 0.0117$) ve basınç bölgesine 2Ø8 ($p = 0.00347$) çapında B420c tipi nervürlü donatılar yerleştirmiştir. Kiriş numuneleri, TBDY-2019 yönetmeliğine uygun şekilde üretilmiş ve yönetmelikte belirtilen minimum donatı oranından daha fazla donatı içermiştir. C35 beton sınıfı ile üretilen kirişlerde, etriyeler 5 mm çapında olup 350 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Etriye kancaları, mevcut binalarda sıkça karşılaşılan ve yönetmelik açısından uygun olmayan 90° açıyla uygulanmıştır. Çalışmada üretilen kirişlerin biri referans olarak kullanılmış, diğer kirişler ise referans kiriş ile aynı özellikte olup üç farklı güçlendirme tekniği ile güçlendirilmiştir. Yetersiz

kesme kapasitesine sahip betonarme kirişler için sırasıyla MÇD, GFRP (Cam Fiber Takviyeli Polimer) ve bu iki malzemenin hibrit kullanımı tercih edilmiştir. Bu araştırmanın hedefi, güçlendirme için kullanılan GFRP'nin ekonomik avantajlarını, araştırmacı tarafından alternatif olarak önerilen MÇD tekniği ile performans ve maliyet açısından karşılaştırmaktır. Çalışma kapsamında, kontrol kiriş numunesi (E0), MÇD ile güçlendirilmiş kiriş numunesi (E1), GFRP şerit sargı ile güçlendirilmiş kiriş numunesi (E2) ve GFRP ile MÇD'nin hibrit olarak kullanıldığı güçlendirilmiş kiriş numunesi (E3), dört noktalı yükleme testine tabi tutulmuştur. Bu testler sırasında numunelerin akma anına kadar 10 kN'luk yük artışları uygulanmıştır. Şekil 2.11'de güçlendirme uygulamalarının detayları gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, MÇD ve GFRP elemanlarının ayrı ayrı kullanımının hem yük kapasitesini artırdığını (sırasıyla %16.8-%18.1) hem de sünekliğe önemli ölçüde katkı sağladığını (sırasıyla süneklik katsayısı 6.03 ve 5.02) göstermektedir. Bu sonuçlar, GFRP ve MÇD'nin yapı güçlendirme alanında etkili alternatifler olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada yapılan maliyet analizine göre, diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı olan MÇD uygulamasının, kesme kapasitesi açısından yetersiz görülen kirişlerde kullanımının önemine vurgu yapılmaktadır. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmalar, kesme açısından zayıf olan kirişlerin güçlendirilmesinde en uygun seçeneğin performans/maliyet açısından sırasıyla E1 (MÇD) > E2 (GFRP) > E3 (MÇD+GFRP) olduğunu göstermektedir.

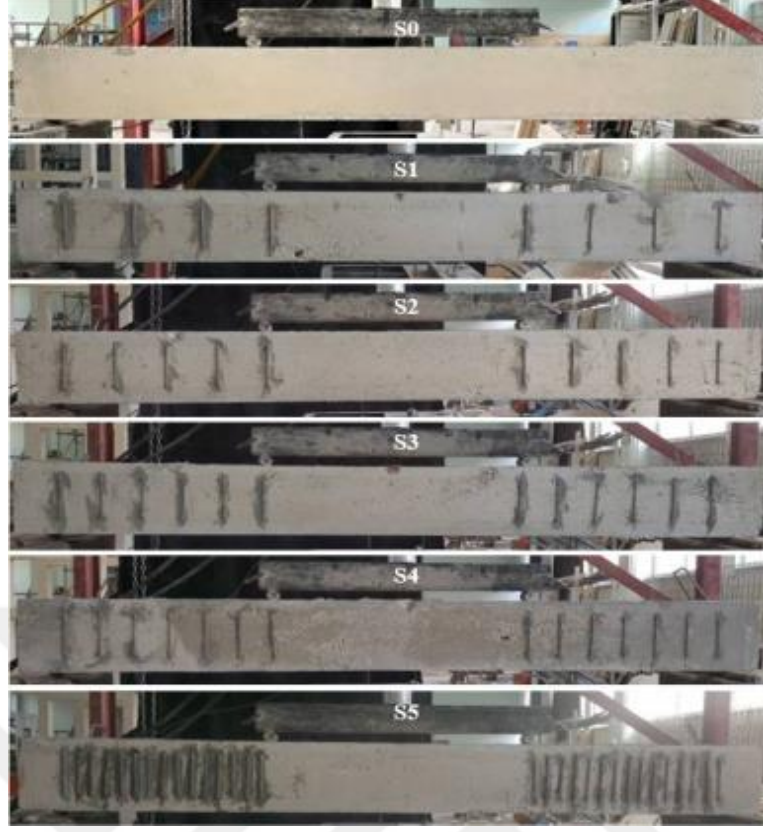


Şekil 2.11. Güçlendirme Yöntemlerinin Uygulama Şekilleri (Aksoylu, 2021)

Aksoylu (2021) çalışmasının ardından Aksoylu ve ark., (2022) çalışmasında, hasarsız kesme kirişlerinde 90° açılı MÇD ile güçlendirme yöntemini kullanarak kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz olan betonarme kirişler, farklı aralıklarla yerleştirilmiş 90° açılı MÇD’ler ile güçlendirilmiştir. Deneyde değişken olan tek parametre, mekanik dikişlerin uygulandığı aralık olmuştur. Şekil 2.12’de 90° açılı MÇD yönteminin uygulama adımları gösterilmiştir. Bu çalışmada, MÇD aralığı $d/2$ ile $d/5$ arasında değiştirilerek uygulanmıştır. Farklı MÇD aralıkları kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarının, kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, 125×250×2500 mm boyutlarında ½ ölçekli 6 adet kiriş numunesi üretilmiş; bunlardan biri referans olarak seçilmiş, diğer beş kiriş ise farklı MÇD aralıklarıyla güçlendirilmiştir. Şekil 2.13’te çalışma kapsamında farklı aralıklarla güçlendirme yapılan kiriş numuneleri gösterilmiştir. Deneylerde çekme donatısı olarak 3Ø12 ve basınç donatısı olarak 2Ø8 donatıları kullanılmış, kesme açısından yetersizlik için ise Ø5/350 mm aralıklarla etriyeler yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada belirlenen kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 3.11 olup, kiriş numuneleri 4 noktalı yükleme testine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, MÇD ile güçlendirme uygulanan kirişlerde kesme kapasitesinde %2 ile %31 arasında artış gözlenmiştir. En belirgin artış, MÇD oranı en yüksek (%1) kiriş numunesinde kaydedilmiştir. Bununla birlikte, bu kiriş numunesinde MÇD aralıklarının sık olması nedeniyle çok sayıda delik açıldığından dolayı %43 oranında rijitlik kaybı yaşanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda MÇD’lerin sık aralıklı kullanımı önerilmiş ancak geleneksel etriye mantığıyla (yani 90° açılı) uygulanmasının kirişlerde kesme hasarına neden olduğu da vurgulanmıştır.



Şekil 2.12. MÇD uygulama aşamaları (Aksoylu ve ark., 2022)



Şekil 2.13. MÇD ile güçlendirilen kirişler (Aksoylu ve ark. 2022)

Aksoylu ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmadan sonra Uysal ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde 45° ve 90° açılı MÇD uygulamasını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Bunun için ön hasarsız kirişlere MÇD'ler 45° ve 90° açılarla kesme açıklıkları boyunca kirişin her iki yüzüne de dıştan U şeklinde uygulamışlardır. Deneyler için önceden hasar görmemiş üç kiriş kullanılmıştır. Bir kiriş referans olarak bırakılmış, diğer ikisi ise farklı açılarda (45° ve 90°) MÇD ile güçlendirilmiştir. Kirişleri kesme kapasitesi yetersiz olarak hazırlamışlardır. Kirişlerden bir tanesi güçlendirilmemiş referans olarak test edilirken diğer ikisi d/5 (45mm) aralıkla 45° ve 90° olarak test edilmiştir. Şekil 2.14'te test edilen deney kirişleri verilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda referans kirişe göre yük taşıma kapasitelerinde sırasıyla %53,74 (45° açılı) ve %14,76 (90° açılı) artış sağlanmıştır. Toplam enerji tüketme kapasiteleri kıyaslandığında ise %261,6 ve %93,73 artış meydana gelmiştir. Bu durumda mekanik dikişlerin 45° açılı ile uygulanması daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Aksoylu'nun daha önce yapmış olduğu çalışması ile kıyaslanınca 45° açılı MÇD'lerin 90° açılı yerleşime göre daha etkili olacağı net bir şekilde anlaşılmaktadır.

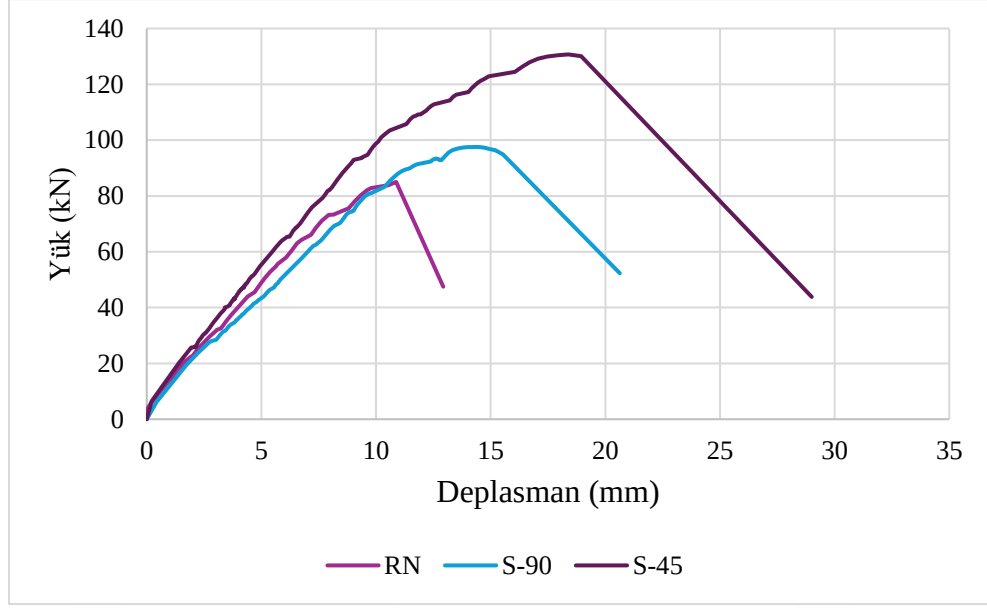


Şekil 2.14. Mekanik dikiş ile güçlendirilmiş kirişler (Uysal ve ark. 2022)

Ayrıca, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde bulunmayan, ancak literatürde oldukça yeni bir güçlendirme alternatifi olan MÇD yönteminin optimum tasarımına yönelik yeni çalışmaların oldukça önemli olduğu ifade edilmiştir. Şekil 2.15'te kirişlerin deney sonu göçme durumları ve Şekil 2.16'da deney kirişleri için elde edilen yük-deplasman eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Mekanik dikiş uygulamasının kesme kapasitesine katkısı (Uysal ve ark. 2022)



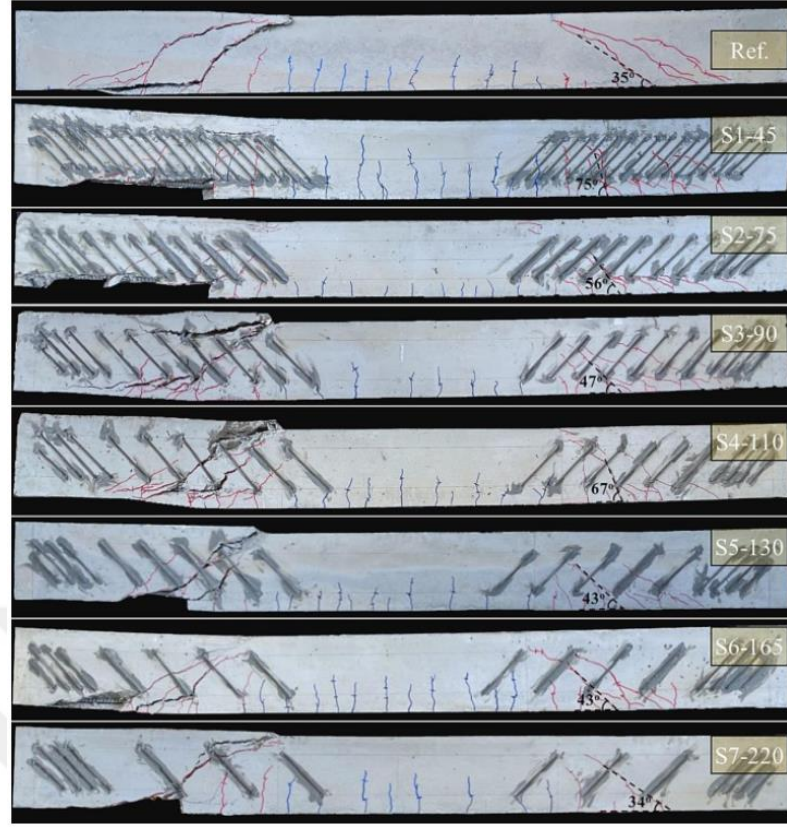
Şekil 2.16. Deney kirişlerine ait yük-deplasman eğrileri (Uysal ve ark., 2022)

Aksoylu ve ark. (2023) yaptıkları deneysel çalışmada, MÇD uygulamasında MÇD aralıklarının değiştirilerek ($d/5$ 'ten d 'ye) optimum MÇD aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda MÇD'ler, 45° sabit açıyla d 'ye bağlı olarak artan aralıklarla kirişlerin her iki yüzüne uygulamıştır. Çalışmada MÇD'lerin kirişlerin kesme dayanımına katkısı incelenmiştir. Çalışma kapsamında test edilen deney kirişlerine ait MÇD güçlendirme detayları Şekil 2.17'de sunulmuştur. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre, en sık MÇD aralığına sahip olan S1-45 kirişi, en yüksek kesme kapasitesine ulaşmış ve referans kirişin kesme kapasitesini %54 oranında artırmıştır. Ancak, kirişlerde kullanılan MÇD aralıkları arttıkça kirişlerin kesme kapasitesi azalmıştır. Bu durum, yetersiz kesme dayanımına sahip kirişlerde, daha sık bir şekilde yerleştirilmiş MÇD'lerin, seyrek yerleştirilmiş MÇD'lerden daha fazla asal çekme gerilmesini karşılamasıyla açıklanmaktadır. S7-220 kirişin kesme kapasitesi ise referans kirişe göre artmamış, MÇD uygulaması sırasında deliklerin etrafında meydana gelen küçük hasarlar nedeniyle kiriş rijitliği referans kirişe göre azalmıştır (-%2.65) ve bu durum kapasitenin azda olsa düşmesine sebep olmuştur. Faydalı yükseklik (d) değerine (225 mm) eşit veya daha büyük ($\geq S7$) MÇD aralığı kullanılması durumunda, eğik çatlaklar MÇD'lerden hiçbir tanesi ile çakışmadığından dolayı kullanılan MÇD'ler, kirişin kesme kapasitesini artırmamıştır. Bu sonuçlar, mekanik dikişlerin aralıklarının ve konumlarının belirlenmesinde önemli bir referans oluştururken, daha geniş kapsamlı tasarım ve incelemelerin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 2.17. MÇD ile güçlendirilmiş kiriş numuneleri (Aksoylu ve ark., 2023)

Şekil 2.18’de verilen deney sonu göçme durumları incelendiğinde, MÇD aralığının $d/5$ ’ten $d/2$ ’ye doğru artmasıyla kirişteki hasarın diyagonal çekme gerilmesine bağlı olan göçmeye dönüştüğü gözlenmiştir. Bu durum, MÇD aralığının artmasıyla birlikte kirişin kesme kapasitesinin azaldığını ve kirişte eğik çekme kırılmasının meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca deney kirişlerinde, kesme kapasitesi $d/1.7$ ve $d/1.4$ oranlarında sırasıyla %28.85 ve %26.18 artmış olsa da, MÇD aralığı d olduğunda referans kirişe göre kapasite %2.65 azalmıştır. Kiriş üzerindeki kesme çatlaklarının en az bir MÇD’ye denk gelmesi için MÇD aralığının en fazla $d/2$ olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için seçilecek en düşük MÇD aralığının $d/2$ olması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, MÇD aralığının $d/2$ ’ye kadar azaltılması, kirişin kesme dayanımını artırırken, eğik çekme kırılmasının önlenmesine yardımcı olabilir.



Şekil 2.18. Kirişlerin deney sonu göçme görüntüleri (Aksoylu ve ark., 2023)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

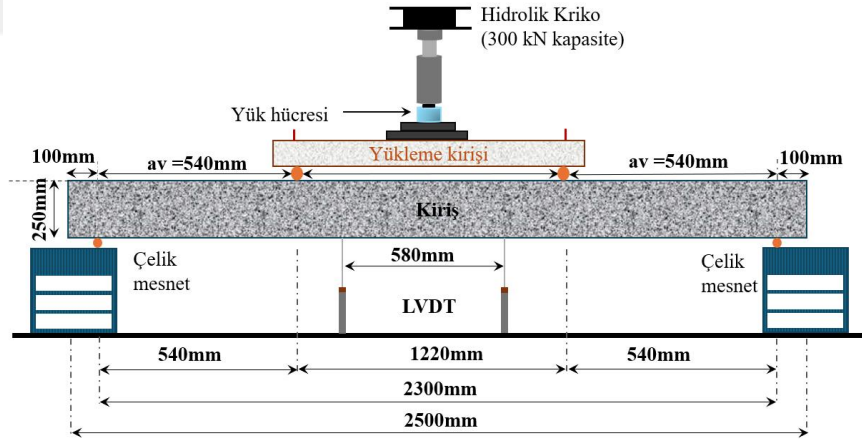
Bu çalışma kapsamında yer alan deneyler Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Araştırmada dikkate alınan deney kirişleri laboratuvar koşulları göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Deneyde kullanılacak olan kiriş numuneleri ile dört noktalı eğilme deneyi yapılarak mekanik çelik dikiş (MÇD) uygulamasında “kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve kiriş geometrisindeki yükseklik değiştirilerek (h)” optimum değerlerin bulunması amaçlanmıştır. Bu tez çalışması için toplamda 17 adet $\frac{1}{2}$ ölçekli kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan kiriş numuneleri ön hasar almamıştır. 11 adet kiriş numunesi a_v/d oranının optimum değerini belirlemek için, 6 adet kiriş numunesinde ise kiriş geometrisi değiştirildiğinde mekanik dikiş davranışındaki değişimi gözlemlemek için kullanılmıştır.

Çalışma kapsamındaki kiriş numunelerinde kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranındaki değişimleri gözlemlemek için $a_v/d=2.5$, $a_v/d=3.3$ (Aksoylu ve ark. 2023 ve Uysal, 2024) ve $a_v/d=4.9$ olacak şekilde grup deneyleri yapılmıştır. a_v/d oranı 3.3 olan kirişler bu çalışmada da dikkate alınmış çalışmanın bütünlüğü adına $a_v/d=2.5$ ve $a_v/d=4.9$ olan deney numuneleri bu tez çalışmasında yapılan kirişler ile karşılaştırılmıştır. Kiriş geometrisindeki yükseklik değişimine bağlı deneyler içinde 125x250x2500mm olarak yapılmış deneylerle (Aksoylu ve ark. 2023 ve Uysal, 2024) a_v/d oranı açısından kıyas yapmak için 125x360x2500mm kirişler üretilmiş ve deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri Bölüm 3.2. de detaylıca verilmiştir.

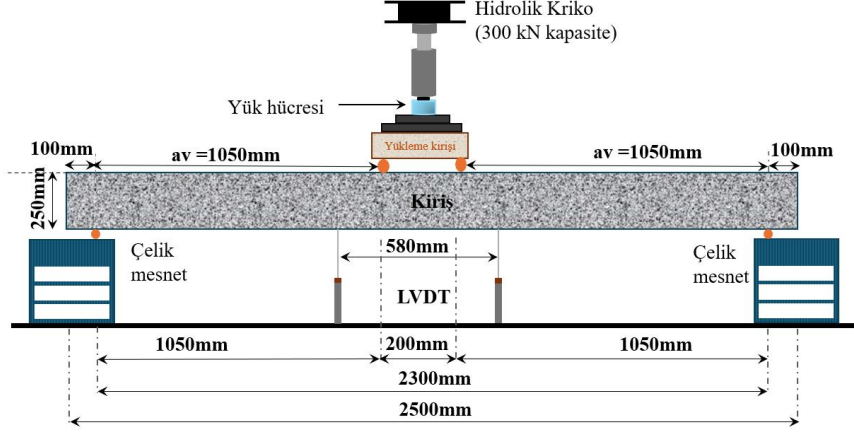
Çalışmada kiriş numunelerinde beton olarak, ülkemizde mevcut bulunan yapılardaki beton sınıfına yakın olması amacı ile C15-20 aralığında olan beton sınıfı kullanılmıştır. Beton karışımları laboratuvarda mevcut bulunan betoniye ile hazırlanmış ve vibratör yardımıyla kalıplara yerleştirilmiştir. Hazırlanan kirişlerin kesme kapasitesinin yetersiz kalması için 6mm çapında ve 350mm aralığında B420c sınıfı etriye kullanılmıştır. Etriye donatılarının kancaları mevcut yönetmeliklerin aksine uygulamadaki hatalı durumu temsil etmesi adına 90° olarak kullanılmıştır. Eğilme kapasitesini güçlü tutmak ve kirişin kesme davranışını incelemek için kirişin çekme bölgesine yani alt kısmına 3Ø16 ve basınç bölgesine yani üst kısmına ise 2Ø12 boyuna donatı yerleştirilmiştir. Eğilme kapasitesinin kesme kapasitesinden fazla olmasıyla kirişlerin eğilme dayanımına ulaşmadan kesmeden göçmesi amaçlanmıştır. Böylelikle mekanik dikiş aralıkları değiştirildiğinde kesme kapasitesindeki artışın net bir şekilde izlenebilmesi sağlanmıştır.

3.1. Deney Mekanizması

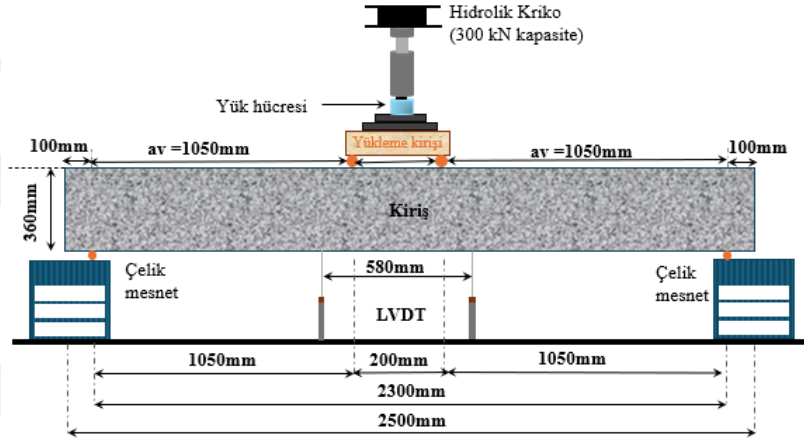
Kiriş numunelerinin kesme ve eğilme dayanımlarını belirlemek için dört noktali eğilme düzeneğinde deneyler yapılmıştır (Şekil 3.1-Şekil 3.2-Şekil 3.3). Kiriş numuneleri kiriş uç bölgesinden 100 mm mesafede sabit mesnetli olacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney kapsamındaki kiriş numuneleri yükleme düzeneğinde yer alan mekanik pompa aracılığıyla 10 kN'luk artışlarla yüklenmiştir. 300 kN yük ölçüm kapasitesine sahip yük hücresi (Load Cell) yardımıyla yükleme değerleri ölçülmüştür. Hidrolik kriko yardımıyla aktarılan P büyüklüğündeki yük, iki destek yükleme kirişi aracılığıyla $P/2$ büyüklüğünde iki eşit tekil yük olarak kiriş numunelerine simetrik olarak iletilmiştir. Monotonik olarak yükleme yapılan her 10kN'luk yük artışı sonunda kısa bir süreliğine kiriş üzerinde oluşan çatlakların işaretlenmesi için beklenilmiştir. Kiriş numunelerinde meydana gelen deplasmanları ölçmek için kiriş orta bölgesine 580mm aralıklarla yerleştirilen iki adet potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. Numunelerin aldığı yük miktarı ve bu yükleme altındaki deplasmanlar bilgisayar destekli 8 kanallı veri toplama cihazı aracılığıyla kayıt altına alınmış ve eş zamanlı olarak yük-deplasman grafikleri bilgisayar ortamında çizilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği ($av/d=2.5$ ve $h=250mm$)



Şekil 3.2. Deney düzeneği ($a_v/d=4.9$ ve $h=250$ mm)



Şekil 3.3. Deney düzeneği ($a_v/d=3.3$ ve $h=360$ mm)

3.2. Deney Numuneleri

Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen düşey yük altındaki deneyler ile analiz sonuçları elde edilmiştir. Laboratuvar koşullarına uygun olarak tasarlanan kiriş numuneleri düşey yük altında test edilmiştir. Bu sayede MÇD uygulaması ile güçlendirilen kirişlerin kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ve kiriş yükseklik değişimi sonucunda kiriş davranışını nasıl etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır.

Tez çalışması kapsamında toplamda 17 adet $\frac{1}{2}$ geometrik ölçekli kiriş numunesine ait deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu numuneler, ön hasar almamış kirişler olup laboratuvar ortamında titizlikle hazırlanmıştır. Bu numunelerden 6 tanesi $a_v/d=2.5$ için 5 tanesi $a_v/d=4.9$ olan kirişlerin davranış değişimini incelemek için hazırlanmıştır. Diğer 6 numune ise $a_v/d=3.3$ olan ve kiriş geometrisindeki $h=360$ mm olduğunda MÇD

davranışındaki etkisini gözlemlemek için tasarlanarak laboratuvar ortamında üretilmiştir. Bu kirişlerin kıyası için Aksoylu ve ark., (2023) ve Uysal (2024) çalışmalarında hazırlanan 6 adet $a_v/d=3.3$ ve $h=250\text{mm}$ kirişler kullanılmıştır.

3.2.1. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı değişiminin araştırılması

Bu grup deneylerde kiriş geometrisi (125x250x2500mm) değiştirilmeden Aksoylu ve ark., (2023) ve Uysal (2024) çalışmalarında dikkate alınan $a_v/d=3.3$ olan 6 adet kiriş ile karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı $a_v/d=2.5$ (6 adet) ve $a_v/d=4.9$ (5 adet) için 11 adet kiriş deneyi düşey yükler altında test edilmiştir. Bu deneylerin listesi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. MÇD sayısının a_v/d ’ye göre değişimine bağlı olarak optimum MÇD sayısının tayini için kullanılan numuneler

Deney numuneleri (kesme açıklığı/faydalı yükseklik)		
$a_v/d=2.5$	$a_v/d=3.3$ (Aksoylu ve ark. 2023 ve Uysal, 2024)	$a_v/d=4.9$
N0.0/125-250/2.5	N0.0/125-250/3.3	N0.0/125-250/4.9
S1.7/125-250/2.5	S1.7/125-250/3.3	—
S2.0/125-250/2.5	S2.0/125-250/3.3	S2.0/125-250/4.9
S2.5/125-250/2.5	S2.5/125-250/3.3	S2.5/125-250/4.9
S3.0/125-250/2.5	S3.0/125-250/3.3	S3.0/125-250/4.9
S5.0/125-250/2.5	S5.0/125-250/3.3	S5.0/125-250/4.9

Çizelge 3.1’de görülen semboller aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Örneğin; “S2.5/125-250/3.3” numunesi için:

S2.5: S harfi, tek yönde dikiş olduğunu; 2.5 sayısı, dikiş aralığının yaklaşık $d/2.5$ olduğunu göstermektedir.

125-250: 125 sayısı, kirişin genişliğini (mm cinsinden); 250 sayısı kirişin yüksekliğini (mm cinsinden) göstermektedir.

3.3: 3.3 sayısı ise kirişte a_v/d oranının 3.3 olduğunu göstermektedir.

Örneğin N0.0/125-250/2.5 numunesi, referans numunenin kiriş genişliğinin 125mm, yüksekliğinin 250mm ve a_v/d oranının 2.5 olduğunu ifade etmektedir. Diğer bir örnek olarak S5.0/125-250/4.9 numunesinde, tek yönde 45° açıyla yerleştirilen mekanik dikişin, dikiş aralığının $d/5$ olduğunu, kiriş genişliğinin 125mm, yüksekliğinin 250mm ve a_v/d oranının 4.9 olduğunu belirtmektedir.

3.2.2. Kiriş yüksekliği değişiminin etkisinin araştırılması

Bu grup deneylerinde a_v/d oranı 3.3 alınarak ve $h=360\text{mm}$ kiriş yüksekliği kullanılarak kiriş geometrik yüksekliğinin optimum MÇD sayısına etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. 6 adet kiriş numunesi test edilmiş olup Aksoylu ve ark., (2023) ve Uysal (2024) çalışmalarında kullanılan 6 adet kiriş ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’te bu deneylerin listesi verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kiriş yüksekliği değişimine bağlı olarak optimum MÇD sayısının tayini için kullanılan numuneler

Deneyler (Kiriş yüksekliği $h=360\text{mm}$)	Deneyler (Kiriş yüksekliği $h=250\text{mm}$) (Aksoylu ve ark. 2023 ve Uysal, 2024)
N0.0/125-360/3.3	N0.0/125-250/3.3
S1.4/125-360/3.3	S1.4/125-250/3.3
S2.0/125-360/3.3	S2.0/125-250/3.3
S2.5/125-360/3.3	S2.5/125-250/3.3
S3.0/125-360/3.3	S3.0/125-250/3.3
S5.0/125-360/3.3	S5.0/125-250/3.3

Çizelge 3.3’teki semboller aşağıda açıklanmıştır.

Örneğin; “S2.5/125-360/3.3” numunesi için:

S2.5: S harfi, tek yönde dikiş olduğunu; 2.5 sayısı, dikiş aralığının yaklaşık $d/2.5$ olduğunu göstermektedir.

125-360: 125 sayısı, kirişin genişliğini; 360 sayısı kirişin yüksekliğini göstermektedir.

3.3: 3.3 sayısı ise kirişte a_v/d oranının 3.3 olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.4. Çalışma kapsamında dikkate alınacak kiriş numuneleri ($h=360\text{mm}$) ve güçlendirme detayları

Numune adı	$L=2500\text{ mm}$, $h=360\text{mm}$, $b=125\text{mm}$, $d'=35\text{mm}$, $d=325\text{mm}$, mesnet mesafesi= 100mm , beton dayanımı= $15\text{-}20\text{ MPa}$, etriye aralığı= 520mm , mekanik dikiş çapı= 6 mm , Delik çapı= 8mm , alt donatı $3\text{Ø}16$, üst donatı $2\text{Ø}12$	$a_v/d=3.3$
N0.0/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$
S1.4/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$
S2.0/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$
S2.5/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$
S3.0/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$
S5.0/125-360/3.3		$a_v/d=3.3$

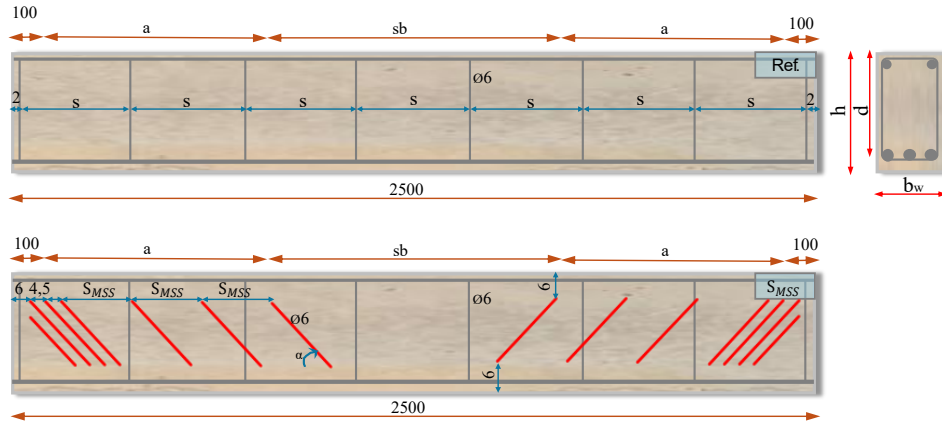
3.3. Deney Numunelerinin Boyutlandırılması

Bu çalışmada kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin mekanik dikişlerle güçlendirilmesi için $\frac{1}{2}$ ölçekli iki tip kiriş üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranının mekanik dikişlere etkisini araştırmak için $a_v/d=2.5$ ve $a_v/d=4.9$ deneylerinde kullanılması için $125 \times 250 \times 2500\text{mm}$ boyutlarında 11 adet kiriş hazırlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde kiriş geometrisinde yükseklik değişiminin etkisini araştırmada kullanılması için

125x360x2500mm 6 adet kiriş hazırlanmıştır. Kirişlerde kesme kapasitesinin yetersiz kalması için Ø6/350mm ve Ø6/520mm etriyeler kullanılmıştır. Etriye kancaları 90° açı ile bükülmüştür. Tezin amacına uygun olarak mekanik dikişlerin kesme kapasitesine katkısını incelemek için eğilme kapasitesi maksimum seviyede tutulmuştur.

3.4. Deney Numunelerinin Detaylandırılması

Üretilen tüm kiriş numunelerinde kiriş alt bölgesine 3Ø16 çekme donatısı ve kiriş üst bölgesine 2Ø12 basınç donatısı yerleştirilmiştir. Kirişlerde kullanılan bu donatılara bağlı olarak, kiriş yüksekliği 250mm kiriş yüksekliğine sahip olan numunelerde çekme donatısı oranı $\rho=0.0224$ ve basınç donatısı oranı $\rho'=0.0084$ iken, 360mm kiriş yüksekliğine sahip olan numunelerde çekme donatısı oranı $\rho=0.0148$ ve basınç donatısı oranı $\rho'=0.0056$ olarak belirlenmiştir. 250 mm yüksekliğindeki deney numunelerinde kullanılan boyuna donatı oranı($\rho-\rho'=0.014$), dengeli donatı oranına ($\rho-\rho'<\rho_b=0.0138$) yaklaşık eşit iken; 360 mm yüksekliğindeki numunelerde bu oran ($\rho-\rho'=0.0092$) dengeli donatı oranından ($\rho-\rho'<\rho_b=0.0138$) daha düşüktür. Ayrıca, her iki gruptaki kiriş numunelerinde kullanılan boyuna donatı oranı, minimum donatı ($\rho_{min}=0.004$) oranından daha büyüktür. Kesme kapasitesinin yetersiz olması istendiğinden dolayı kiriş numuneleri 350mm aralıklarla Ø6 çapındaki nervürlü etriyeler ile donatılmıştır. Kiriş numuneleri beton için hazırlanırken donatılara 35mm pas payı yerleştirilmiştir. Şekil 3.4'te kesme açıklığı a_v , yükleme noktaları arası açıklık s_b , kiriş genişliği b_w , kiriş yüksekliği h , kiriş faydalı yüksekliği d , etriye aralığı s , mekanik dikiş aralığı S_{MSS} , mekanik çelik dikişin yatayla yaptığı açı α ile gösterilmiştir.



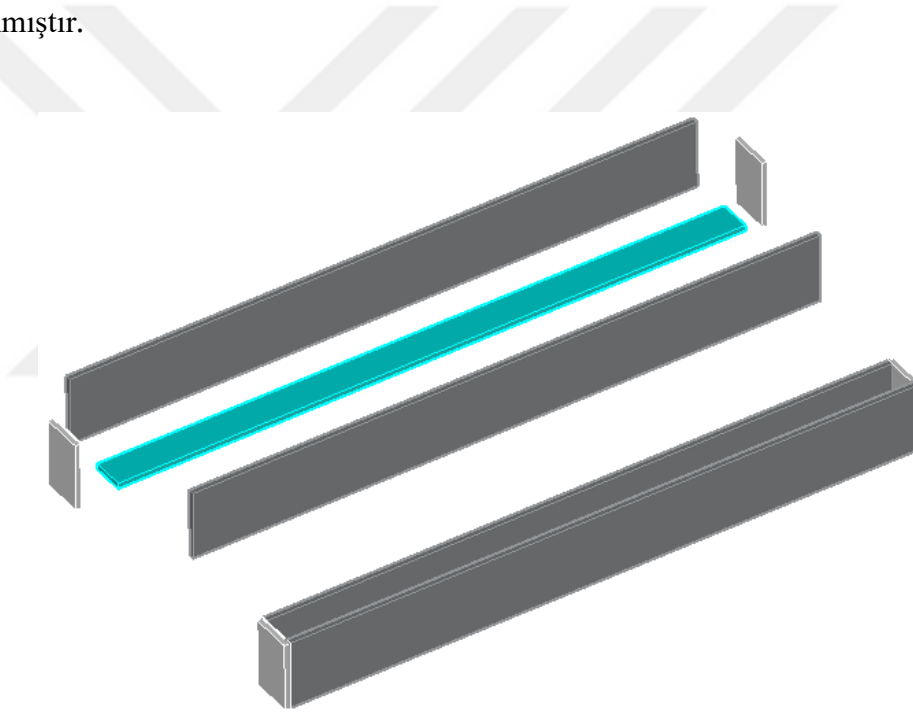
Şekil 3.4. Deney numunesi detay görünümü

3.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney sonuçlarının doğru karşılaştırılması amacı ile kiriş numuneleri hazırlanırken tüm kirişlerin aynı mekanik özelliklerde olmasına dikkat edilmiştir.

3.5.1. Kalıp hazırlanması

Kesilmiş olan plywood parçaları, kalıp yanları ve altı için belirlenen ölçülere uygun olarak hazırlanmıştır. Daha sonra parçalar vidalarla şarjlı matkap kullanılarak birbirlerine montajlanmıştır (Şekil 3.5.). Beton dökümünden önce, kalıpların iç yüzeyleri kalıp yağı ile yağlanarak betonun sertleştikten sonra kalıptan kolayca ayrılması sağlanmıştır.



Şekil 3.5. Kalıpların hazırlanması ve montajı

3.5.2. Donatıların hazırlanması

İki farklı boyutta deney kirişi için, çekme ve basınç bölgelerinde farklı çaplarda donatılar kullanılmıştır. İlk olarak, 125x250x2500mm boyutlarına sahip deney kirişleri için çekme bölgesinde 3 adet Ø16 (603.19mm² kesit alanı) donatı ve basınç bölgesinde ise 2 adet Ø12 (226.19mm² kesit alanı) donatı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kesme kapasitesinin yetersiz olması için, Ø6 çapındaki nervürlü etriyeler, her 350mm'de bir olmak üzere toplamda 8 adet olarak uygulanmıştır.

İkinci olarak, 125x360x2500mm boyutlarına sahip diğer deney kirişleri için de aynı prensiple hareket edilmiştir. Çekme bölgesinde 3 adet Ø16 ve basınç bölgesinde 2 adet Ø12 donatı kullanılmıştır. Yine kesme kapasitesinin artırılması için Ø6 çapındaki nervürlü etriyeler, 520mm aralıklarla 8 adet olarak yerleştirilmiştir.

Etriye açıları, güncel yönetmeliklere uygun olmayan ancak eski uygulamalarda yaygın olarak karşılaşılan 90° olarak uygulanmıştır. Pas payı için 35mm'lik plastik aparatlar kullanılmıştır. Pas payları beton dökümünden önce, donatılara yanlarda ve altta yeterli miktarda konularak donatıların beton içerisinde doğru konumda olması sağlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Donatı hazırlama aşaması



Şekil 3.7. Donatıların kalıplara yerleştirilme aşaması

3.5.3. Beton

Hedef beton basınç dayanımı 15-20 MPa olan beton karışımı, laboratuvar ortamında betoniyer yardımıyla hazırlanmıştır. Bu süreçte kullanılan en büyük agrega çapı 12mm olarak belirlenmiştir. Ancak betoniyer hacminin sınırlı olması nedeniyle, her bir kiriş için ayrı hazırlık aşamaları gerçekleştirilip ayrı ayrı beton dökümleri yapılmıştır (Şekil 3.8).

Yağlanan kalıplara dökülen betonun homojen olarak yayılması ve betonun içindeki hava kabarcıklarını çıkararak betonun sıkıştırılması için vibratör kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Kalıplara beton dökülme aşaması



Şekil 3.9. Betonun dökümü sırasında vibratör uygulaması

3.6. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri

3.6.1. Beton

Beton hazırlama süreci elle yapıldığı için betonun basınç dayanımını belirlemek için gerekli olan testler Konya Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. İncelenen kiriş numunelerinin beton dayanımlarını belirlemek için 6 adet silindir ve 8 adet küp beton numunesi alınmıştır.

Silindir numuneler için 150mm çapında ve 300mm yüksekliğinde hazır kalıplar ve küp numuneler için ise 150x150x150mm (Şekil 3.10) boyutundaki hazır kalıplar kullanılmıştır. Beton kalıplara dökülmeden önce, kalıp içleri yağlanmıştır.

Alınan numunelerin, 15. ve 22. günlerde eksenel basınç testi TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.11 Şekil 3.12). Bu testler sonucunda, betonların dönüştürülmüş silindir basınç dayanımları sırasıyla 14,78 MPa ve 16,43 MPa elde edilmiştir. 22. gün elde edilen 16,43 MPa değeri, çalışma amacına uygun hedef beton basınç dayanımını sağladığı için kiriş deneyleri de aynı gün gerçekleştirilmiştir. Bu değerler, betonun belirli bir süre içinde gelişen dayanımını göstermekte olup belirli bir beton sınıfının gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için önemlidir.



Şekil 3.10. Küp kalıplarının yağlanması ve betonun dökülmesi



Şekil 3.11. Küp ve silindir numuneleri



Şekil 3.12. Küp ve silindir numunelerinin kırım aşaması

3.6.2. Donatı

Deney kirişlerinin üretim sürecinde, çeşitli çaplarda    farklı donatı kullanılmıştır: Bunlar sırasıyla 6 mm, 12 mm ve 16 mm şeklindedir. Kirişin  ekme bölgesinde 3 adet

Ø16 donatı ve basınç bölgesinde ise 2 adet Ø12 donatı kullanılmıştır. Boyuna donatıların uç kısımlarında düz olarak bırakılmış gönye yapılmamıştır. Kesme kapasitesinin yetersiz olması amacıyla, Ø6/350 mm aralıklarla etriyeler yerleştirilmiştir. Deney numunelerinin vinç ile taşınabilmesi için Ø8 çapında taşıma kancaları oluşturulmuştur. Donatıların çekme testleri TS 708 ve TS EN ISO 15630-1 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Test sonuçları Çizelge 3.5’te sunulmuştur.

Kiriş numunelerinde istenen beton örtüsü kalınlığını sağlamak için, kirişin alt bölgesinde 35 mm olacak şekilde plastik beton pas payı aparatları kullanılmıştır.

Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan donatıların çekme testi sonuçlar

Donatı Çapı (mm)	Ort. Akma Dayanımı (MPa)	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)
6	488	712
12	500	601
16	494	597

3.6.3. Epoksi

Çalışmada mekanik dikiş uygulaması yapılırken ankrajlarda TS EN-1504-3 standardına uygun olan “Kimyasal dübel F.1311” epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.13). İki bileşenli yüksek kaliteye sahip kimyasal ankraj epoksileri, sarkma yapmayan macun kıvamında, mekanik mukavemeti yüksek olmasından dolayı uygulamada hızla mukavemet kazanan, çok hızlı sertleşen ve priz alma özelliğine sahiptir. Ayrıca uygulama kolaylığı sayesinde işçilikten kazanç sağlamaktadır. Epoksi malzemesi, iki bileşeni tüpten dışarıya karışmış şekilde çıkmasını sağlayan tabanca uçları kullanılarak uygulanmıştır.



Şekil 3.13. Dubell-F.1311 epoksi türü

Çizelge 3.6. Epoksinin (Dubell F.1311) özellikleri

Basınç Dayanımı	8,2N/mm ²
Klorür İyonu İçeriği	0,0056%
Yangına Tepki	E sınıfı
Parlama Noktası	33°C
Özgül Ağırlığı	1,57gr/m ³
Renk	Gri
Hacim	345ml
Muhafaza Süresi	18 Ay

3.7. Mekanik Dikiş Uygulaması

Mekanik dikiş uygulaması yapılacak olan kirişler için ilk olarak yüzey temizliği yapılmıştır. Güçlendirme yapılacak olan bölgeye yeterli uzunlukta U şeklinde çelikler bükülmüştür (Şekil 3.14.). Kiriş üzerinde MÇD delik noktaları, kirişin alt ve üstünden 60 mm olacak şekilde yani alt ve üst boyuna donatının arasında kalacak şekilde işaretlendikten sonra, Şekil 3.15'te görüldüğü gibi matkap yardımıyla 60mm derinlikte Ø8 çapında ankraj delikleri açılmıştır. Güçlendirme için Ø6 çapındaki transmisyon çelikler tercih edilmiştir (Çizelge 3.7) MÇD'lerin kiriş içerisindeki ankraj boyu, sıyrılmanın önlenmesi için yeterli uzunluk (ankraj çapının 10 katı) olan 60 mm (10Ø) olarak 45° açı ile uygulanmıştır. 45° açı ile uygulanmasının sebebi kesme çatlaklarını dik keserek ani kırılmanın oluşmasını engellemektir. Açılan deliklerde biriken tozdan dolayı mekanik dikişler yerleştirilmeden önce basınçlı hava yardımıyla deliklerin içleri temizlenmiştir. Bu temizleme aşaması epoksi, beton ve mekanik dikiş arasındaki aderansı önemli ölçüde etkilediği için titizlikle yapılması gerekmektedir.

Çizelge 3.7. Transmisyon çelik çekme test sonuçları

Donatı Çapı (mm)	Akma Dayanımı, f_y (MPa)		Maksimum Çekme Dayanımı, f_{su} (MPa)	
	Ölçülen	Ortalama	Ölçülen	Ortalama
6	484	488	726	712
	497		703	
	483		708	



Şekil 3.14. Mekanik dikişlerin U şeklinde bükülmesi



Şekil 3.15. Ankraj deliklerinin açılması ve temizlenmesi

Matkap ile açılan delikler temizlendikten sonra MÇD'lerin uçlarının bağlanması için iki bileşenli polyester bazlı Dubell-F.1311 marka epoksi malzemesi ile delikler doldurulmuştur (Şekil 3.16.). Bu işlem için epoksi tabancası ve iki bileşenli epoksi malzemesinin karıştırılmasını sağlayan epoksi karıştırıcı uçlar kullanılmıştır. Delikler epoksi ile doldurulduktan sonra epoksinin hızlı priz almasından dolayı hızlıca mekanik dikişler deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3.17.). Epoksi ürün kullanım kılavuzu dikkate alınarak kür alması için 1 gün boyunca oda sıcaklığında (yaklaşık 22 °C) bekletilmiştir. Şekil 3.18'de güçlendirilmiş kiriş numunesi deneyler için hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.16. Temizlenen ankraj deliklerinin epoksi ile doldurulması



Şekil 3.17. Mekanik dikişlerin deliklere yerleştirilmesi



Şekil 3.18. Mekanik dikişlerin uygulanması

3.8. Deneysel Çalışma

Bu tez çalışmasında deneye tabii tutulan kiriş geometrik ölçüleri 125x250x2500mm ve 125x360x2500mm'dir. Kirişlerin tasarımında çekme bölgesinde 3Ø16, basınç bölgesinde 2Ø12 donatılar kullanılmıştır. Etriye aralığı Ø6/350mm ve Ø6/520mm olarak uygulanmıştır. Pas payı alttan ve yanlardan 35mm olarak uygulanmıştır. Çalışma kapsamında mekanik dikişler kiriş üzerine 45° açı ile uygulanmıştır. Kiriş içerisine giren ankraj uzunluğu olarak ise MÇD çapının 10 katı yani 60mm olarak uygulanmıştır. Mekanik dikiş uygulamasında öncelikle matkap yardımıyla delikler açılarak ve içerisindeki toz temizlendikten sonra epoksi ile transmisyon çeliğin kirişin karşılıklı her iki yüzeyine ankraj edilmesi sağlanmıştır. Güçlendirme yapılacak kirişlerde mekanik dikiş (MÇD) olarak 6mm çapına sahip transmisyon çeliği kullanılmıştır. Tüm deney kirişlerinde mekanik dikişler kiriş uç bölgesinden yükleme noktasına kadar ki 100 cm'lik mesafeye yerleştirilmiştir. İlk mekanik dikiş kiriş uç bölgesinden 15 cm uzaklıktaki noktada başlatılmıştır.

a_v/d oranı 2.5 ve 4.9 ($a_v=54\text{cm}$ ve $a_v=105\text{cm}$) olan deney serisi ve yüksekliği (h) değiştirilmiş deney serileri için denge altı sünek tasarıma sahip yetersiz kesme donatılı referans kirişler üretilerek standartlara uygun dört noktalı yükleme altında test edilmiştir.

Deney anında kontrollü yükleme yapılabilmesi için 10kN'luk yük artışları yapılmıştır. Her aşamada belli bir süre beklenerek meydana gelen çatlaklar işaretlenmiştir. Kiriş elemanının sünekliği gözlenirken kırılma meydana geldiğinde deney sonlandırılmıştır. Deneyler sırasında 8 kanallı veri okuma sistemi kullanılarak yük ve yer değiştirme okumaları yapılmıştır. Deneylerde kiriş ortasına 300kN kapasiteli yükölçer yerleştirilmiştir. Deney sırasında yer değiştirmenin doğru ölçülebilmesi için Potansiyometrik cetveller 580mm aralıklarla 2 adet yerleştirilmiştir. Elde edilen verilere dayanarak yük-deplasman eğrileri oluşturulmuştur. Deney numunelerinden elde edilen verilerle bir excel tablosu hazırlanmış ve buna göre süneklikleri (Bölüm 3.8.1), enerji yutma kapasiteleri (Bölüm 3.8.2), akma ve maksimum rijitlikleri (Bölüm 3.8.3) ve maksimum yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

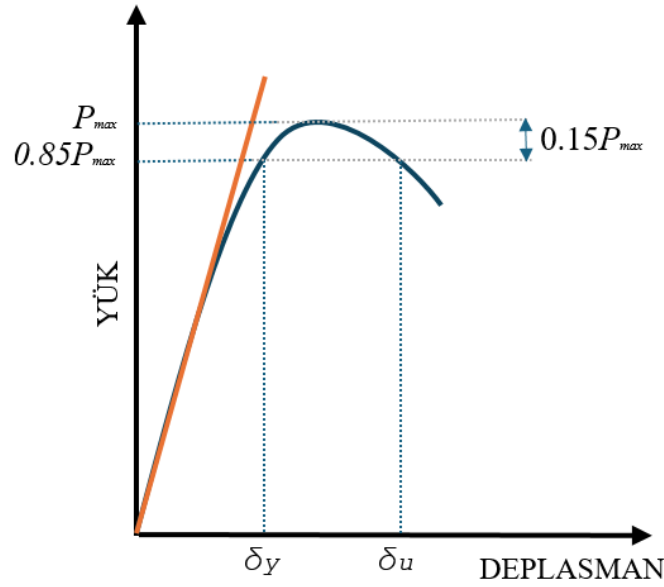
3.8.1. Süneklik

Elastik olmayan davranışın temel özelliği olan süneklik, taşıyıcı sistem elemanlarının büyük deformasyonlar yapabilme yeteneğiyle ilgilidir. Süneklik katsayısı

(μ), bir yapı elemanının bu sünek davranışını nicel olarak ifade eder. Örneğin, denge altı tasarıma sahip betonarme bir kirişin sünek davranış sergilemesi için, süneklik katsayısının 4 ila 5 arasında olması gerektiği belirtilmiştir (Wang ve Belarbi, 2013).

Süneklik katsayısı, nihai deplasman ile akma noktasındaki deplasman arasındaki oran olarak hesaplanır. Nihai deplasman, maksimum yük seviyesine ulaşıldıktan sonra yük seviyesinin %15 oranına kadar düştüğü noktadaki deplasman değeridir. Akma noktasındaki deplasman ise, yük değerinin maksimum seviyesinin %85'ine ulaşıldığında kaydedilen elastik deplasman değerini ifade eder.

Süneklik katsayısı, (δ_u) ise kopma anındaki deplasman değerinin (δ_y) akma anındaki deplasman değerine oranıdır ($\mu = \delta_u / \delta_y$). Burada, (δ_y) akma anındaki deplasman değerini (δ_u) kopma anındaki ($0.85P_{max}$) deplasman değerini temsil etmektedir (Naaman ve Jeong, 1995; Yang ve ark., 2010).



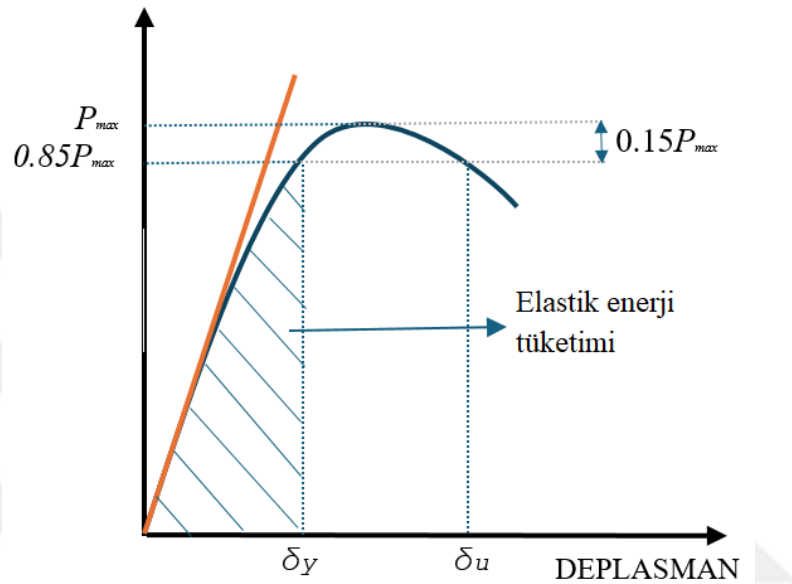
Şekil 3.19. Süneklik katsayısı için yük-deplasman grafiği

3.8.2. Enerji yutma kapasitesi

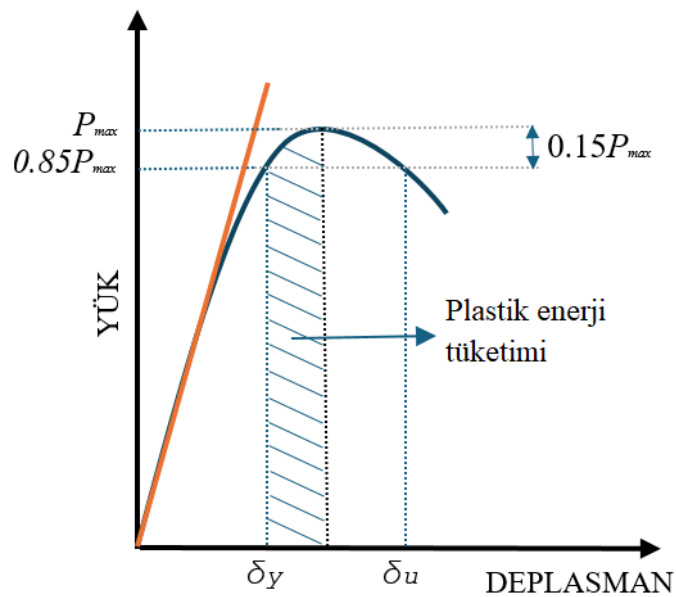
Betonarme elemanların enerji tüketme kapasiteleri, yük-deplasman eğrisi altında kalan alanların birikimli olarak hesaplanmasıyla belirlenir. Her deney numunesi için enerji yutma/tüketme kapasitesi akma noktası için Şekil 3.20'de ($E_{elastik}$), plastik seviyedeki için Şekil 3.21'de ($E_{plastik}$) ve maksimum yük değerinde (E_{max}) ise Şekil 3.22'deki gibi ayrı ayrı hesaplanır. Elastik enerji tüketimi için, malzeme akma noktasına kadar gerilim altında kaldığında eğri altındaki alan hesaplanır (Şekil 3.20). Maksimum

enerji tüketimi için ise, numunenin maksimum yük değerine kadar maruz kaldığı enerji toplanır (Liu ve Dai, 2021).

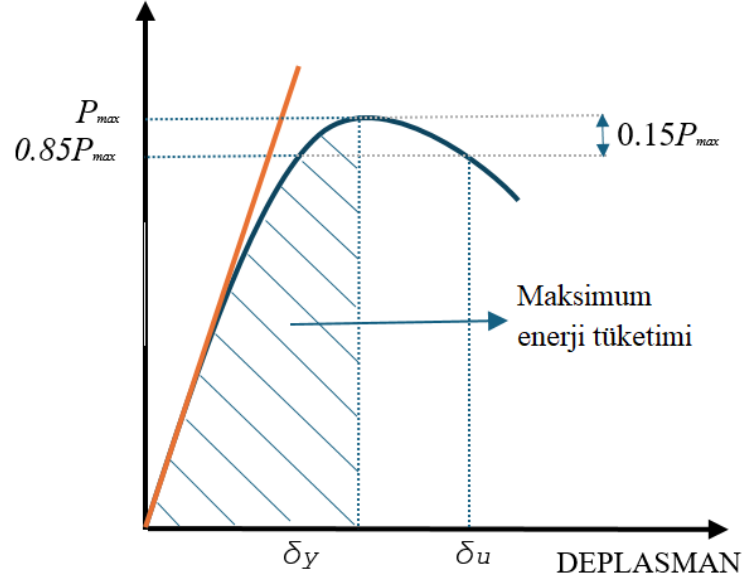
Numunelerin tamamı ani kesme hasarı nedeniyle göçtüğünden, plastik enerji tüketimi hesaplanırken maksimum yük seviyesinden %15'e kadar olan bölüm dikkate alınmaz. Bu, yapısal bütünlüğün ani kırılma sonrası önemli olmayacağı düşünüldüğünde uygun görülür (Saatci ve Vecchio, 2009).



Şekil 3.20. Elastik enerji yutma kapasitesi grafiği



Şekil 3.21. Plastik enerji yutma kapasitesi grafiği



Şekil 3.22. Maksimum yükteki enerji yutma kapasitesi grafiği

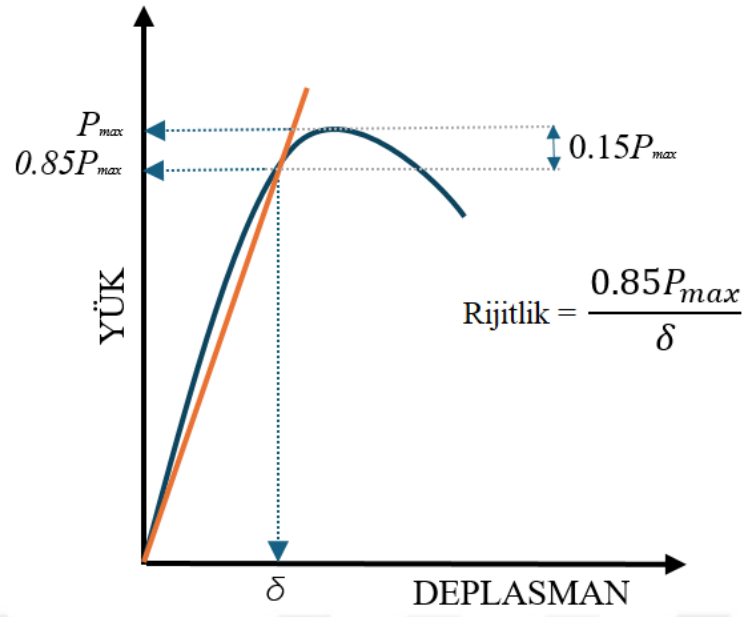
3.8.3. Rijitlik

Rijitlik (δ), bir yapı elemanının dış kuvvetler altında meydana gelen deformasyonlara karşı gösterdiği direnci tanımlar. Başka bir ifadeyle, yapı üzerine uygulanan yükler altında yapının pozisyonunu koruması ve dengede kalabilmesi olarak da düşünülebilir.

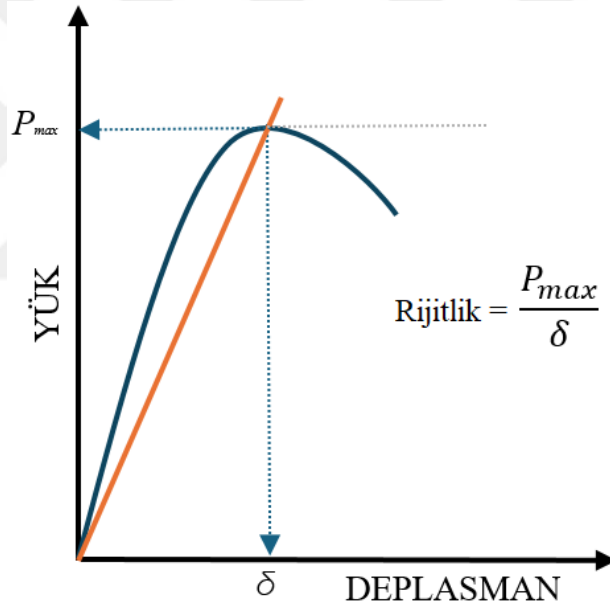
Bu çalışma kapsamında, deney elemanları için rijitlik değerleri yük-deplasman eğrileri kullanılarak elde edilmiştir. Rijitlik değerleri, akma noktasında ve maksimum yük seviyesinde hesaplanarak incelenmiştir.

Akma noktasındaki rijitlik değeri (Şekil 3.23), akma başlangıç noktası olarak kabul edilen noktadan ($0.85P_{max}$) çizilen doğrunun eğimiyle hesaplanmıştır. Bu, aynı zamanda akma noktasındaki yük değerinin akma deplasman değerine oranını ifade eder.

Maksimum yükteki rijitlik değeri ise, orijin noktasından maksimum yük noktasına (P_{max}) çizilen doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.24). Başka bir deyişle, maksimum yük değerinin bu yüke karşılık gelen deplasman değerine oranı olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.23. Akma rijitliği grafiği



Şekil 3.24. Maksimum yükteki rijitlik grafiği

4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneyisel çalışmada, toplam 17 adet kiriş numunesi dört noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Bu numunelerden 3 tanesi referans kesme kirişi olarak kullanılmış, 14 tanesi ise MÇD yöntemi ile güçlendirilmiştir. Deneyisel çalışmadaki numunelerin detayları ve isimleri Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilmiştir. Çalışmada, düşey yük altında kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ve kiriş kesit yüksekliği değişken parametreler olarak belirlenmiş ve bunların dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneyisel çalışmada elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılması ve karşılaştırılabilmesi için, her deney elemanına ait grafikler ve şekiller aşağıda belirtilen sırayla sunulmuştur:

- Göçme durumuna geçene kadar olan çatlak oluşum aşamaları
- Yük-deplasman grafiği
- Göçmeden sonraki detaylı hasar durumları
- Her bir deneyin sonuçları verildikten sonra, tüm deney elemanları için karşılaştırma yapılarak dayanım, süneklik, rijitlik, enerji tüketim kapasiteleri ve göçme durumları açısından değerlendirmeler yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Bu bölümde sunulan sonuçlar, a_v/d oranı ve kiriş kesit yüksekliği için ayrı ayrı ele alınmıştır. İlk olarak, a_v/d oranının incelendiği grup deneylerine yer verilmiş, ardından kiriş yüksekliğinin incelendiği deney grubu sunulmuştur. Sonrasında, bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneylerin bireysel sonuçları ve bu sonuçların karşılaştırmalı değerlendirmeleri farklı başlıklar altında ele alınmıştır.

4.1. Kesme Açıklığı/Faydalı Yükseklik (a_v/d) Oranı Değişimi

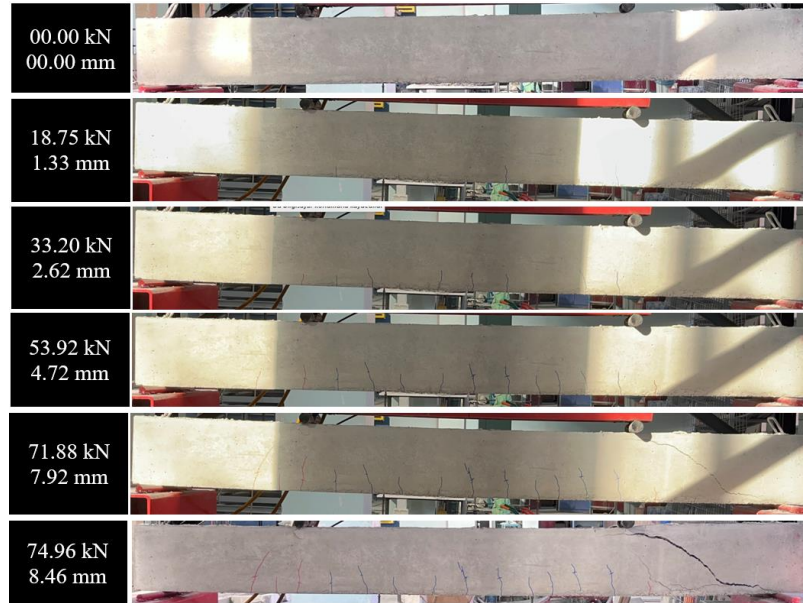
Bu deney grubunda, deney kirişlerinin geometrisi (125×250×2500mm), beton basınç dayanımı 15-20MPa arasında olan, çekme donatısı (3Ø16) ve enine donatı (Ø6/350mm) sabit parametreler olarak dikkate alınmıştır. Kirişlerde yalnızca kesme açıklığı (a_v) değişimine bağlı olarak kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ($a_v/d=2.5$; $a_v/d=4.9$) değiştirilmiştir. Kesme kapasitesi yetersiz olan bu deney kirişlerinde, kesme açıklığına ($a_v=540$ mm ve 1050mm) uygulanması gereken optimum MÇD sayısı

araştırılmıştır. Bu kapsamda, $a_v/d=2.5$ için bir referans ve 5 güçlendirilmiş kiriş numunesi ile toplam 6, $a_v/d=4.9$ için ise bir referans ve 4 güçlendirilmiş kiriş numunesi ile toplam 5 kiriş test edilmiştir.

Çalışma kapsamında $a_v/d=2.5$ ve 4.9 için elde edilen sonuçlar, bu tez çalışması kapsamındaki verilerin ilk aşamasını oluşturan Uysal (2024) tez çalışmasında, $a_v/d=3.3$ için yaptığı bir referans ve 5 güçlendirilmiş olmak üzere toplam 6 kiriş deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Yani bu grupta toplam 11 deney yapılmış ve Uysal (2024) çalışmasındaki 6 adet deney ile de karşılaştırılmıştır.

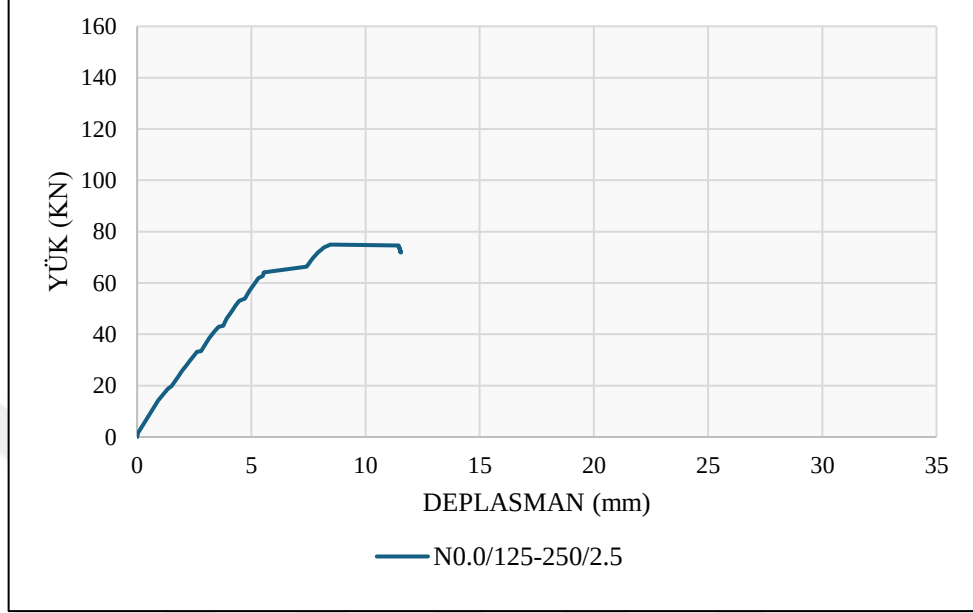
4.1.1. N0.0/125-250/2.5 numunesi

Bu tez çalışmasında, ilk numune kiriş kesme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla referans kiriş olarak test edilmiştir (Şekil 4.1). Referans kiriş numunesi, N0.0/125-250/2.5 olarak adlandırılmıştır. N0.0/125-250/2.5 kiriş numunesi, 18.75 kN yük seviyesine geldiğinde kiriş orta bölgesinde ilk eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Bu yük değerine karşılık gelen deplasman değeri 1.33 mm olarak kaydedilmiştir. Yükün artmasıyla eğilme ve kesme çatlakları artarak devam etmiştir. Kiriş numunesi 74.96 kN yük ve 8.46 mm deplasman değerine geldiğinde kiriş sağ kesme açıklığında gevrek kırılma ile eğik çekme çatlağı oluşmuş ve kesme hasarından göçmüştür.

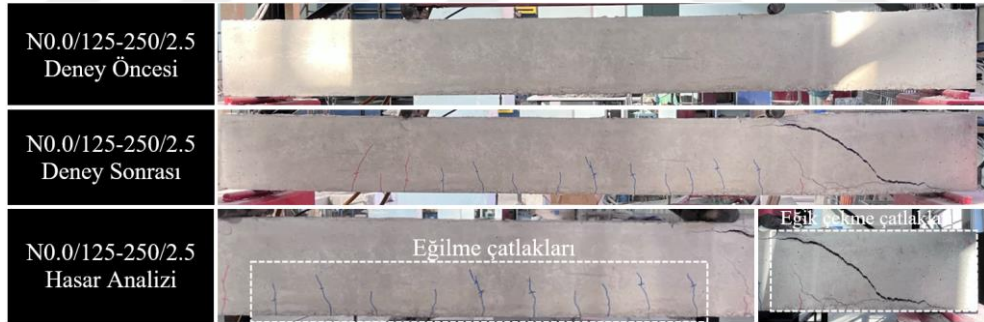


Şekil 4.1 N0.0/125-250/2.5 referans kirişinin deney aşamalarında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)

Referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Kiriş numunesinde maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra meydana gelen kesme hasarı görselleri Şekil 4.3’te tüm aşamaları ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2 N0.0/125-250/2.5 referans kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)

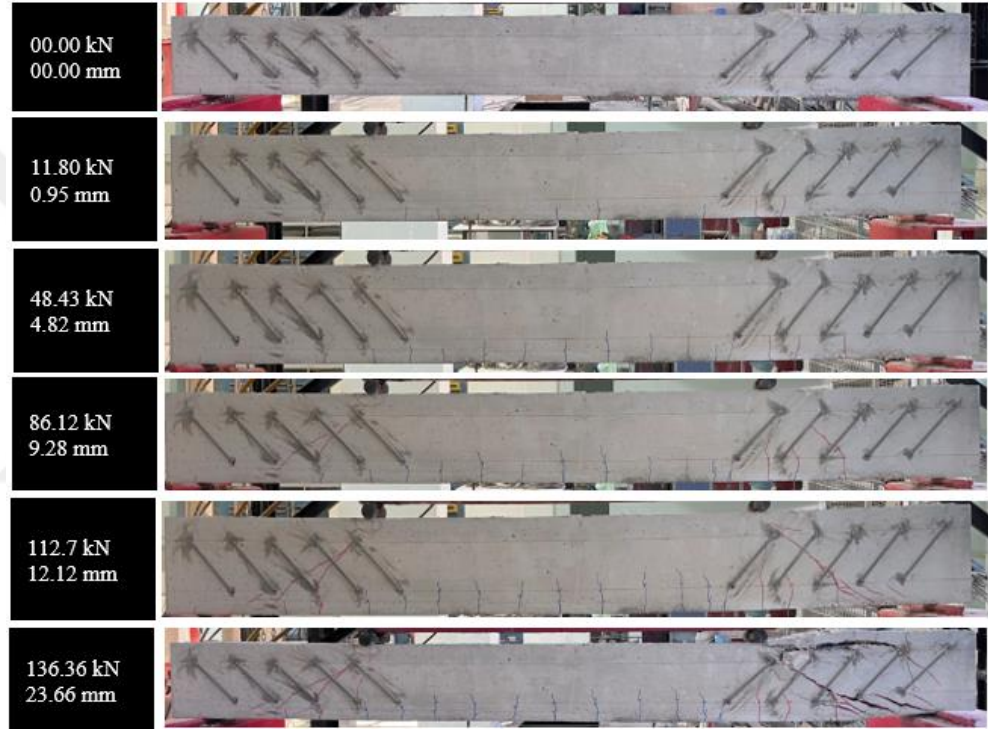


Şekil 4.3. N0.0/125-250/2.5 referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

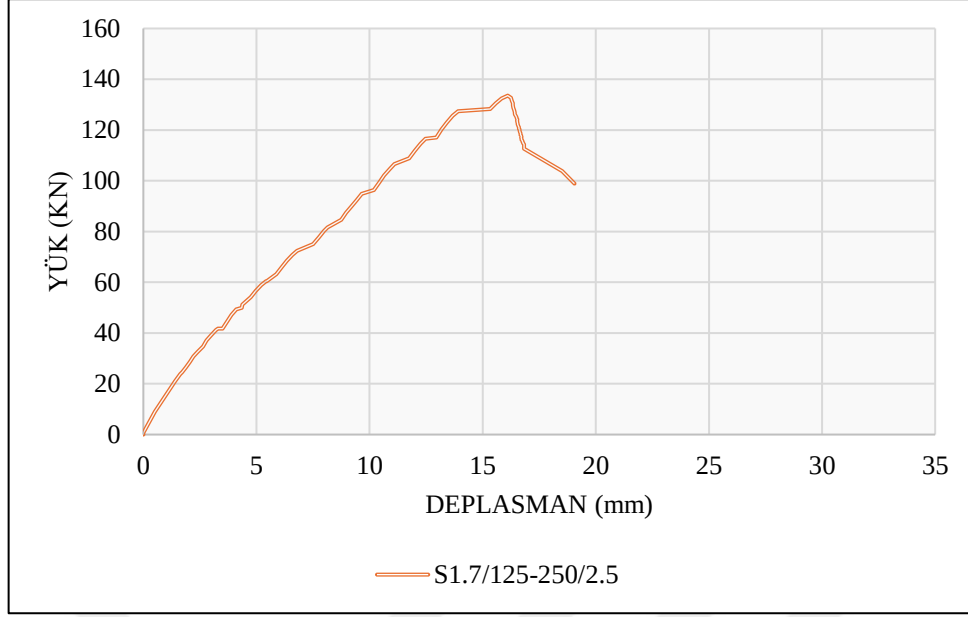
4.1.2 S1.7/125-250/2.5 numunesi

S1.7/125-250/2.5 numunesi, 130 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 5 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 11.80 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 0.95 mm olduğunda ilk eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Ayrıca, bu aşamada numunenin mesnet bölgelerinde ilk kesme çatlakları da oluşmuştur. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 133.54 kN değerine

ulaştığında deplasman miktarı 21.32 mm olarak ölçülmüş ve sağ mesnet bölgesinde gevrek kırılma olan eğik çekme çatlağı oluşmuş ve kesme hasarından göçme meydana gelmiştir. Bu kirişte ayrıca kirişin üst bölümünde basınç donatıları burkularak betonun yarılmasına ve kabuk betonun atmasına yol açmıştır. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesi referans numune baz alınarak hesaplanmıştır. Yük taşıma kapasitesinde %78'lik bir artış meydana gelmiştir. S1.7/125-250/2.5 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.4'te yük-deplasman eğrisi Şekil 4.5'te ve kiriş hasar analizi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. S1.7/125-250/2.5 kiriş deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.5. S1.7/125-250/2.5 numunesi yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)

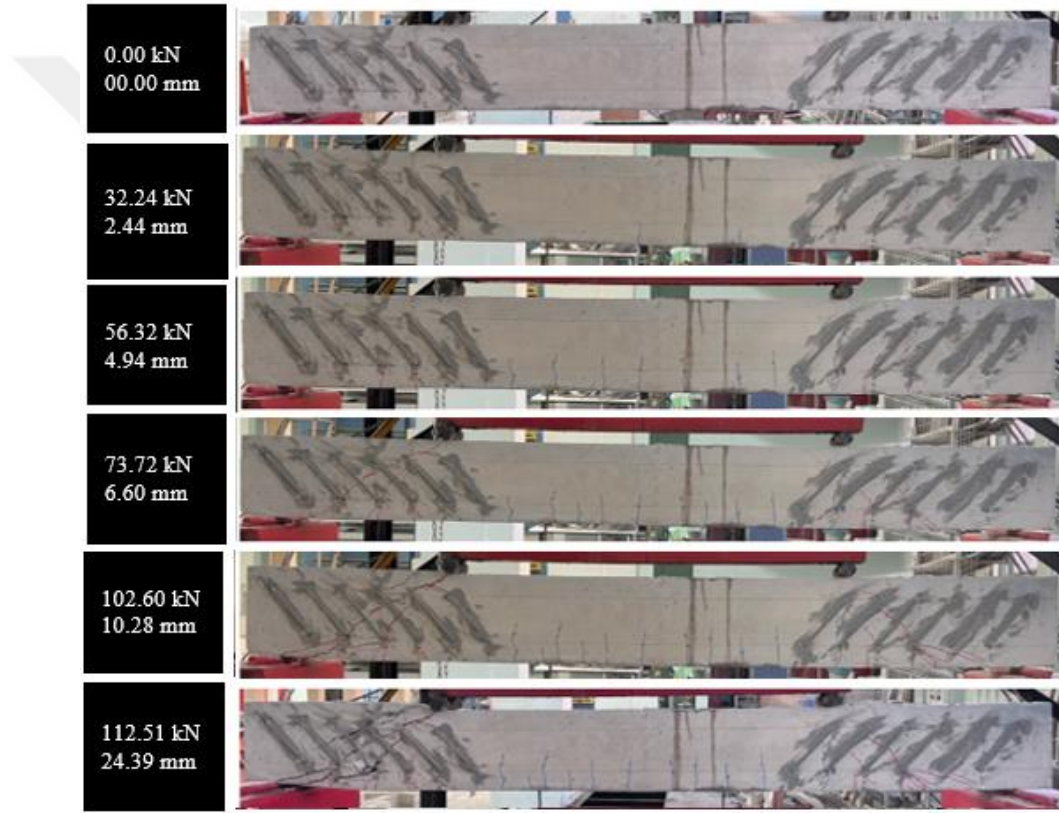


Şekil 4.6. S1.7/125-250/2.5 deney kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

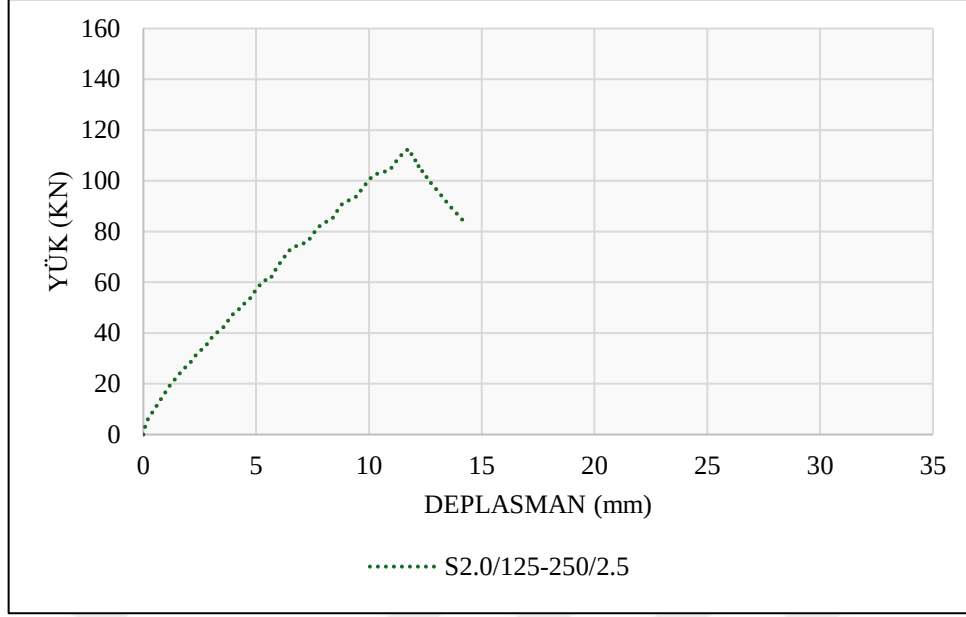
4.1.3. S2.0/125-250/2.5 numunesi

S2.0/125-250/2.5 numunesi, 110 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 6 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 33 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 2.52 mm olduğunda ilk eğilme çatlakları sağ kesme açıklığına yakın bölgede meydana gelmiştir. Daha sonra, yük 40 kN'a ulaştığında ve 3.25 mm deplasman kaydedildiğinde ilk kesme çatlakları da sağ kesme açıklığında oluşmuştur. Bu sırada, orta bölgenin sol yükleme noktasına yakın olduğu bölgede eğilme çatlakları

gözlemlenmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 112.51 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 24.39 mm olarak ölçülmüş ve sol kesme açıklığında kısmi kemer davranışı oluşarak basınç payandası gibi davranmıştır. Bu nedenle basınç payandasının sağında ve solunda birden fazla asal çekme çatlağı oluşmasıyla kesme göçmesi meydana gelmiştir. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney sırasında, ankrajlarda herhangi bir sıyrılma olmamıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %50.4'lük bir artış meydana gelmiştir. S2.0/125-250/2.5 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.7'de, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.8'te ve kiriş hasar analizi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 2.0/125-250/2.5 kirişinin deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.8. S2.0/125-250/2.5 kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)

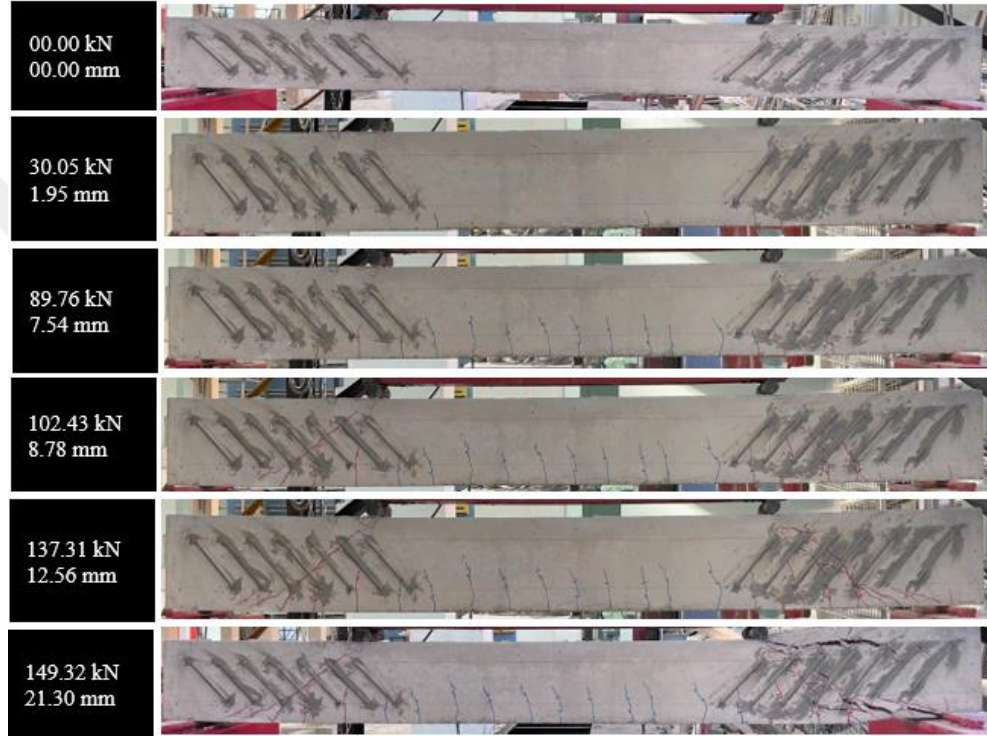


Şekil 4.9. S2.0/125-250/2.5 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

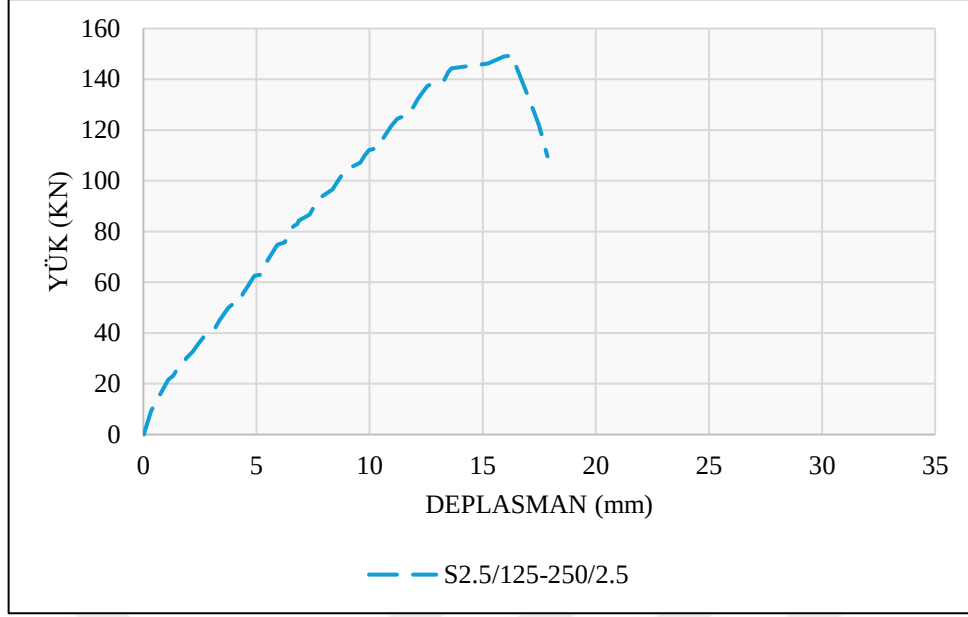
4.1.4. S2.5/125-250/2.5 numunesi

S2.5/125-250/2.5 numunesi, 90 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 7 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 30.05 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.95 mm olduğunda ilk eğilme kiriş orta bölgesinde meydana gelmiştir. Daha sonra, yük 52.18 kN'a ulaştığında ve 4.05 mm deplasman kaydedildiğinde ilk kesme çatlakları da sağ ve sol kesme açıklığında oluşmuştur. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 149.32 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 21.30 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında eğik çekme

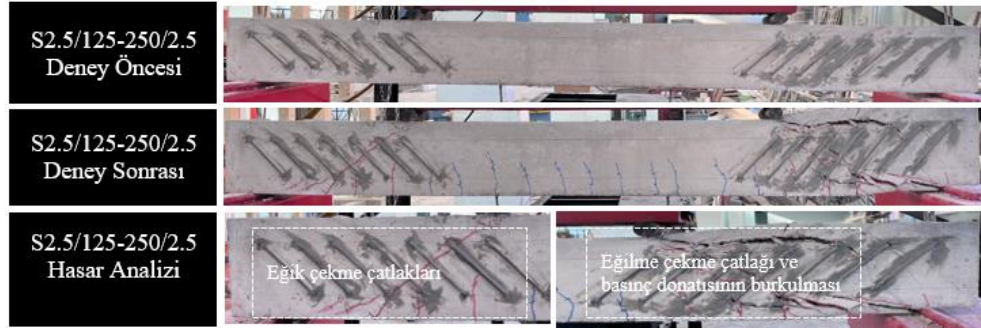
çatlağı oluşmuş ve kesme hasarından göçme meydana gelmiştir. Bu kirişte ayrıca kirişin üst bölümünde basınç donatıları burkularak betonun yarılmasına ve kabuk beton atmasına yol açmıştır. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney sırasında, MÇD ankrajlarda herhangi bir sıyrılma olmamıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %86'lık bir artış meydana gelmiştir. S2.5/125-250/2.5 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.10'da, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.11'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. 2.5/125-250/2.5 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.11. S2.5/125-250/2.5 kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)

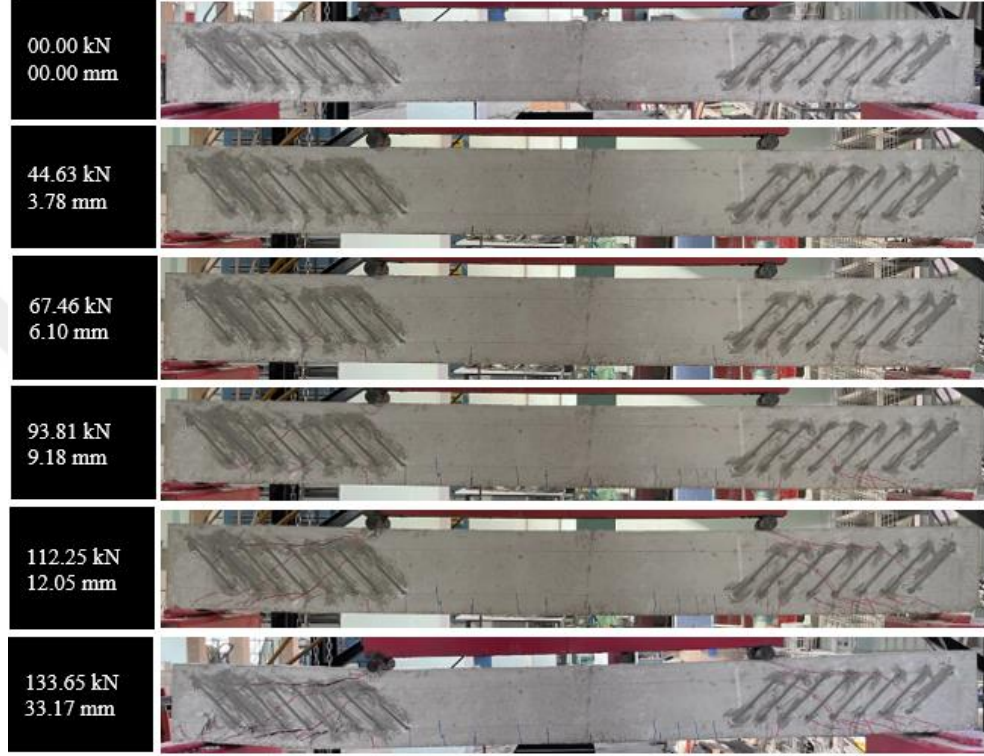


Şekil 4.12. S2.5/125-250/2.5 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

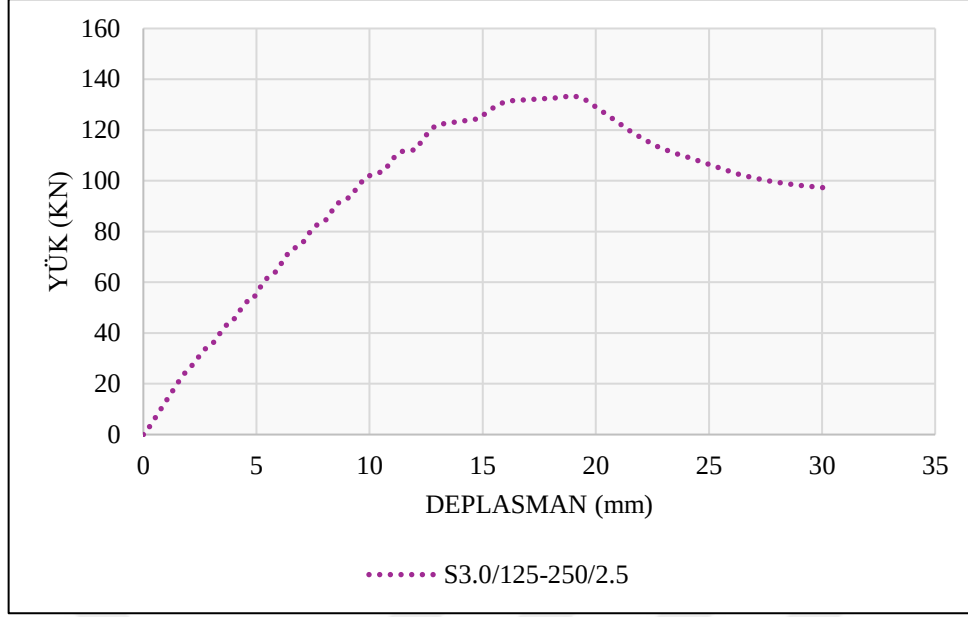
4.1.5. S3.0/125-250/2.5 numunesi

S3.0/125-250/2.5 numunesi, 75 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 8 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 34.07 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 2.77 mm olduğunda ilk eğilme kiriş orta bölgesinde meydana gelmiştir. Daha sonra, yük 44.63 kN'a ulaştığında ve 3.78 mm deplasman kaydedildiğinde ilk kesme çatlakları sol kesme açıklığında oluşmuştur. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 133.65 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 33.17 mm olarak ölçülmüş ve sol kesme açıklığında MÇD'lerin kesme dayanımını artırması ve eğik çekme çatlaklarını sınırlamasından dolayı kirişte yarıлма (splitting) çatlakları oluşmuş ve göçme meydana gelmiştir. Bu noktada, numune kırılarak deney

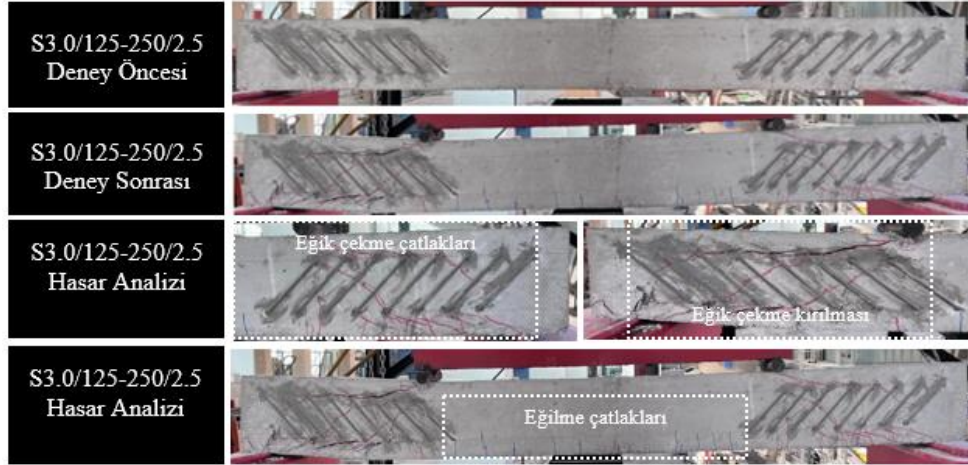
sonlanmıştır. Deney sırasında, ankrajlarda herhangi bir sıyrılma olmamıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %78.67'lik bir artış meydana gelmiştir. S3.0/125-250/2.5 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.13'te, yük deplasman eğrisi Şekil 4.14'te ve kiriş hasar analizi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. 3.0/125-250/2.5 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.14. S3.0/125-250/2.5 kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.15. S3.0/125-250/2.5 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

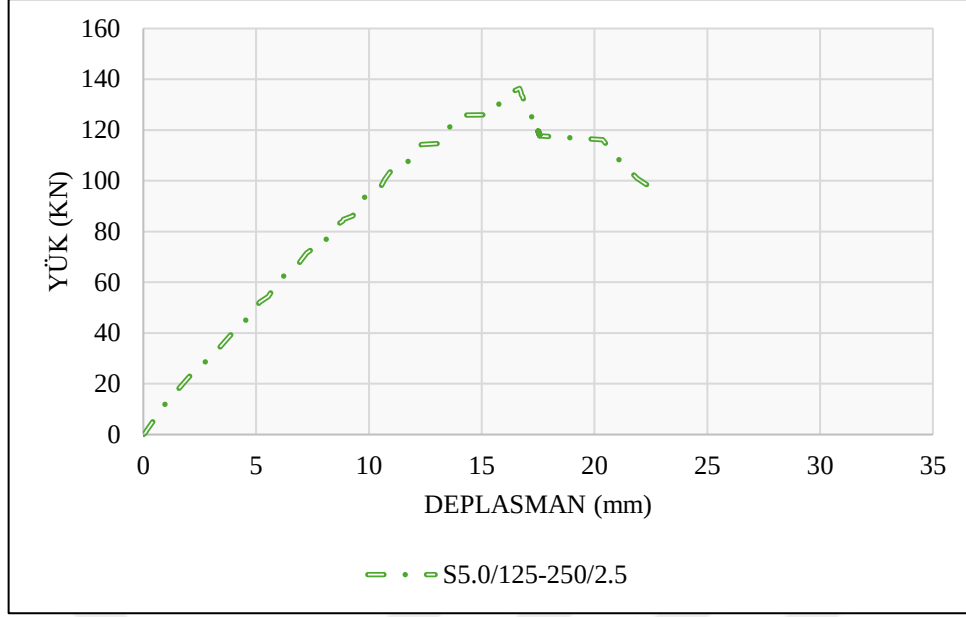
4.1.6. S5.0/125-250/2.5 numunesi

S5.0/125-250/2.5 numunesi, 45 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 13 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 21.09 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.39 mm olduğunda ilk eğilme kiriş orta bölgesinde meydana gelmiştir. Daha sonra, yük 54.30 kN'a ulaştığında ve 5.54 mm deplasman kaydedildiğinde ilk kesme çatlakları sağ ve sol kesme açıklıklarında oluşmuştur. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 136.36 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 23.66 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında

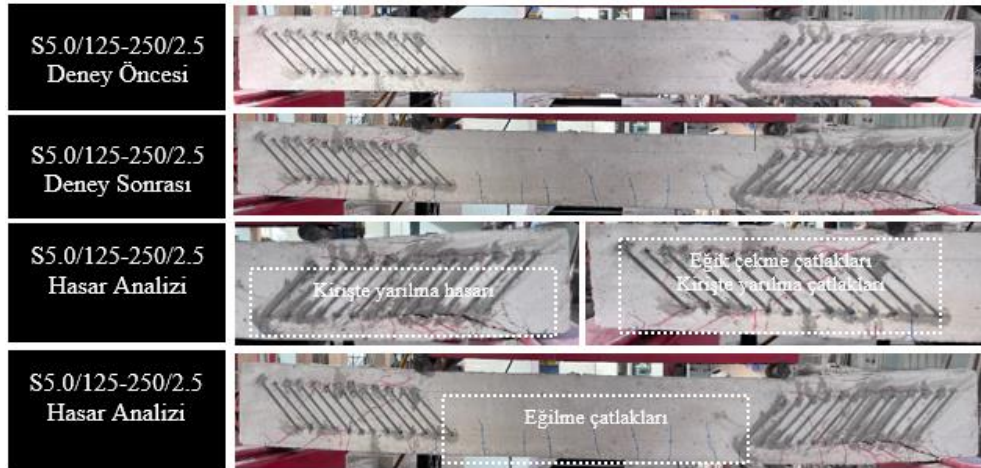
MÇD'lerin kesme dayanımını artırması ve eğik çekme çatlağını sınırlamasından dolayı kirişte yarıma (splitting) çatlakları oluşmuş ve göçme meydana gelmiştir. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney sırasında, ankrajlarda herhangi bir sıyrılma olmamıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %82'lik bir artış meydana gelmiştir. S5.0/125-250/2.5 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.16'da, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.17'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. 5.0/125-250/2.5 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=2.5$)



Şekil 4.17. S5.0/125-250/2.5 kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=2.5$)

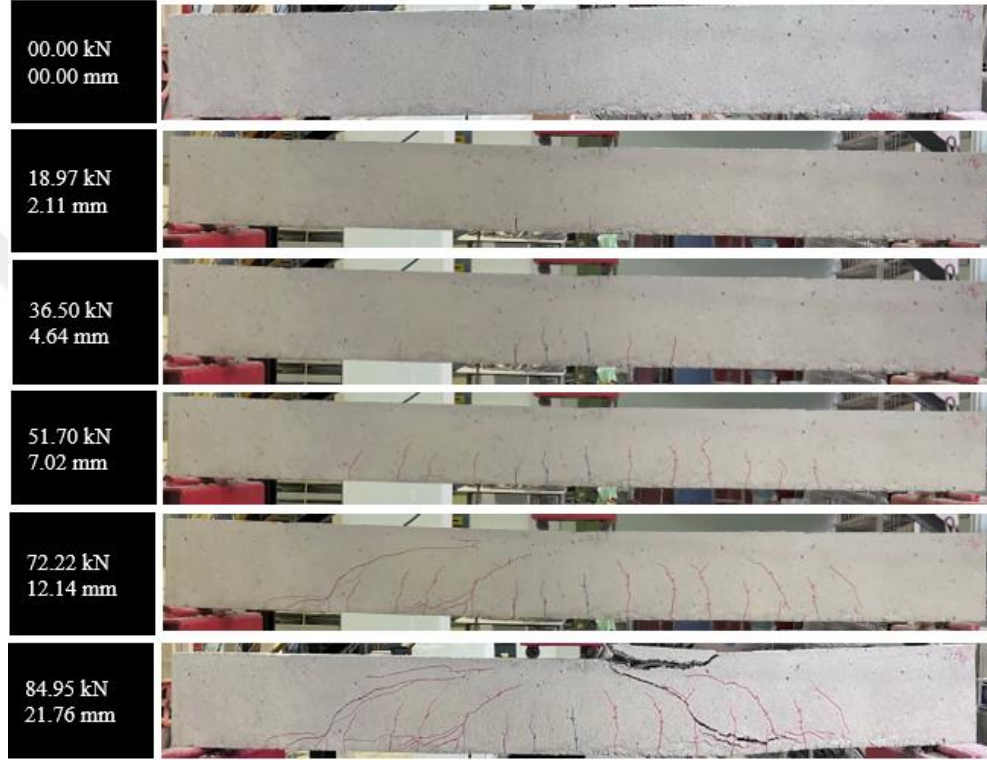


Şekil 4.18. S5.0/125-250/2.5 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=2.5$)

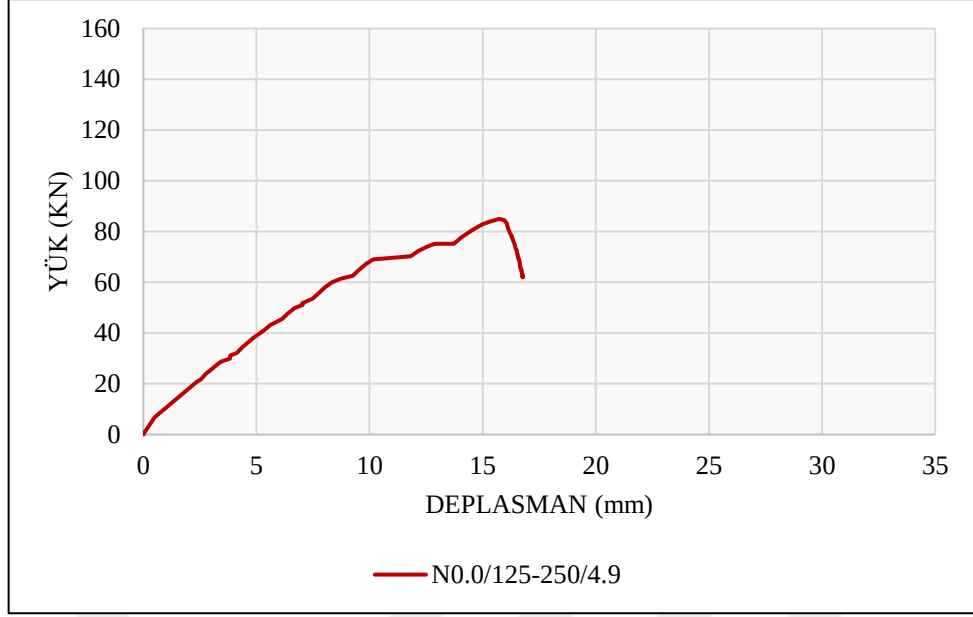
4.1.7. N0.0/125-250/4.9 Numunesi

Bu çalışmanın a_v/d oranı 4.9 olduğu deney grubunda, ilk numune kiriş kesme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla referans kiriş olarak test edilmiştir. Bu gruptaki kirişler, deney düzeneğine mesnet noktası ile yükleme noktası arasında 1040 mm'lik bir mesafe olacak şekilde yerleştirilmiş ve yük, 10kN artışlarla uygulanmaya başlanmıştır. Referans kiriş numunesi, 18.97 kN yük seviyesine geldiğinde mesnet bölgesinde ilk eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Bu yük değerine karşılık gelen deplasman değeri 2.11 mm olarak kaydedilmiştir. Yükün artmasıyla eğilme çatlakları belli bir seviyeye kadar uzamış ancak kesme çatlakları da artmaya devam etmiştir. Kesme çatlaklarının

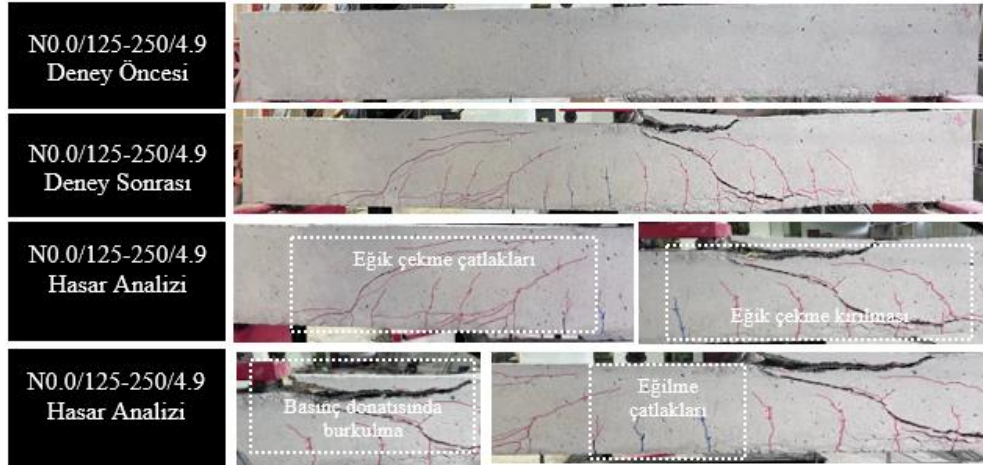
yoğunlaşması ile kiriş numunesi üzerindeki yük 84.95 kN ve deplasman 21.76 mm değerine ulaştığı anda kiriş sağ kesme açıklığında gevrek kırılma ile eğik çekme çatlağı oluşmuş ve kiriş kesme hasarından göçmüştür. Ayrıca, referans kiriş numunesinde basınç donatısında burkulma gözlemlenmiştir. N0.0/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.19’da, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.20’de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. N0.0/125-250/4.9 referans kirişinin deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.20. N0.0/125-250/4.9 referans kirişinin yük deplasman grafiği ($a_w/d=4.9$)



Şekil 4.21. N0.0/125-250/4.9 referans kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_w/d=4.9$)

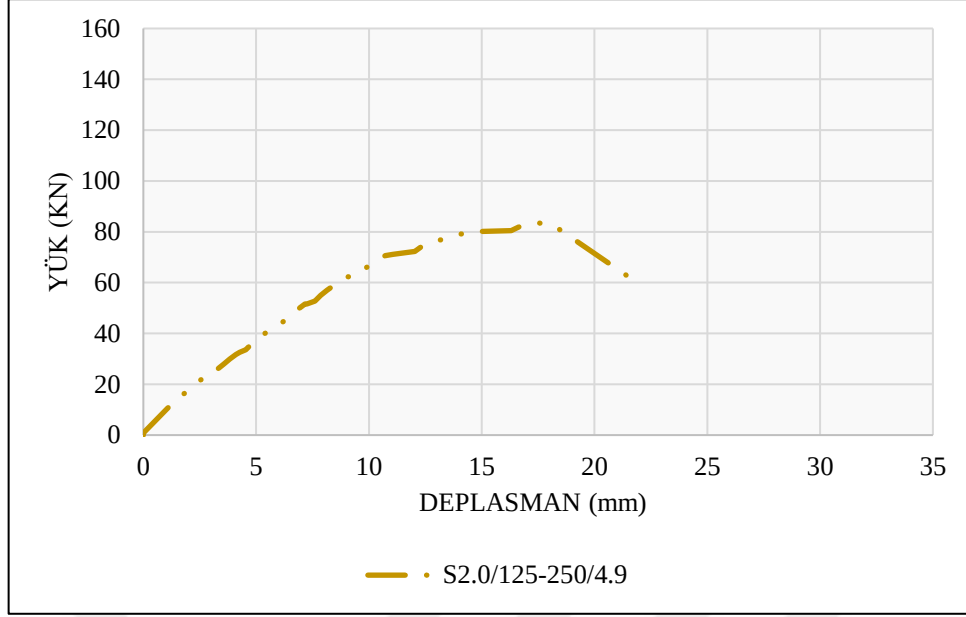
4.1.8. S2.0/125-250/4.9 numunesi

S2.0/125-250/4.9 numunesi, 110 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 9 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 12.58 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 2.58 mm olduğunda ilk eğilme çatlak meydana gelmiştir. Ayrıca, bu aşamada numunenin orta bölgeye yakın olan kesme açıklıklarında ilk kesme çatlak da oluşmuştur. Yükün artmasıyla eğilme ve kesme çatlakları artmıştır. Kiriş eğilme kapasitesinin yüksek olmasından dolayı kiriş maksimum yük taşıma kapasitesi olan 83.45 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 28.76 mm olarak

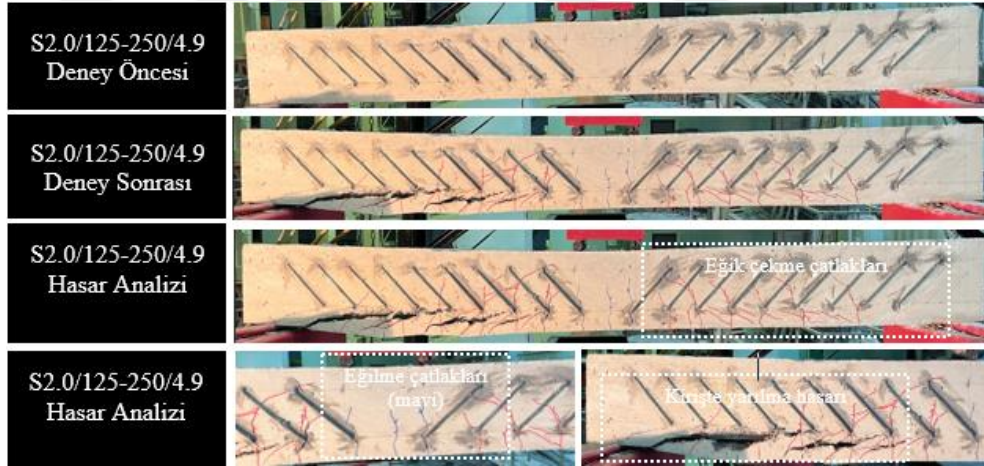
ölçülmüş ve sol kesme açıklığında kirişte yarıлма (splitting) hasarından göçme meydana gelmiştir. Aslında bu durum kirişin a_v/d oranının 4.9 olmasından kaynaklı olarak fazla eğilmesi ve MÇD'lerin boyuna donatıyı saramamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle MÇD alt deliklerinin altında kalan beton blok ile alt deliklerinin üstünde kalan beton blok ayrı hareket etmeye çalışırken yatayda oluşan kayma gerilmesi ve boyuna donatıların maruz kaldığı kaldırma etkisiyle bu çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesi referans numune baz alınarak hesaplanmıştır. Yük taşıma kapasitesinde %1.77'lik bir azalma meydana gelmiştir. S2.0/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.22'de, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.23'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.22. S2.0/125-250/4.9 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.23. S2.0/125-250/4.9 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.24. S2.0/125-250/4.9 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=4.9$)

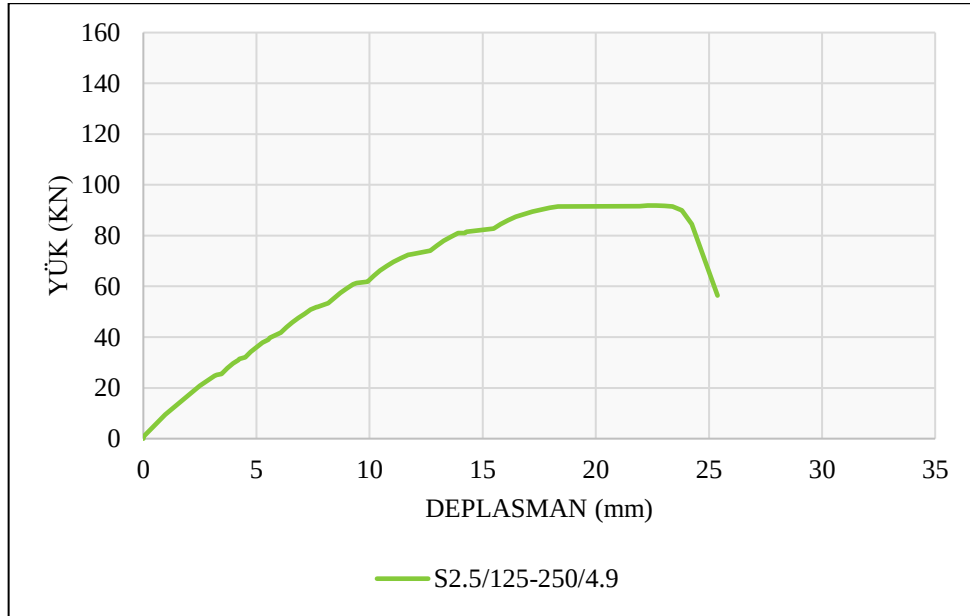
4.1.9. S2.5/125-250/4.9 numunesi

S2.5/125-250/4.9 numunesi, 90 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 11 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 25 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 3.36 mm olduğunda ilk eğilme ve kesme çatlağı meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 91.85 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 29.08 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında kirişte yarılmaya hasarından göçme meydana gelmiştir (Bu durum detaylı olarak Bölüm 4.1.8'de anlatılmıştır). Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney

kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %1.08’lik bir artış meydana gelmiştir. S2.5/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.25’te yük-deplasman eğrisi Şekil 4.26’da ve kiriş hasar analizi Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. S2.5/125-250/4.9 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=4.9$)



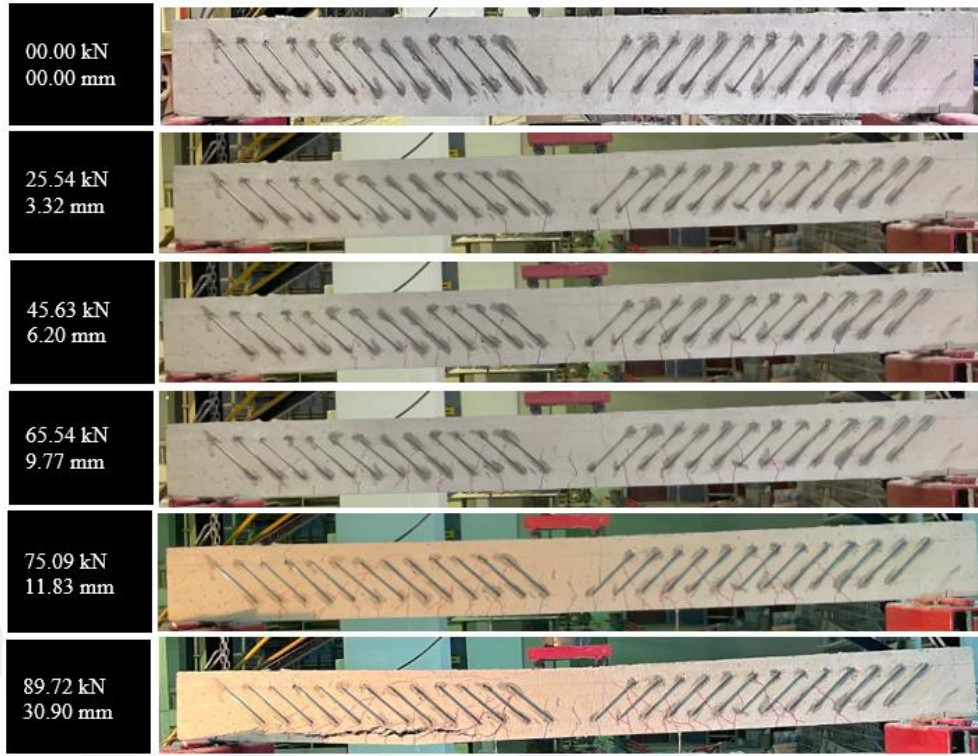
Şekil 4.26. S2.5/125-250/4.9 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=4.9$)



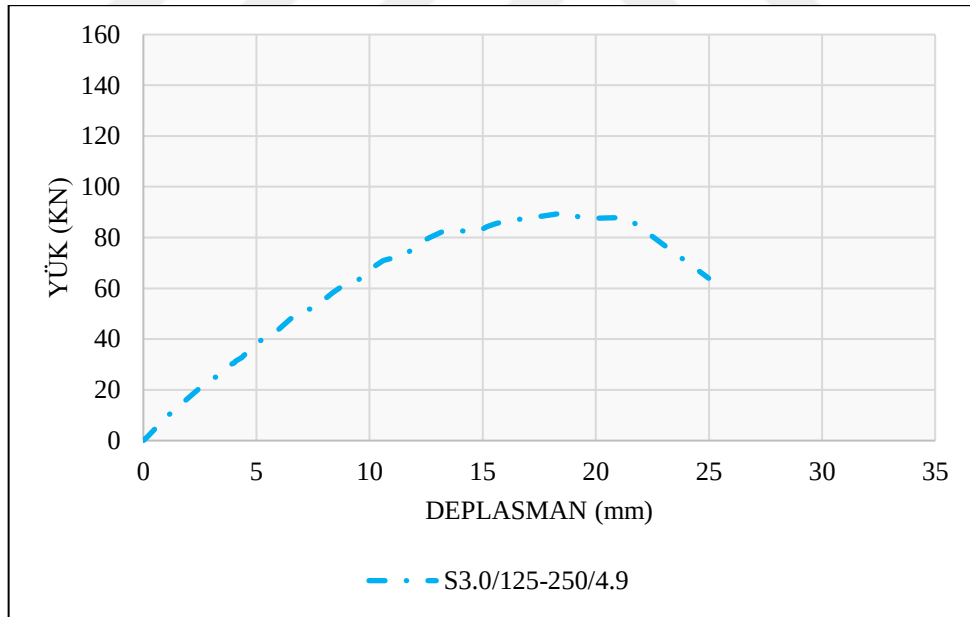
Şekil 4.27. S2.5/125-250/4.9 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=4.9$)

4.1.10. S3.0/125-250/4.9 numunesi

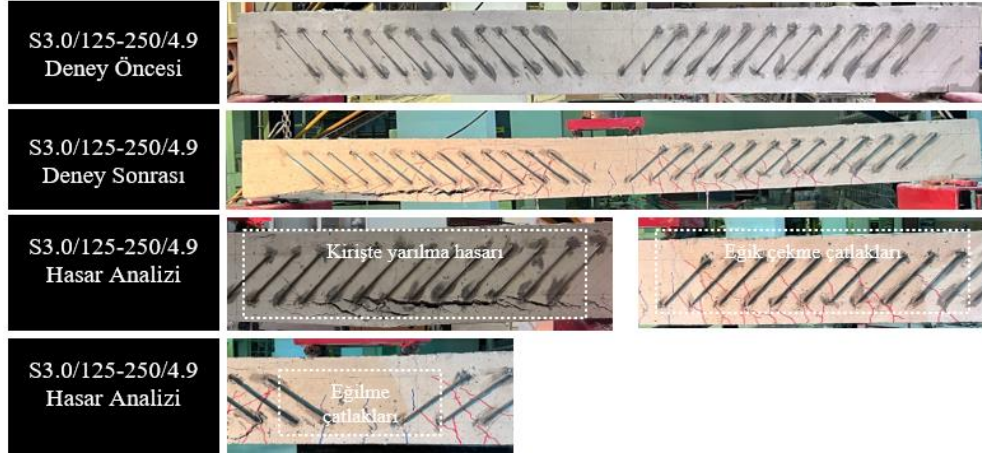
S3.0/125-250/4.9 numunesi, 75 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 13 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 20.72 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 2.49 mm olduğunda ilk eğilme ve kesme çatlağı belirgin bir şekilde meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 89.72 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 30.90 mm olarak ölçülmüş ve sol kesme açıklığında kirişte yarılmaya hasarından göçme meydana gelmiştir (Bu durum detaylı olarak Bölüm 4.1.8'de anlatılmıştır). Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %5'lik bir artış meydana gelmiştir. S3.0/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.28'de, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.29'da ve kiriş hasar analizi Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.28. S3.0/125-250/4.9 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.29. S3.0/125-250/4.9 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=4.9$)



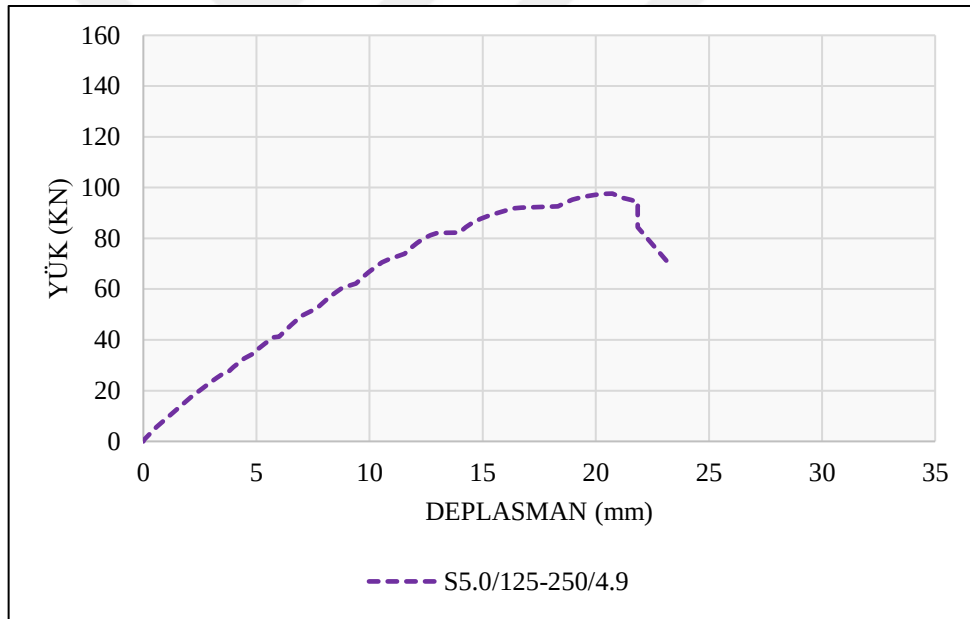
Şekil 4.30. S3.0/125-250/4.9 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları ($a_v/d=4.9$)

4.1.11. S5.0/125-250/4.9 numunesi

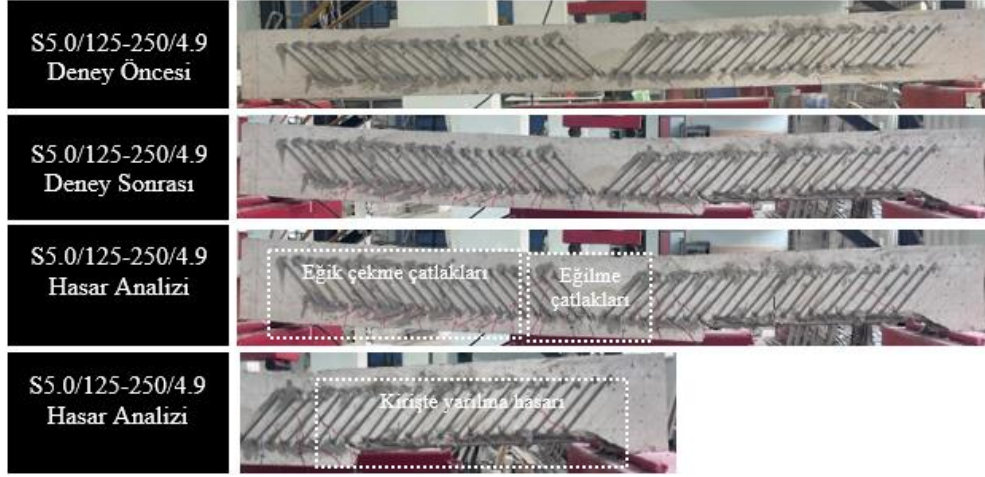
S5.0/125-250/4.9 numunesi, 45 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 22 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 26 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 3.47 mm olduğunda sağ ve sol mesnette ilk kesme çatlakları meydana gelmiştir. Yük değeri 32.00 kN ve deplasman değeri 4.32 mm'ye ulaştığında eğilme bölgesinde de çatlak oluşmuştur. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 97.63 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 30.21 mm olarak ölçülmüş ve sol kesme açıklığında kirişte yarılma hasarından göçme meydana gelmiştir (Bu durum detaylı olarak Bölüm 4.1.8'de anlatılmıştır). Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %15'lik bir artış meydana gelmiştir. S5.0/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.31'de yük-deplasman eğrisi Şekil 4.32'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.33'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.31 S5.0/125-250/4.9 kirişinde aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.32. S5.0/125-250/4.9 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=4.9$)



Şekil 4.33. S5.0/125-250/4.9 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2. Kiriş Yüksekliği Değişimi

Bu deney grubunda, deney kirişlerinin geometrisi ($125 \times 250 \times 3600$ mm), beton sınıfı (C15-20), çekme donatısı ($3\phi 16$), basınç donatısı ($2\phi 12$), ve enine donatı ($\phi 6/350$ mm) sabit parametreler olarak dikkate alınmıştır. Önceki deney elemanlarından farklı olarak, bu deney grubunda yalnızca kesit yüksekliği değiştirilmiştir. Kesme kapasitesi yetersiz olan bu deney kirişlerinde, farklı aralıklarla MÇD uygulaması yapılarak kesme açıklığına uygulanması gereken optimum MÇD sayısı araştırılmıştır. Bu grupta bir tane referans ve 4 tane güçlendirilmiş kiriş numunesi olmak üzere toplam 5 deney numunesi dört noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir.

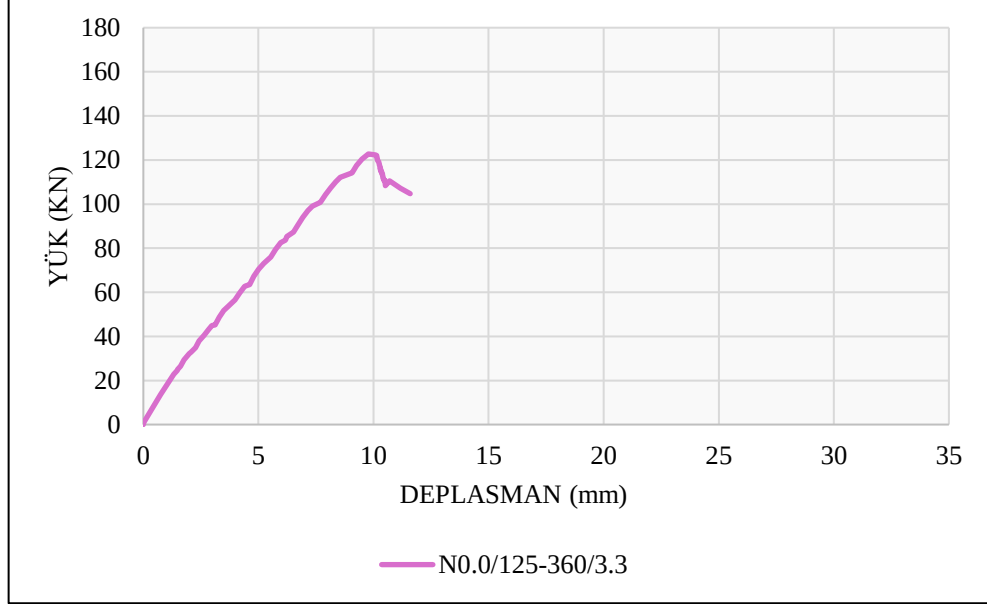
4.2.1. N0.0/125-360/3.3 numunesi

Bu çalışmanın $h=360$ mm olduğu deney grubunda, ilk numune kiriş kesme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla referans kiriş olarak test edilmiştir. Bu gruptaki kirişler, deney düzeneğine mesnet noktası ile yükleme noktası arasında 1050 mm'lik bir mesafe olacak şekilde yerleştirilmiş ve yük, 10 kN artışlarla uygulanmaya başlanmıştır. Referans kiriş numunesi, 33 kN yük seviyesine geldiğinde mesnet bölgesinde ilk eğilme ve kesme çatlakları meydana gelmiştir. Bu yük değerine karşılık gelen deplasman değeri 2.15 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş numunesinde 122.72 kN yük ve 19.89 mm deplasman değerine geldiğinde kiriş sağ kesme açıklığında gevrek eğik çekme çatlağı oluşmuş ve kesme hasarından göçmüştür. N0.0/125-250/4.9 numunesinin deney boyunca

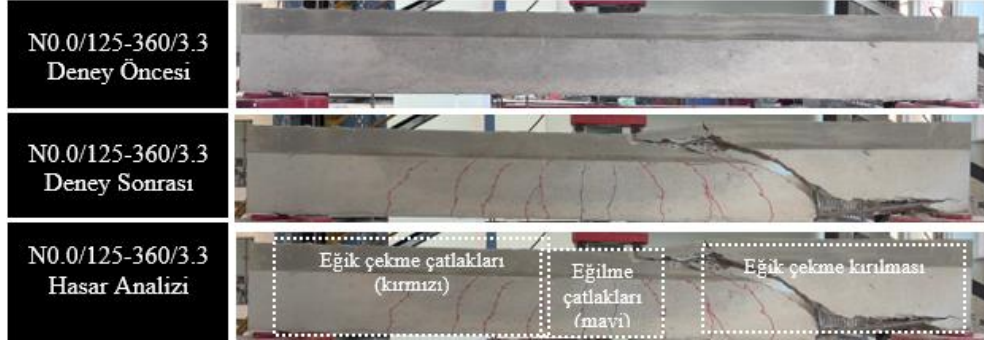
aldığı hasarlar Şekil 4.34'te, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.35'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.34. N0.0/125-360/3.3 referans kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar $a_v/d=3.3$)



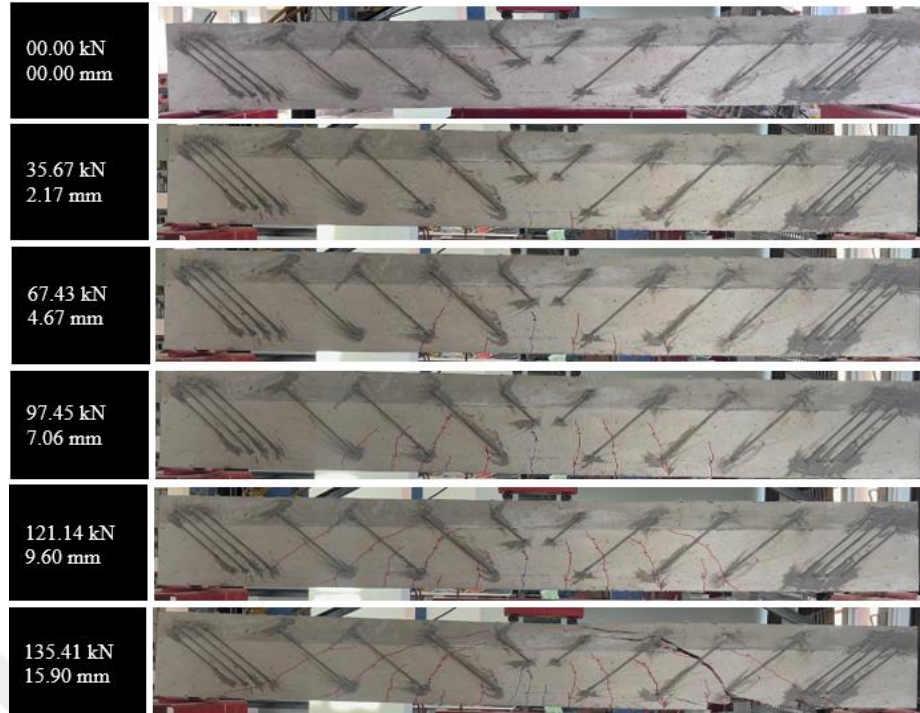
Şekil 4.35. N0.0/125-360/3.3 referans kirişinin yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)



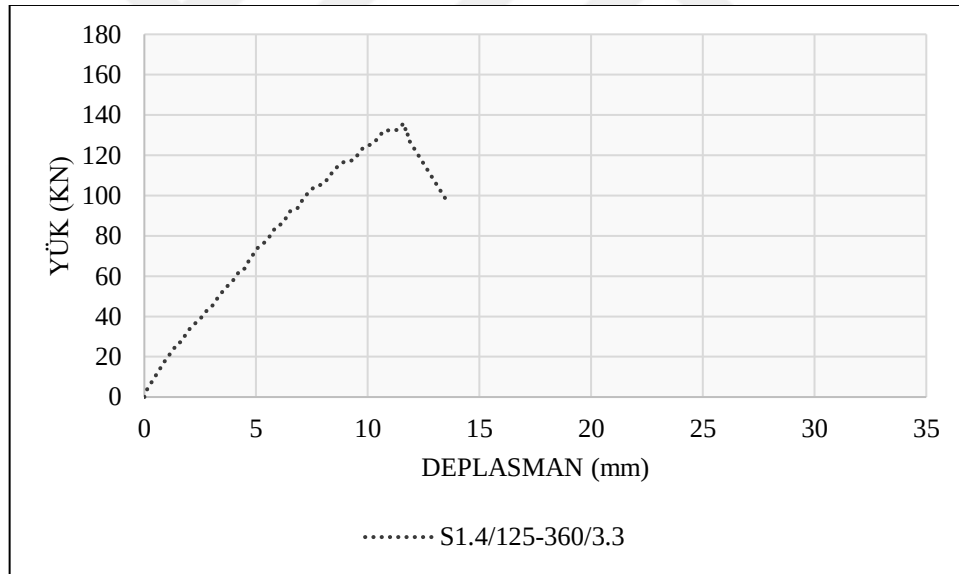
Şekil 4.36. N0.0/125-250/3.3 referans kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2.2. S1.4/125-360/3.3 numunesi

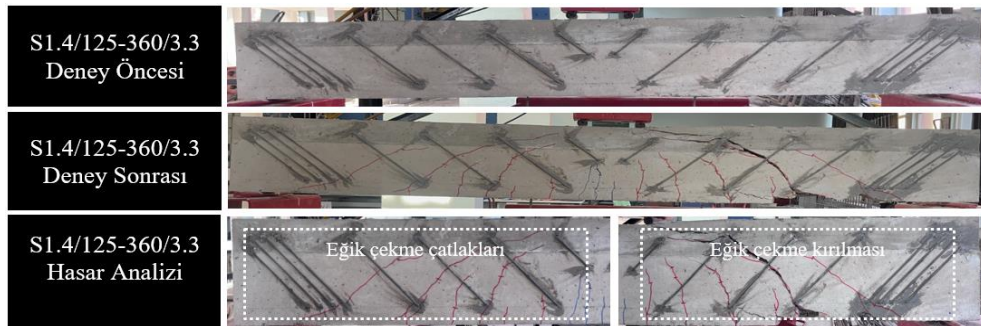
S1.4/125-360/3.3 numunesi, 240 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 8 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 27 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.68 mm olduğunda ilk kesme ve eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 135.41 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 15.90 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında gevrek kırılma ile eğik çekme çatlakları oluşmuş ve kesme hasarından göçmüştür. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %10.35'lik bir artış meydana gelmiştir. S1.4/125-360/3.3 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.37'de yük-deplasman eğrisi Şekil 4.38'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



Şekil 4.37 S1.4/125-360/3.3 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=3.3$)



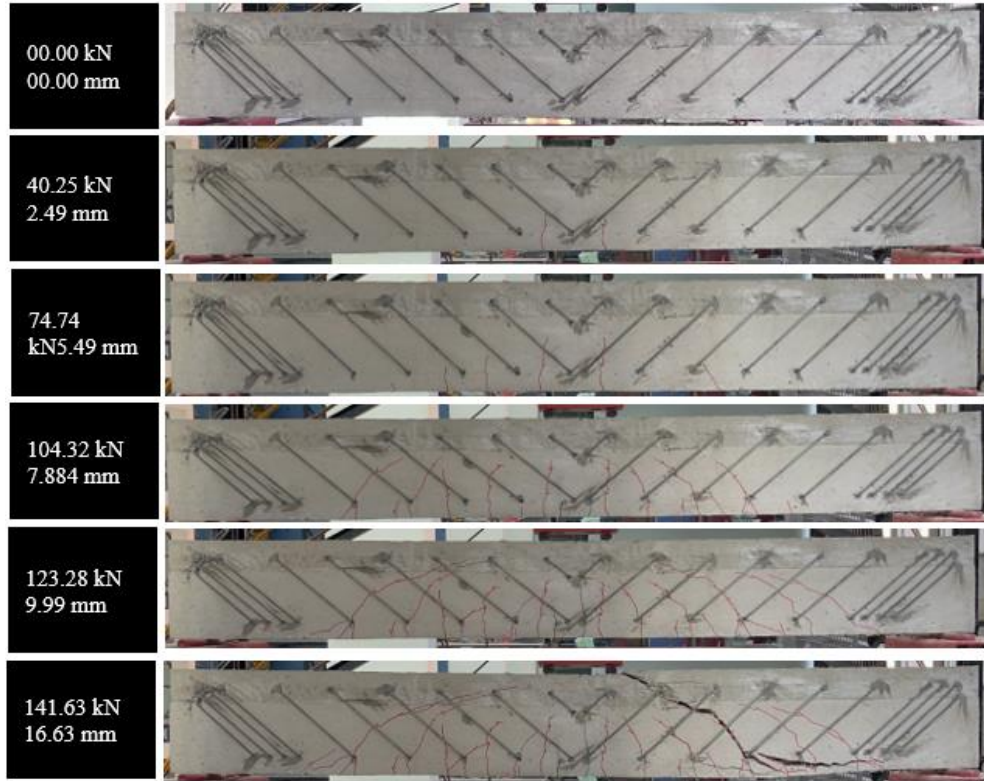
Şekil 4.38. S1.4/125-360/3.3 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)



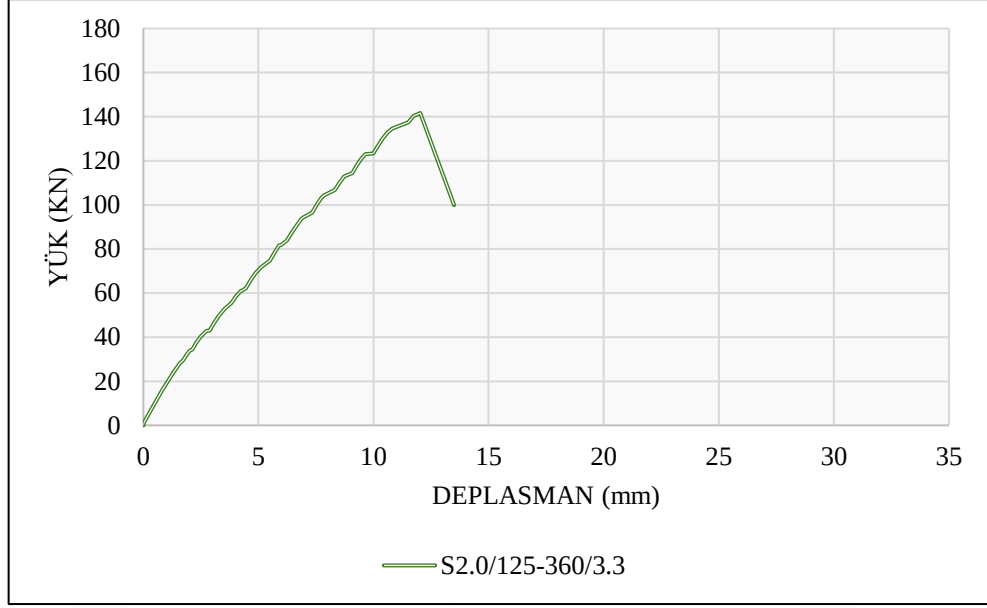
Şekil 4.39. S1.4/125-360/3.3 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2.3. S2.0/125-360/3.3 numunesi

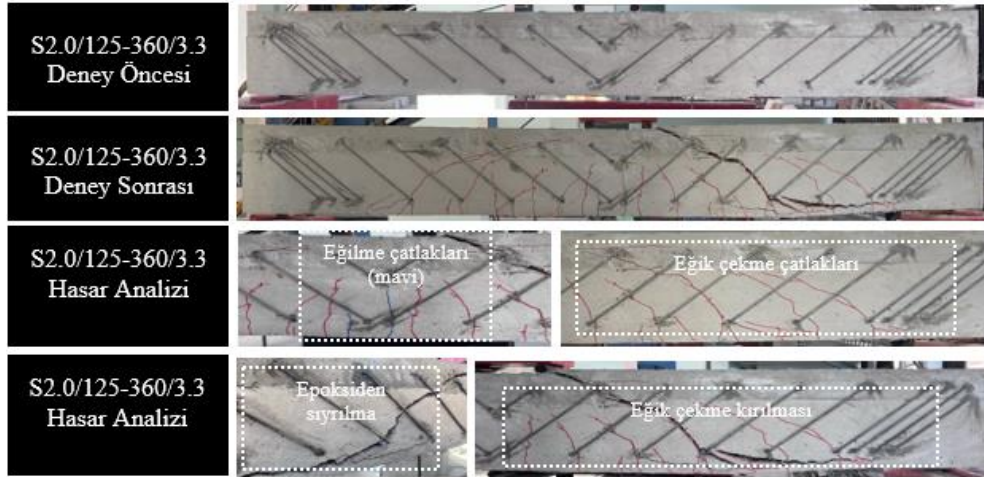
S2.0/125-360/3.3 numunesi, 168 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 8 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 28 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.66 mm olduğunda ilk kesme ve eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 141.63 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 16.63 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında gevrek kırılma ile eğik çekme çatlağı oluşmuş ve kesme hasarından geçmiştir. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %15.40'lık bir artış meydana gelmiştir. S2.0/125-360/3.3 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.40'te yük-deplasman eğrisi Şekil 4.41'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.42'de gösterilmiştir.



Şekil 4.40 S2.0/125-360/3.3 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a./d=3.3$)



Şekil 4.41. S2.0/125-360/3.3 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)

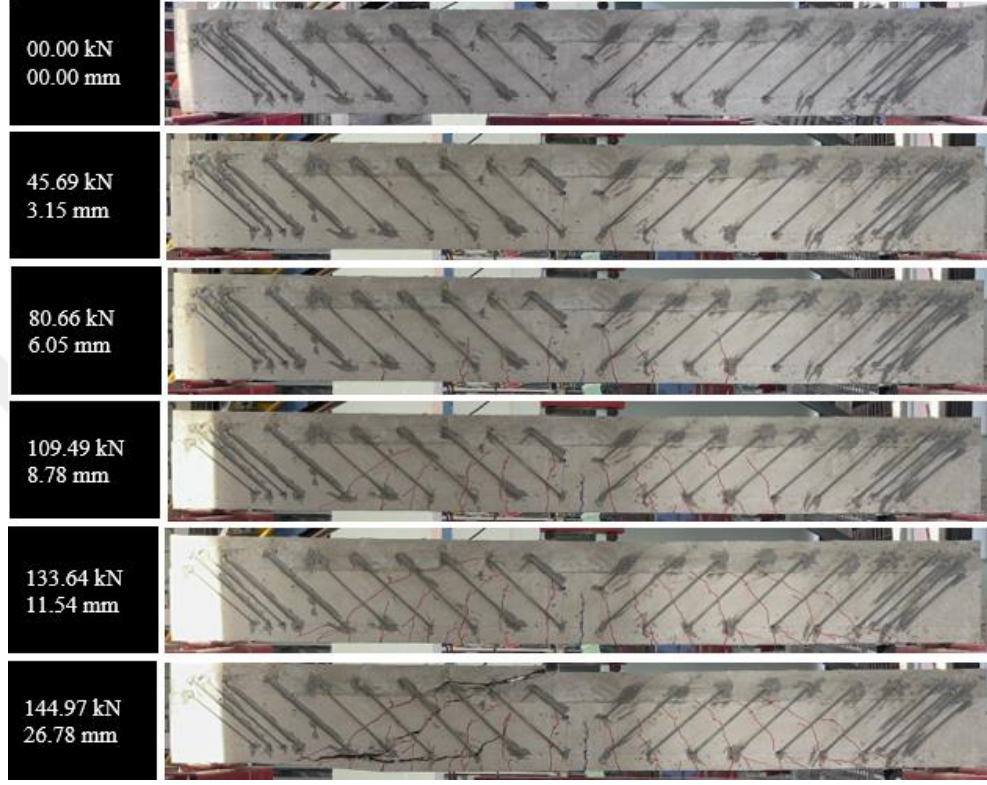


Şekil 4.42. S2.0/125-360/3.3 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

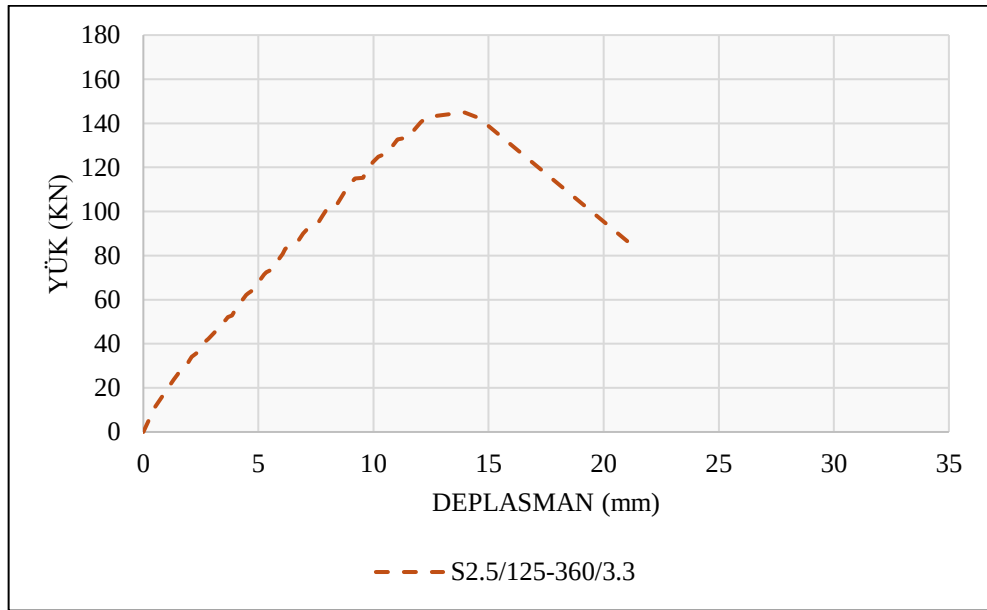
4.2.4. S2.5/125-360/3.3 numunesi

S2.5/125-360/3.3 numunesi, 134 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 11 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 29 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 2.09 mm olduğunda ilk kesme meydana gelmiştir. Yük değeri 53.00 kN'a deplasman değeri 3.80 mm'ye ulaştığında ilk eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 144.97 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 26.78 mm olarak ölçülmüş ve sol kesme açıklığında kesme ve splitting hasarlarının ortak etkisi ile göçme meydana gelmiştir. Bu

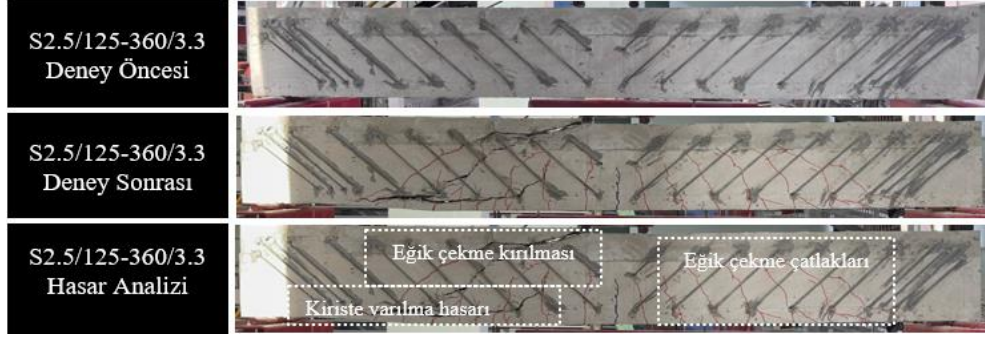
noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %18.09'luk bir artış meydana gelmiştir. S2.5/125-360/3.3 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.43'te yük-deplasman eğrisi Şekil 4.44'te ve kiriş hasar analizi Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.43 S2.5/125-250/3.3 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=3.3$)



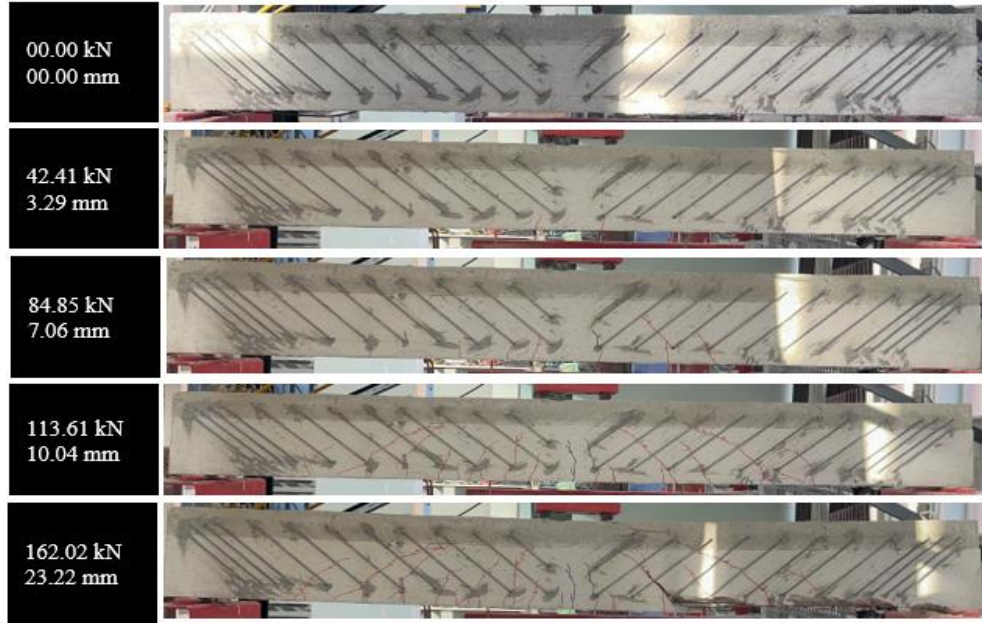
Şekil 4.44. S2.5/125-250/3.3 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)



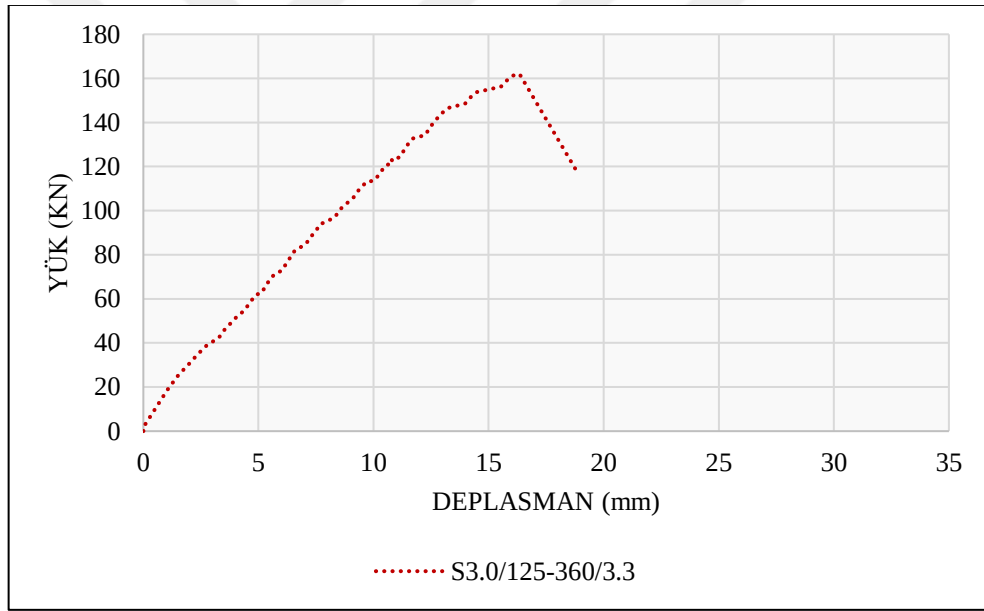
Şekil 4.45. S2.5/125-250/3.3 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2.5. S3.0/125-360/3.3 numunesi

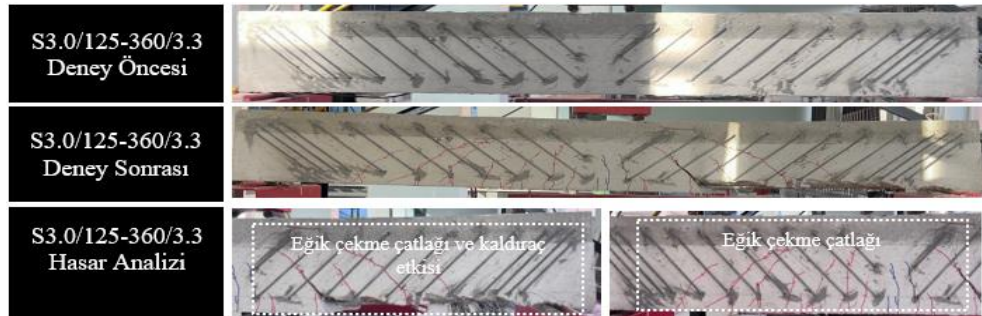
S3.0/125-360/3.3 numunesi, 112 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 12 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 29 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.90 mm olduğunda ilk kesme meydana gelmiştir. Yük değeri 62.00 kN'a deplasman değeri 4.80 mm'ye ulaştığında ilk eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Yükleme devam ederken eğilme bölgesindeki çatlaklarda dallanmalar ve kesme çatlaklarında ani uzamalar gözlemlenmiştir. 125.00 kN yük değerine geldiğinde mekanik dikişlerde zorlanmalar olduğu gözlemlenmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 162.02 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 23.22 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında eğik çekme çatlaklarının oluşmasının ardından MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesini artırmasından dolayı kiriş daha fazla eğilebilmiş ve boyuna donatıların maruz kaldığı kaldırma etkisiyle betonda yarıma meydana gelmiştir. Nihayetinde kiriş kesme hasarından göçmüştür. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %32'lik bir artış meydana gelmiştir. S3.0/125-360/3.3 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.46'da, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.47'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.48'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46 S3.0/125-250/3.3 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a_v/d=3.3$)



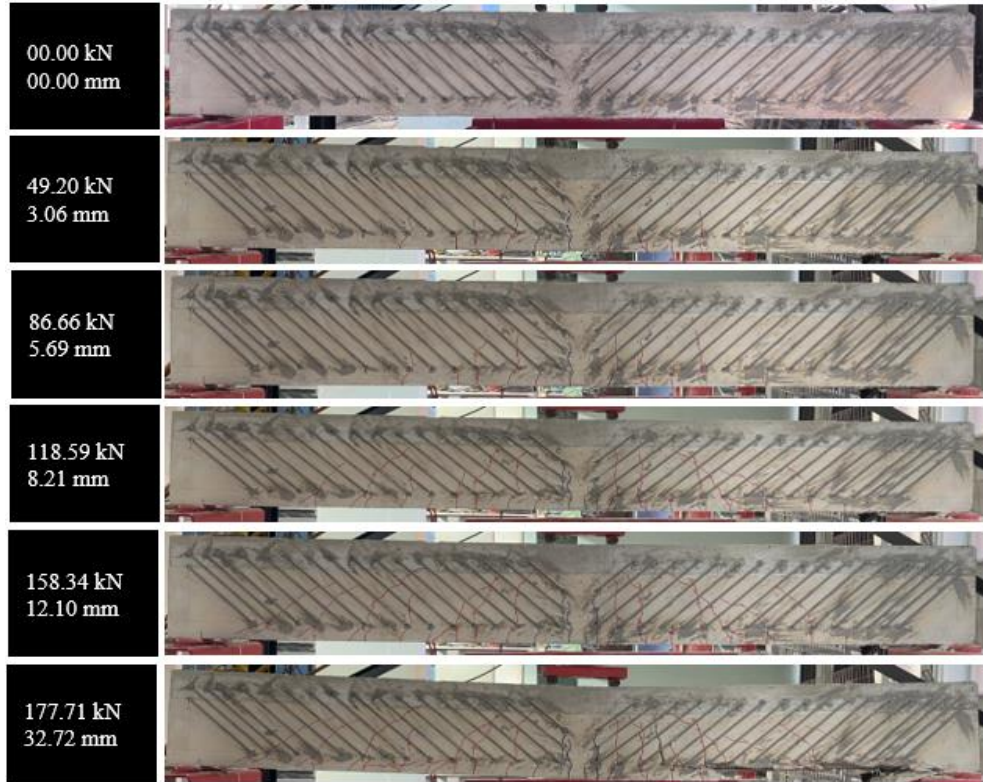
Şekil 4.47. S3.0/125-250/3.3 numunesi yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)



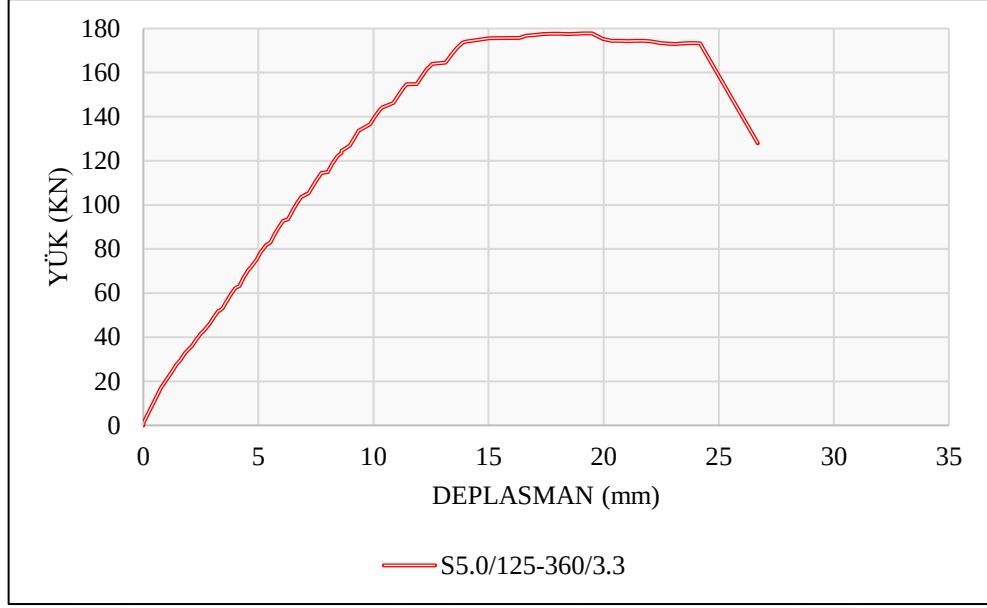
Şekil 4.48. S3.0/125-250/3.3 kirişine ait göçme sonrası hasar detaylar

4.2.6. S5.0/125-360/3.3 numunesi

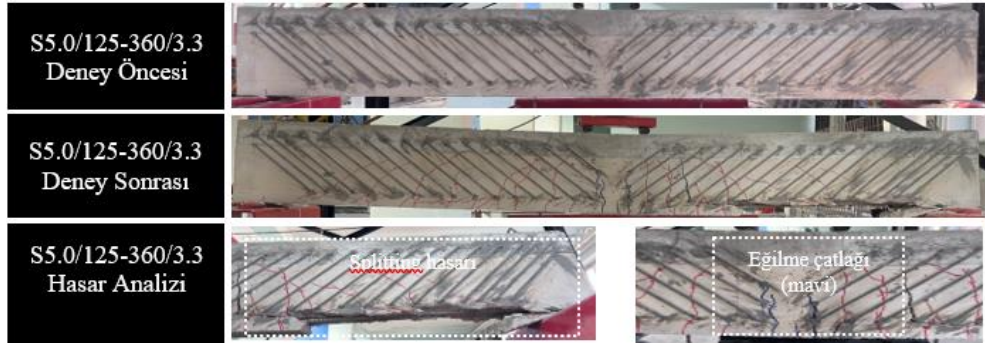
S5.0/125-360/3.3 numunesi, 67 mm aralıklarla MÇD kullanılarak güçlendirilen kiriş elemanıdır. Bu kiriş numunesinin her iki yüzünde uygulanmak üzere kesme açıklığında 18 tane MÇD kullanılmıştır. Bu kiriş deneyinde, numune üzerindeki yük 33 kN'a ulaştığında ve deplasman değeri 1.70 mm olduğunda ilk kesme çatlağı meydana gelmiştir. Yük değeri 41.00 kN'a deplasman değeri 2.65 mm'ye ulaştığında ilk eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Kiriş numunesi, maksimum yük taşıma kapasitesi olan 177.71 kN değerine ulaştığında deplasman miktarı 32.72 mm olarak ölçülmüş ve sağ kesme açıklığında eğik çekme çatlağının oluşmasının ardından MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesini artırmasından dolayı kiriş daha fazla eğilebilmiş ve boyuna donatıların maruz kaldığı kaldıraç etkisiyle betonda yarıлма meydana gelmiştir. Nihayetinde kiriş kesme hasarından göçmüştür. Bu noktada, numune kırılarak deney sonlanmıştır. Deney kiriş numunesinin yük taşıma kapasitesinde referans numuneye kıyasla %44.8'lik bir artış meydana gelmiştir. S5.0/125-360/3.3 numunesinin deney boyunca aldığı hasarlar Şekil 4.49'da, yük-deplasman eğrisi Şekil 4.50'de ve kiriş hasar analizi Şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.49 S5.0/125-250/3.3 kirişinde deney aşamasında oluşan hasarlar ($a/d=3.3$)



Şekil 4.50. S5.0/125-250/3.3 kirişi yük deplasman grafiği ($a_v/d=3.3$)



Şekil 4.51. S5.0/125-250/3.3 kirişine ait göçme sonrası hasar detayları

4.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, MÇD etkinliğini araştırmak amacıyla, kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve kiriş geometrisindeki değişimler araştırma parametreleri olarak seçilmiştir. İlk olarak a_v/d oranının kiriş davranışına olan etkisini incelemek amacıyla $a_v/d=2.5$ (1 tane referans ve 5 tane güçlendirilmiş kiriş) ve $a_v/d = 4.9$ (1 tane referans ve 4 tane güçlendirilmiş kiriş) için deneyler yapılmış ve Uysal, (2024) çalışmasında $a_v/d = 3.3$ için yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylece, 3 farklı a_v/d (2.5, 3.3 ve 4,9) oranları için deney sonuçları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, kiriş yüksekliğinin kiriş davranışına olan etkisini incelemek amacıyla $h = 360$ mm için 1 tanesi referans olmak üzere toplamda 6 tane kiriş deneyi yapılmış ve bu deneyler sonunda

elde edilen sonuçlar, Uysal, (2024) çalışmasında $h = 250$ mm için yapılan deney verileri ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde, a_v/d oranının değişimi ve kiriş yüksekliğinin değişimi için yapılan deneylerin karşılaştırılması iki ayrı başlık altında sunulmuştur. İlk olarak, a_v/d oranının değişimi ele alınmış, ardından kiriş yüksekliğinin değişimi incelenmiştir.

4.3.1. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı değişimi

Bu bölümde, kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanan kirişler üzerinde yapılan $a_v/d = 2.5$ için 6 deney, $a_v/d = 4.9$ için 5 deney ve Uysal, (2024) çalışmasında $a_v/d = 3.3$ için yapılan 6 deney sonuçları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen kiriş deney sonuçları özet halinde Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te sunulmuştur. Bu çizelgelerdeki simgeler sırasıyla δ_y (mm); akma noktası olarak kabul edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini, δ_{max} (mm); maksimum yük seviyesindeki deplasman değerini, δ_u (mm); kopma noktası olarak kabul edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini, u ; süneklik oranını, S_y (kN/mm); akma noktasındaki rijitliği, S_{max} (kN/mm); maksimum yük seviyesindeki rijitliği, P_y (kN); akma noktası olarak kabul edilen $0.85P_{max}$ yük değerini ve P_{max} (kN); maksimum yük değerini temsil etmektedir.

Çizelge 4.1. $a_v/d = 2.5$ için deney sonuçları

Numune isimlendirmesi	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Göçme Tipi
N0.0/125-250/2.5	7.22	8.47	10.24	1.42	8.82	8.85	74.97	63.72	DT
S1.7/125-250/2.5	12.16	16.11	16.83	1.38	9.34	8.29	133.54	113.51	DT
S2.0/125-250/2.5	9.60	11.79	13.09	1.36	9.96	9.54	112.51	95.64	DT
S2.5/125-250/2.5	11.79	16.30	17.28	1.47	10.77	9.16	149.33	126.93	DT+S
S3.0/125-250/2.5	12.15	18.90	22.68	1.87	9.35	7.07	133.65	113.61	S
S5.0/125-250/2.5	13.14	16.68	20.39	1.55	8.82	8.18	136.37	115.91	S

*Burada DT diyagonal çatlak nedeniyle kesme göçmesini, S ise betonda oluşan yarılmadan dolayı (splitting) kesme göçmesini temsil etmektedir.

Çizelge 4.2. $a_v/d = 3.3$ için deney sonuçları

Numune isimlendirmesi	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Göçme Tipi
N0.0/125-250/3.3	7.80	10.87	11.57	1.48	9.27	7.82	85.02	72.26	DT
S1.7/125-250/3.3	10.31	14.66	17.01	1.41	9.03	7.47	109.55	93.12	DT
S2.0/125-250/3.3	14.15	19.18	20.43	1.44	7.30	6.33	121.46	103.24	DT
S2.5/125-250/3.3	12.03	16.12	17.09	1.66	8.21	7.21	116.20	98.77	DT+S
S3.0/125-250/3.3	12.60	16.53	14.30	1.48	7.88	7.07	116.85	99.32	S
S5.0/125-250/3.3	12.25	18.39	10.39	1.35	9.07	7.11	130.71	111.11	S

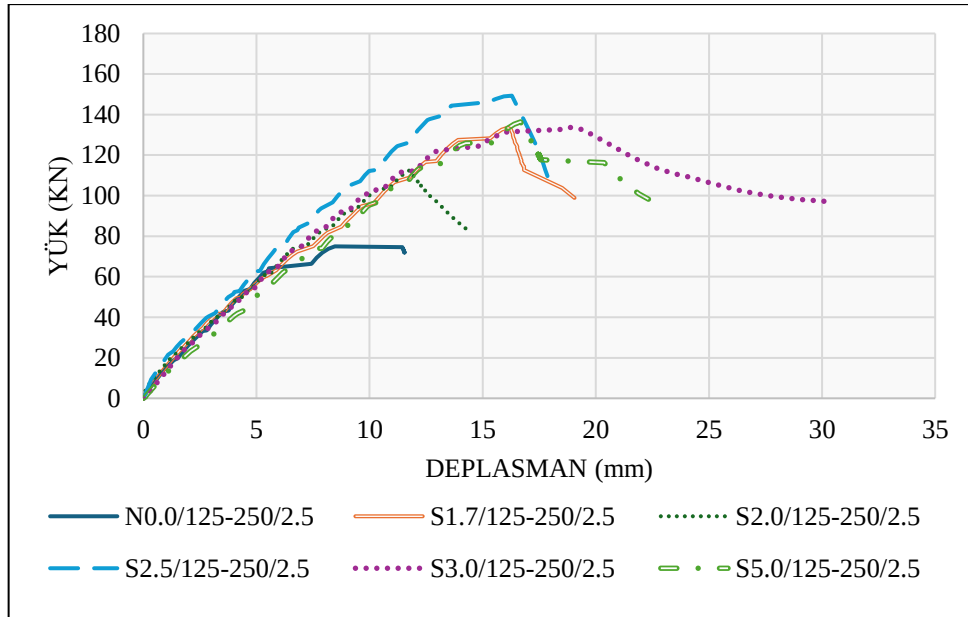
*Burada DT diyagonal çatlak nedeniyle kesme göçmesini, S ise betonda oluşan yarılmadan dolayı (splitting) kesme göçmesini temsil etmektedir.

Çizelge 4.3. $a_v/d = 4.9$ için deney sonuçları

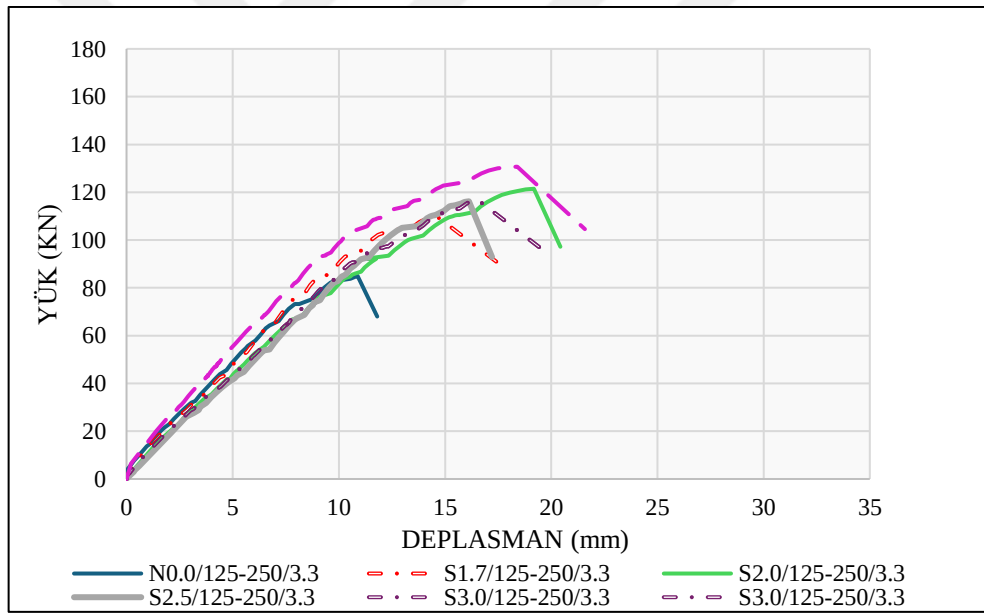
Numune isimlendirmesi	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Göçme Tipi
N0.0/125-250/4.9	12.14	15.73	16.51	1.36	5.95	5.40	84.95	72.21	DT
S2.0/125-250/4.9	10.97	17.50	20.09	1.83	6.47	4.77	83.45	70.94	S
S2.5/125-250/4.9	13.30	22.29	24.50	1.84	5.87	4.12	91.85	78.07	S
S3.0/125-250/4.9	12.01	18.70	23.13	1.93	6.35	4.80	89.72	76.26	S
S5.0/125-250/4.9	14.07	20.73	21.99	1.56	5.90	4.71	97.63	82.99	S

*Burada DT diyagonal çatlak nedeniyle kesme göçmesini, S ise betonda oluşan yarılmadan dolayı (splitting) kesme göçmesini temsil etmektedir.

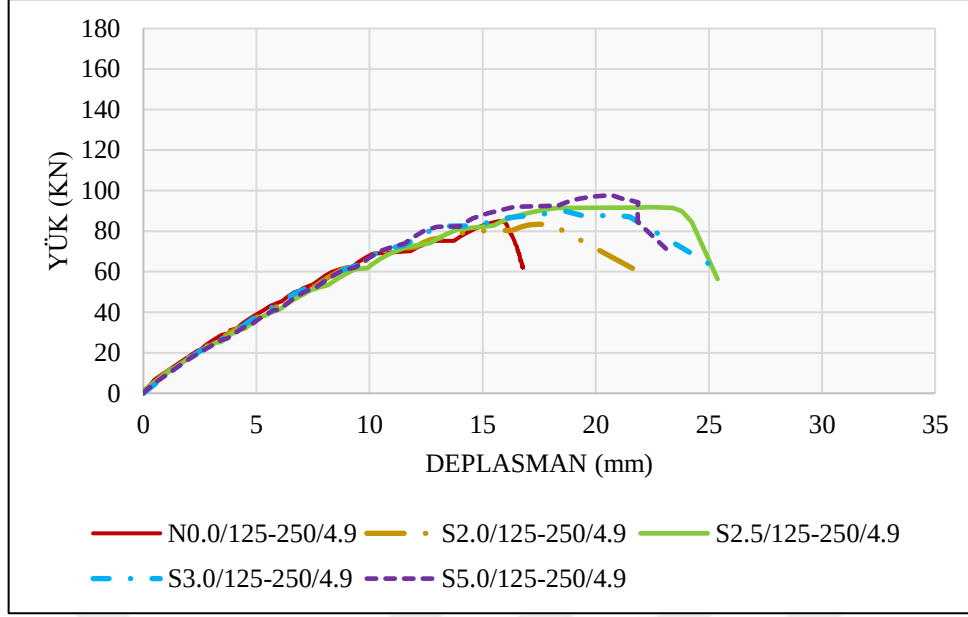
Yapılan kiriş deneylerinde, her bir numune için kirişe uygulanan yük miktarı ve bu yük altında kirişte meydana gelen deplasmanlar, bilgisayar destekli 8 kanallı veri toplama cihazıyla kaydedilmiş ve eş zamanlı olarak bilgisayar ortamında yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Her bir deney numunesi için çizilen yük-deplasman eğrileri, $a_v/d = 2.5, 3.3$ ve 4.9 için sırasıyla Şekil 4.52, 4.53 ve 4.54'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.52. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması ($a_v/d = 2.5$)



Şekil 4.53. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması ($a_v/d = 3.3$) (Uysal, 2024)

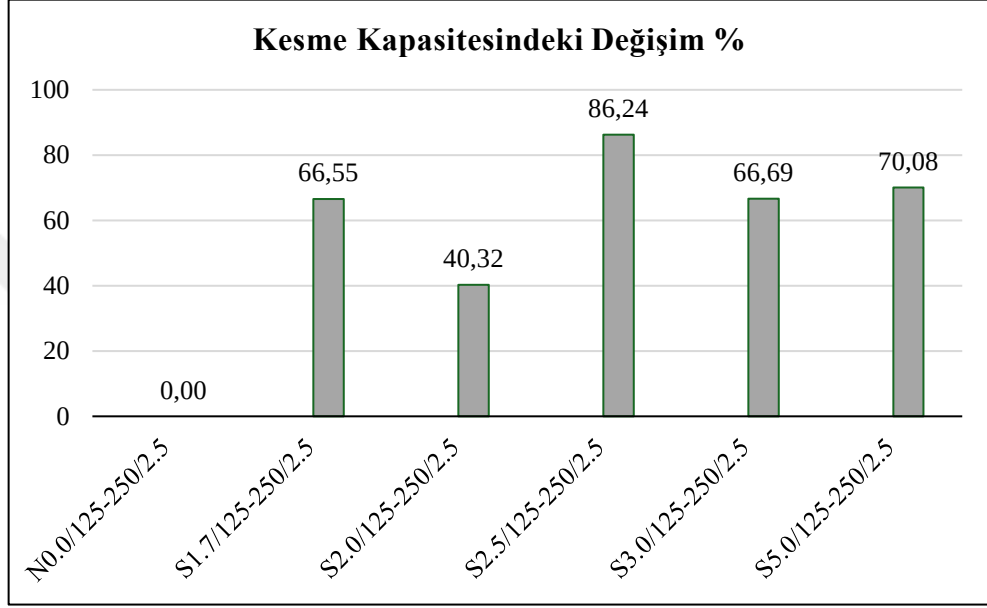


Şekil 4.54. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması ($a_v/d = 4.9$)

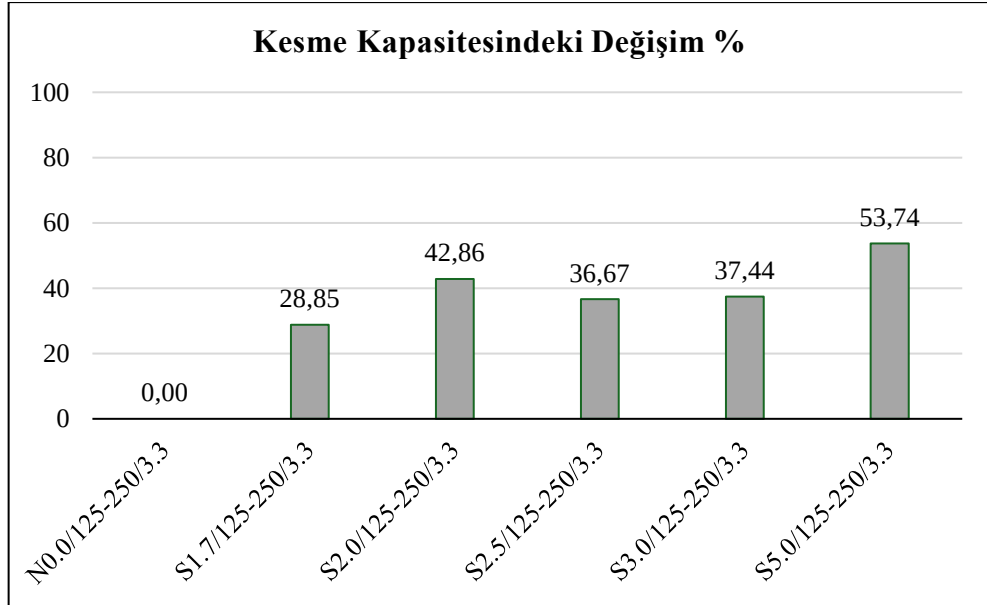
4.3.1.1. Kesme kapasitesinin değerlendirilmesi

$a_v/d = 2.5, 3.3$ ve 4.9 olan kiriş numunelerinde, MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine kıyasla kesme kapasitesinde meydana gelen değişimler, sırasıyla yüzdelik oranlar halinde Şekil 4.55, 4.56, 4.57 ve 4.58’de sunulmuştur. Deneysel çalışmada test edilen kiriş numunelerinin kesme kapasitelerindeki değişimler, a_v/d oranına göre Şekil 4.58’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.58’de görüldüğü üzere, MÇD uygulamasının kiriş kesme kapasitesine olan etkisi, a_v/d oranına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. $a_v/d = 2.5$ olan deney kirişlerinde MÇD uygulaması, kesme kapasitesinde %40.32 ile %86.24 arasında artış sağlamıştır. Buna karşın, $a_v/d = 3.3$ olan deney kirişlerinde kesme kapasitesi artış oranı %28.85 ile %53.74 arasında gözlemlenmiştir. En yüksek a_v/d oranına sahip olan deney kirişlerinde ($a_v/d = 4.9$), MÇD uygulamasının kesme kapasitesine etkisi daha sınırlı kalmış, bu oran -%1.77 ile %14.93 arasında değişmiştir. MÇD’ler düşük a_v/d oranlarında daha iyi performans göstermişlerdir. Ancak a_v/d oranı 2.5’ten 4.9’a doğru arttıkça kirişlerde kesme kuvveti talebi azalmakta ve kirişlerin gitgide eğilme kirişi olarak davranmaları sonucunda oluşan eğilme çatlakları dikleşmekte ve MÇD’ler daha etkisiz kalmaktadır. Bu aşamada kirişlerde kesme kuvveti talebi azalırken eğilme açısından zorlanmakta ve bu durumun sonucu olarak eğilme çatlakları kiriş boyunca yayılmaktadır. Kirişlerde meydana gelen bu çatlaklar, MÇD’ler için açılan deliklerle birleşmekte dolayısıyla MÇD’lerin etkinliğini

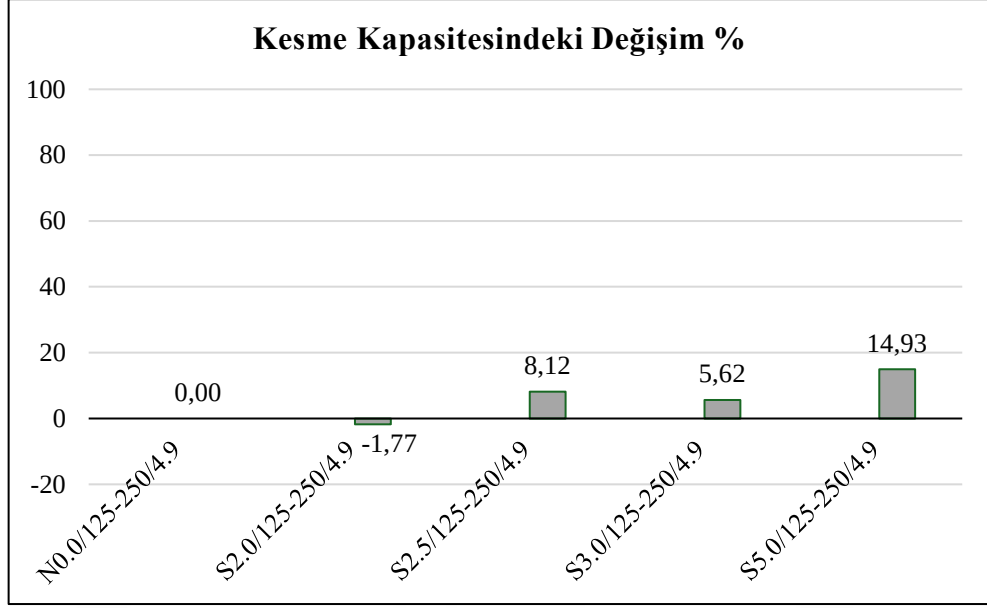
azaltmaktadır. Ayrıca boyuna donatıların $a_v/d=4.9$ kirişlerinde daha fazla eğilmeye maruz kalmasından dolayı kaldırıcı etkisine maruz kaldığı ve paspayı betonunu döktüğü görülmektedir. Buna karşın, kirişlerde a_v/d oranı azaldıkça kesme kuvveti talebi artmakta ve kirişin eğilme talebi azalmaktadır. Bu durumda, kirişte meydana gelen dik açılı (90° veya 90° 'ye yakın) eğilme çatlakları MÇD deliklerine ulaşamadığından dolayı MÇD'lerin etkinliği çok daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır.



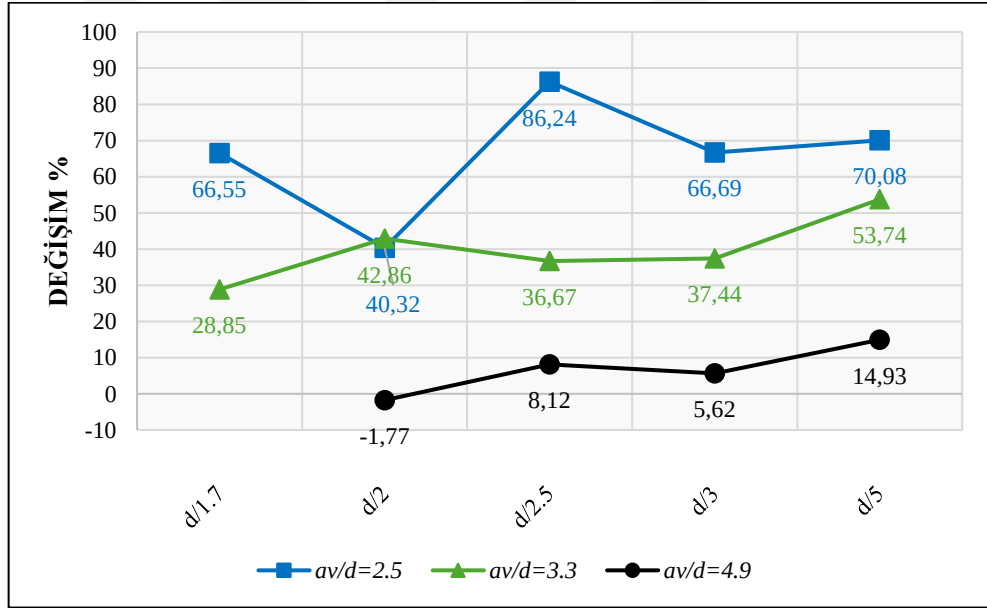
Şekil 4.55. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler ($a_v/d = 2.5$)



Şekil 4.56. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler ($a_v/d = 3.3$)



Şekil 4.57. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler ($a_v/d = 4.9$)

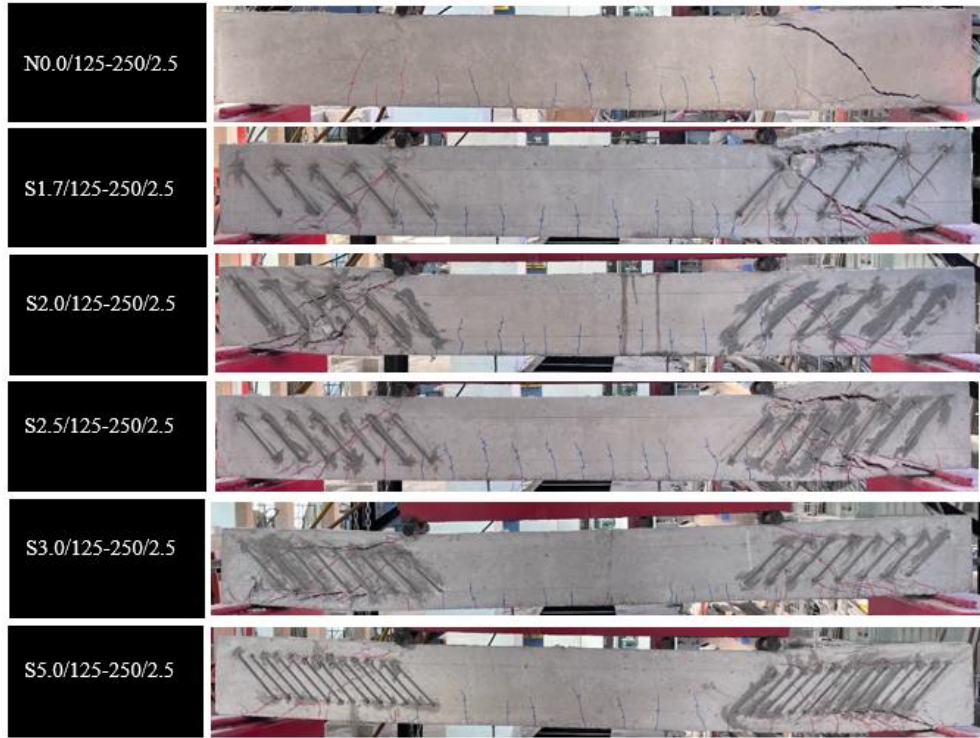


Şekil 4.58. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler a_v/d oranına göre karşılaştırılması

4.3.1.2. Kiriş hasar durumlarının değerlendirilmesi

Deneyisel çalışmada referans olarak belirlenen tüm kirişlerde (N0.0/125-250/2.5, N0.0/125-250/3.3 ve N0.0/125-250/4.9), yapılan tasarımdan beklenildiği gibi yaklaşık 45° açıyla meydana gelen diyagonal çatlak nedeniyle (eğik çekme kırılması) kesme göçmesi gerçekleşmiştir. $a_v/d = 2.5$ olan deney grubunda MÇD aralığı $d/2.5$ 'ten daha

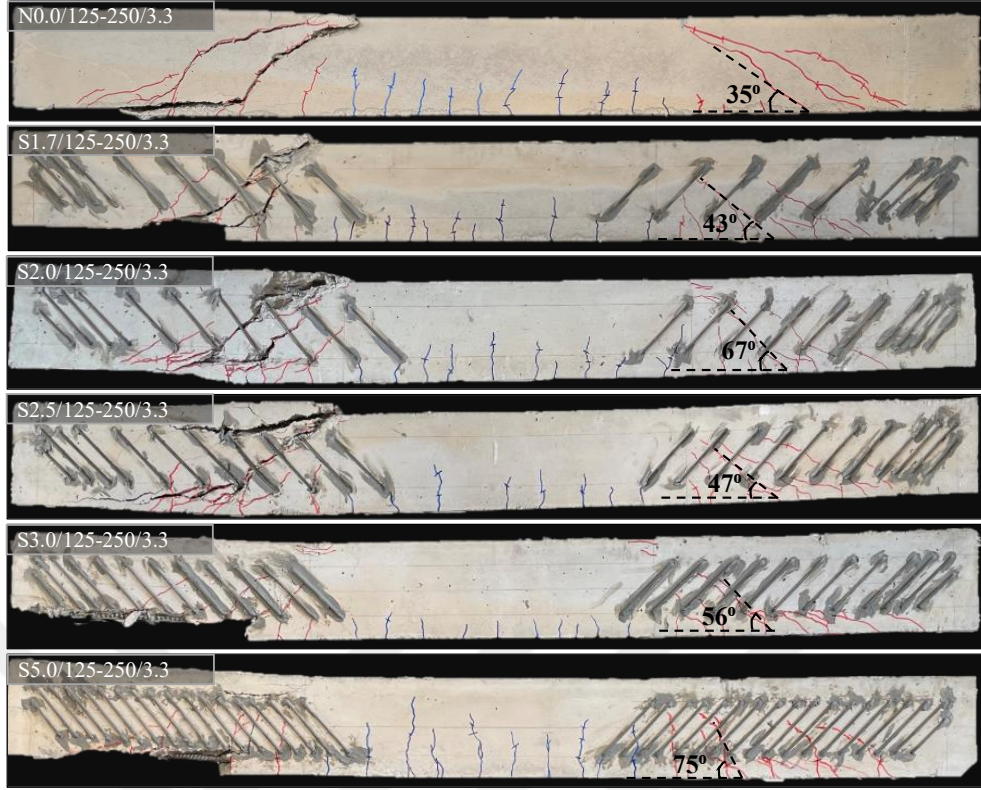
büyük olan kirişlerde (S1.7/125-250/2.5 ve S2.0/125-250/2.5), referans kirişte görülen hasar durumuna benzer şekilde kesme göçmesi meydana gelmiştir. Bu kirişlerde, MÇD'ler kesme dayanımına katkı sağlayarak asal çekme çatlaklarının ilerleyişine karşı direnç göstermiş olsa da, MÇD aralığının fazla olmasından dolayı gevrek bir şekilde meydana gelen diyagonal çekme kırılması önlenememiştir. MÇD aralığı $d/2.5$ olan kiriş numunesinde (S2.5/125-250/2.5), kiriş davranışında diyagonal çekme etkisi ile birlikte boyuna donatı ile beton arasındaki aderans gerilmelerinin aşılması sonucu ortaya çıkan splitting (aderans hatası kırılması) de etkili olmuştur. MÇD aralığı $d/2.5$ 'ten daha sık olan kiriş numunelerinde (S3.0/125-250/2.5 ve S5.0/125-250/2.5), ani bir şekilde meydana gelen diyagonal çekme hasarı, daha sık yerleştirilen MÇD'ler tarafından engellenmiş ve artık kiriş davranışına tamamen splitting etkisi hâkim olmuştur. Şekil 4.59'da $a_v/d = 2.5$ olan deney grubuna ait kirişlerin deney sonu göçme durumları gösterilmiştir.



Şekil 4.59. Kirişlerin deney sonu göçme tipleri ($a_v/d = 2.5$)

Şekil 4.60'da $a_v/d = 3.3$ olan deney grubuna ait kirişlerin deney sonu göçme görüntüleri verilmiştir. Bu grupta MÇD aralığı $d/2$ 'den daha büyük olan kiriş numunesinde (S1.7/125-250/3.3), MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısı az olmuştur. MÇD uygulamasının etkili olabilmesi için kirişte meydana gelen yaklaşık 45° açılı diagonal tension çatlaklarının en az 1 tane MÇD tarafından karşılanması

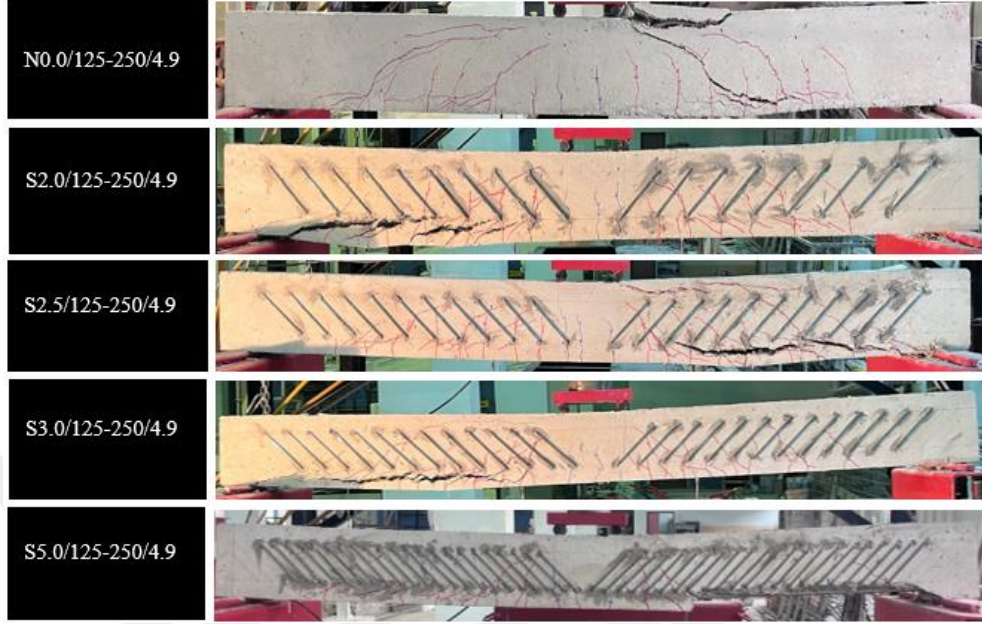
gerekmektedir. Bu kapsamda MÇD ile güçlendirme uygulamasında TS500’de etriyeler için belirtilen $d/2$ sınır şartına benzer şekilde diagonal tension çatlaklarının en az 1 tane MÇD’ye denk gelebilmesi için MÇD aralığının $d/2$ ’den daha az olması gerekmektedir. Fakat S1.7/125-250/3.3 numunesinde MÇD aralığı $d/2$ ’den fazla olduğundan dolayı kirişte meydana gelen diyagonal çekme çatlakları yeterli sayıda MÇD’ye denk gelmemektedir. Bu nedenle çatlaklar MÇD’ler arasından ilerleyerek diyagonal çekme kırılmasından dolayı kesme göçmesine sebep olmuştur. MÇD aralığı $d/2$ olan kiriş numunesinde (S5.0/125-250/3.3), MÇD’ler %53.74 oranında kesme kapasitesi artışı sağlayarak diyagonal çekme çatlaklarını önemli ölçüde engellemiştir. Ancak, bu kiriş numunesinde diyagonal çekme ve splitting etkisiyle göçme gerçekleşmiştir. Kiriş numunesinde diyagonal çekme göçmesi önlendiğinde, yük artışıyla beraber boyuna çekme donatılarında daha büyük çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Sonuç olarak, bu yüksek çekme gerilmelerinin karşılanabilmesi için daha fazla aderansa ihtiyaç duyulmakta ve bu nedenle donatılardan betona daha fazla aderans gerilmesi aktarılmaktadır. Kirişte kullanılan MÇD’lerin sıklaştırılmasıyla birlikte splitting gerilmeleri artmakta dolayısıyla beton çekme dayanımı zorlanmaktadır. Artan yükler altında beton çekme dayanımının aşılmasıyla kirişte splitting hasarı meydana gelmektedir. MÇD aralığının $d/3$ ve $d/5$ olduğu S3.0/125-250/3.3 ve S5.0/125-250/3.3 deney kirişlerinde ise diyagonal çekme göçmesi tamamen önlenmiş ve kiriş davranışına splitting etkisi hâkim olmuştur (Şekil 4.60).



Şekil 4.60. Kirişlerin deney sonu göçme tipleri ($a_v/d = 2.5$) (Uysal, 2024)

$a_v/d = 4.9$ olan deney grubuna ait kirişlerin deney sonu göçme tipleri Şekil 4.61’de sunulmuştur. Bu deney grubunda, a_v/d oranı önceki deney gruplarındaki 2.5 ve 3.3 değerlerinden daha yüksek olduğundan, MÇD’lerin kesme kapasitesine olan katkısı azalmıştır. Bu azalmanın temel nedeni, a_v/d oranının 2.5’ten 4.9’a doğru artmasıyla birlikte kirişteki kesme kuvveti talebinin azalması ve dik açılı eğilme çatlaklarının kiriş boyunca yayılmasıdır. Bu kapsamda, S2.0/125-250/4.9 ve S2.5/125-250/4.9 kiriş numunelerinde, MÇD’ler referans kiriş kapasitesine kıyasla kesme kapasitesinde düşük düzeyde bir artış (-%1.77 ve +%8.12) sağlamış olsalar da, diyagonal çekme hasarı önemli ölçüde önlenmiştir. Ayrıca, kirişlerin göçme modları diyagonal çekme göçmesinden, splitting göçmesine doğru değişmiştir. Bu numunelerde, diyagonal çekme etkisiyle birlikte splitting etkisiyle göçme gerçekleşmiştir. Daha sık MÇD yerleşimine sahip olan S3.0/125-250/4.9 ve S5.0/125-250/4.9 kiriş numunelerinde ise diyagonal çekme hasarı MÇD’ler tarafından önlenmiş ve tamamen splitting etkisiyle göçme gerçekleşmiştir (Şekil 4.61). Aslında bu durum kirişin a_v/d oranının 4.9 olmasından kaynaklı olarak fazla eğilmesi ve MÇD’lerin boyuna donatıyı saramamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle MÇD alt deliklerinin altında kalan beton blok ile alt deliklerinin üstünde kalan beton blok

ayrı hareket etmeye çalışırken yatayda oluşan kayma gerilmesi ve boyuna donatıların maruz kaldığı kaldırma etkisiyle bu hasarlar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.61. Kirişlerin deney sonu göçme tipleri ($a_v/d=4.9$)

4.3.2. Kiriş kesit yüksekliğinin değişimi

Çalışmanın bu bölümünde, kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanan kirişler üzerinde yapılan $h = 360$ mm için 6 deney ile Uysal (2024) çalışmasında $h = 250$ mm için yapılan 6 deneyin sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kiriş kesit yüksekliği değişimi için incelenen kiriş deney sonuçları, özet halinde Çizelge 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur. Ayrıca, bu deney kirişlerine ait yük-deplasman grafikleri, kiriş kesit yüksekliği aynı olan deney kirişlerinin yük-deplasman eğrileri kendi arasında karşılaştırılacak şekilde, $h = 360$ mm ve $h = 250$ mm için sırasıyla Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Deney sonuçları ($h = 360$ mm)

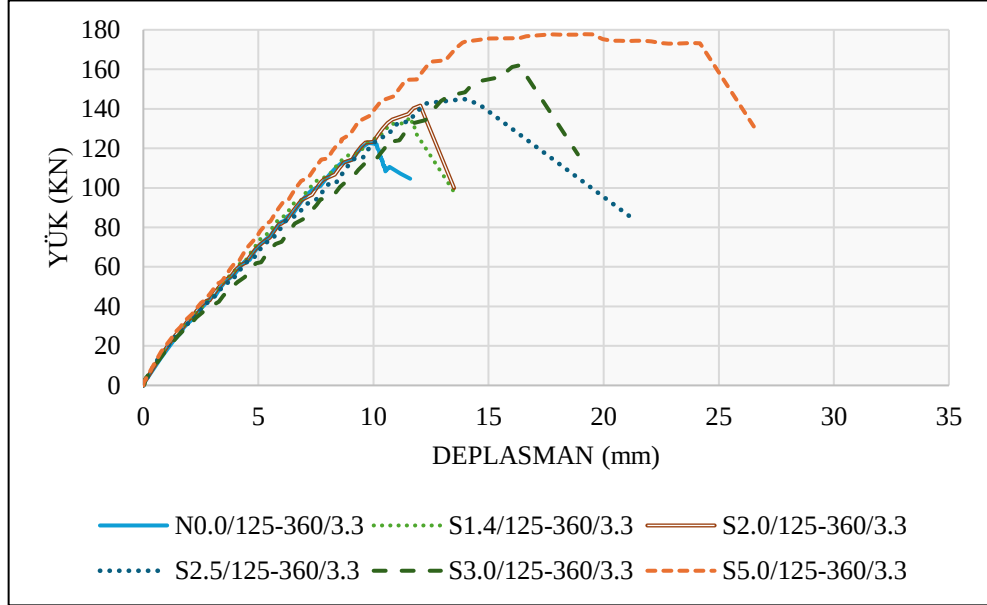
Numune isimlendirmesi	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Göçme Tipi*
N0.0/125-360/3.3	7.91	9.77	11.62	1.47	13.19	12.56	122.72	104.32	DT
S1.4/125-360/3.3	8.72	11.57	12.54	1.44	13.20	11.70	135.41	115.10	DT
S2.0/125-360/3.3	9.44	12.03	12.99	1.38	12.76	11.77	141.64	120.39	DT
S2.5/125-360/3.3	10.06	13.94	16.79	1.67	12.25	10.40	144.97	123.23	DT+S
S3.0/125-360/3.3	12.45	16.35	17.71	1.42	11.06	9.91	162.02	137.72	DT+S
S5.0/125-360/3.3	11.18	19.13	25.41	2.27	13.52	9.29	177.77	151.11	DT+S

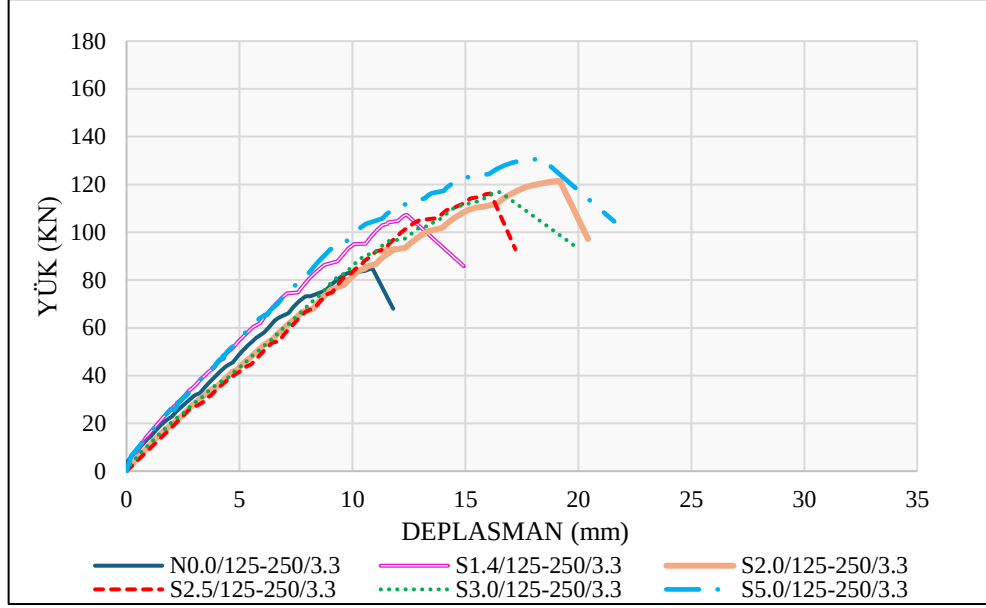
*Burada DT diyagonal çatlak nedeniyle kesme göçmesini, S ise betonda oluşan yarılmadan dolayı (splitting) kesme göçmesini temsil etmektedir.

Çizelge 4.5. Deney sonuçları ($h = 250$ mm)

Numune isimlendirmesi	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Göçme Tipi*
N0.0/125-250/3.3	7.80	10.87	11.57	1.48	9.27	7.82	85.02	72.26	DT
S1.4/125-250/3.3	9.64	12.41	19.22	1.52	9.46	8.64	107.28	91.18	DT
S2.0/125-250/3.3	14.15	19.18	20.43	1.44	7.30	6.33	121.46	103.24	DT
S2.5/125-250/3.3	12.03	16.12	17.09	1.66	8.21	7.21	116.20	98.77	DT+S
S3.0/125-250/3.3	12.60	16.53	14.30	1.48	7.88	7.07	116.85	99.32	S
S5.0/125-250/3.3	12.25	18.39	10.39	1.35	9.07	7.11	130.71	111.11	S

*Burada DT diyagonal çatlak nedeniyle kesme göçmesini, S ise betonda oluşan yarılmadan dolayı (splitting) kesme göçmesini temsil etmektedir.

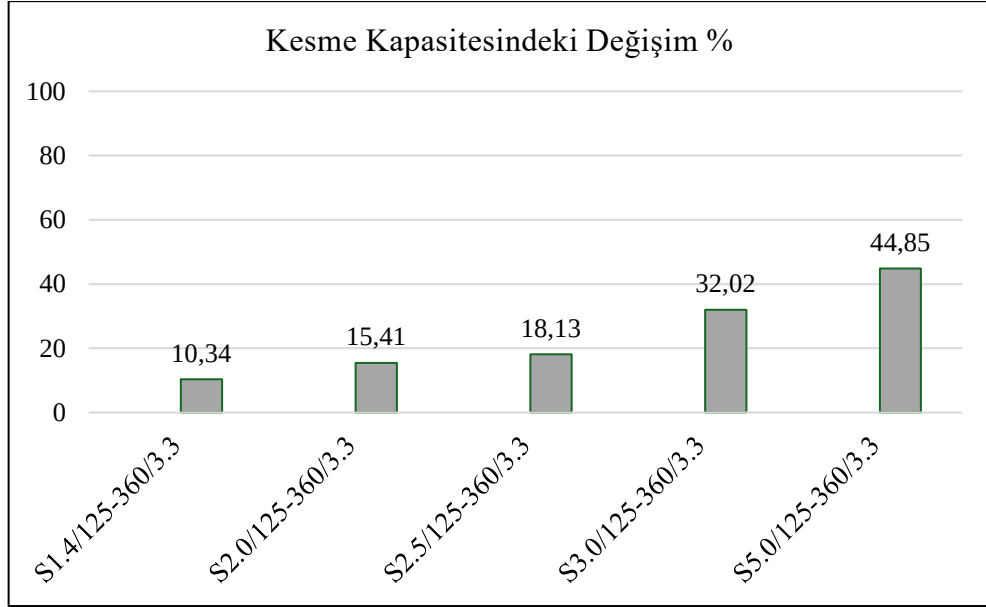
Şekil 4.62. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması yükseklik değişimi ($h = 360$ mm)



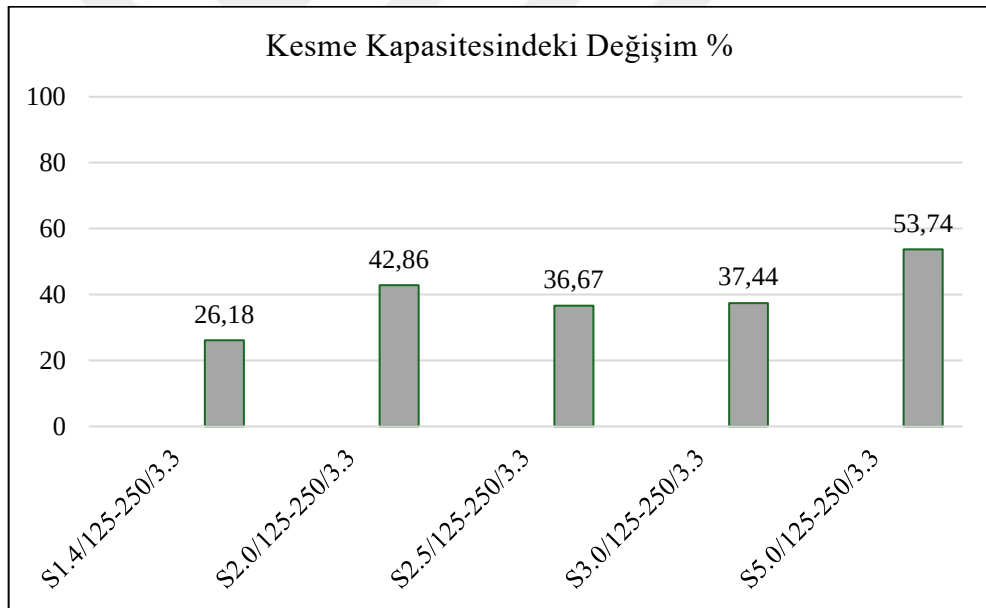
Şekil 4.63. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması ($h = 250$ mm) (Uysal, 2024)

4.3.2.1. Kesme kapasitesinin değerlendirilmesi

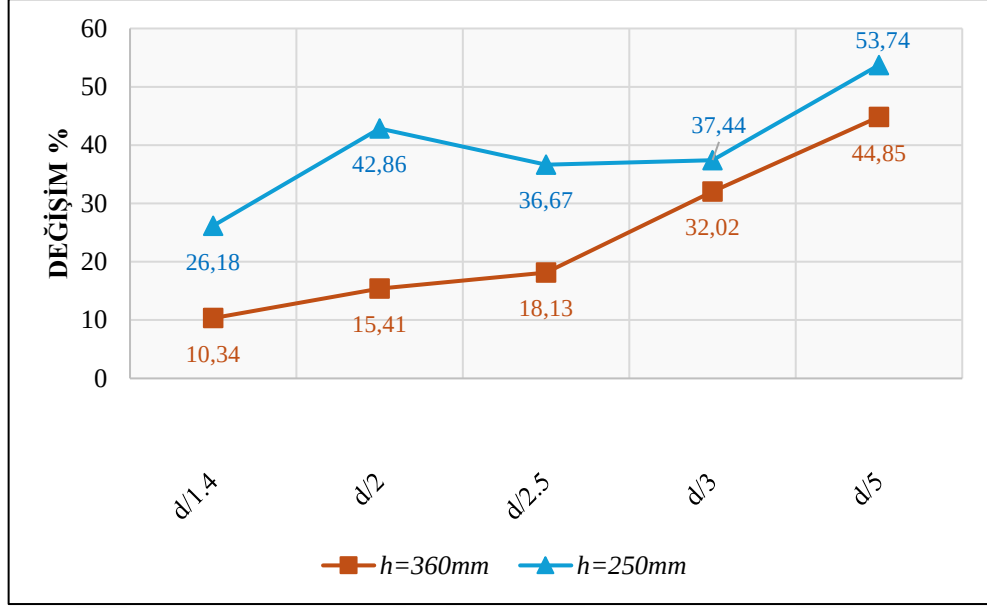
Kiriş kesit yüksekliği 360 mm ve 250 mm olan kiriş numunelerinde, MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine kıyasla kesme kapasitesinde meydana gelen yüzdelik oransal değişimler, sırasıyla Şekil 4.64 ve 4.65’de sunulmuştur. Ayrıca, deneysel çalışmada test edilen kiriş numunelerinin kesme kapasitelerindeki değişimler, kiriş kesit yüksekliğine göre Şekil 4.66’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kiriş kesit yüksekliği 360 mm olan deney kirişlerinde, MÇD’lerin kiriş kesme kapasitesine etkisi %10.34 ile %44.85 aralığında değişmiştir (Şekil 4.64). Kiriş kesit yüksekliği 250 mm olan ve aynı değişkenlere sahip deney kirişlerinde ise bu etki %26.18 ile %53.74 aralığında değişmiştir (Şekil 4.65). İki deney grubu karşılaştırıldığında, 360 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerinde, 250 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerine kıyasla, sırasıyla %15.84, %27.45, %18.54, %5.42 ve %8.89 oranlarında kesme kapasitesinde daha az artış gözlenmiştir. Ancak bu durum her iki deney grubunda aynı MÇD oranına sahip olmasından kaynaklanmıştır. Daha yüksek kirişlerde betonun kesme kapasitesine katkısının daha fazla olmasından dolayı toplam kesme kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle esasen MÇD’lerin kesme kapasitesine etkisi neredeyse aynı olmasına karşın, toplam kesme kuvveti içindeki MÇD’nin payı azaldığından MÇD’nin kesme kapasitesine daha az oranda katkıda bulunuyor gibi algılanmasına yol açmaktadır.



Şekil 4.64. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler ($h = 360$ mm)



Şekil 4.65. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimler ($h = 250$ mm)

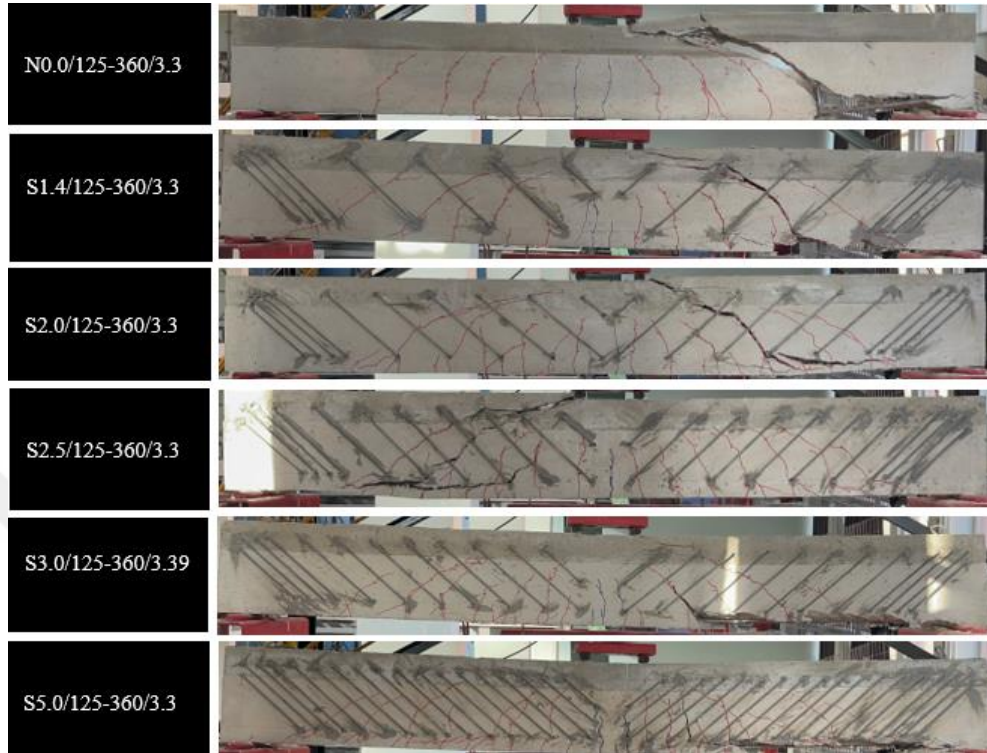


Şekil 4.66. MÇD ile güçlendirilen kirişlerin referans kiriş numunesine kıyasla kesme kapasitesindeki yüzdelik değişimlerin kiriş kesit yüksekliğine göre karşılaştırılması

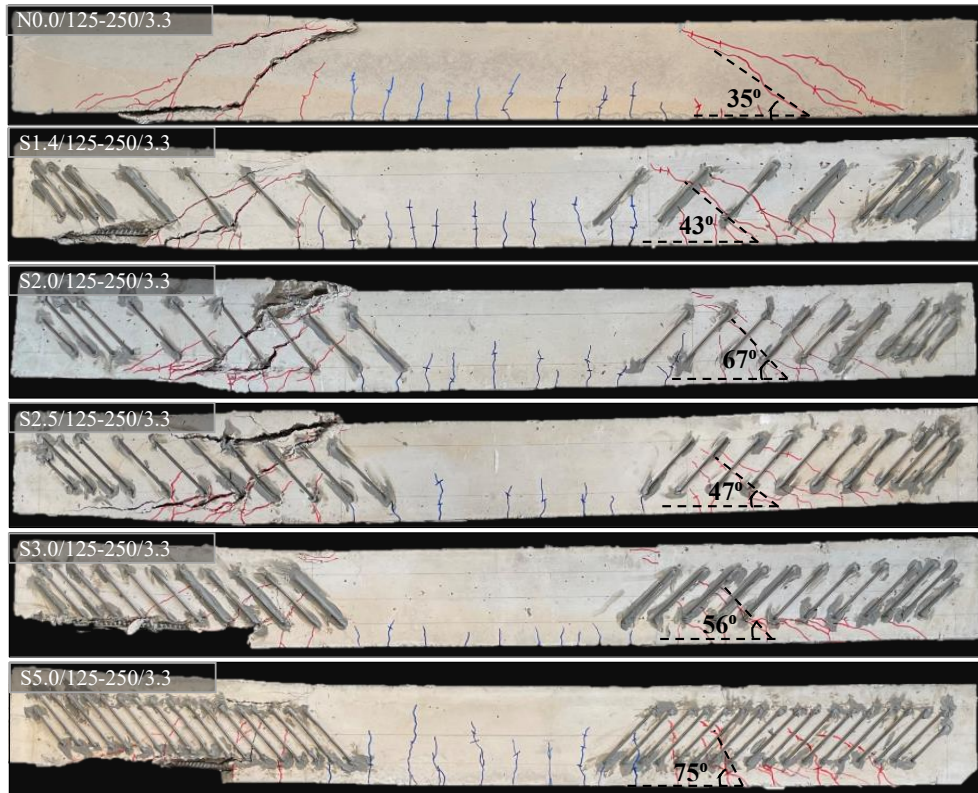
4.3.2.2. Kiriş hasar durumlarının değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında test edilen $h = 360$ mm olan kirişlerin deney sonu göçme tipleri Şekil 4.67’de ve Uysal, (2024) çalışmasında test edilen $h = 250$ mm olan kirişlerin deney sonu göçme tipleri ise 4.68’de verilmiştir. Kiriş yüksekliği 360 mm olan deney grubunda yer alan referans kiriş numunesinde, tasarımdan beklenildiği gibi diyagonal çekme hasarından göçme gerçekleşmiştir. Bu deney grubunda, MÇD aralığı $d/2.5$ ’dan daha büyük olan kirişlerde (S1.4/125-250/3.3 ve S2.0/125-250/3.3), MÇD’ler kiriş kesme kapasitesine düşük oranda (sırasıyla %10.34, 15.41 ve 18.13) katkı sağlamış ve bu nedenle diyagonal çekme göçmesi engellenememiştir. MÇD aralığı $d/3$ olan kiriş numunesinde (S3.0/125-250/3.3), MÇD’ler %32.02 oranında kesme kapasitesinde artış sağlamış olsa da, diyagonal çekme çatlakları tamamen önlenememiş ve kiriş numunesinde diyagonal çekme ve splitting göçmesi gerçekleşmiştir. Ayrıca, bu kiriş numunesinde diyagonal çekme göçmesi gerçekleştikten hemen sonra kiriş alt bölgesindeki boyuna donatılar aşağıya doğru ilerlemeye çalışırken oluşan kaldırma etkisiyle kabuk betonda dökülme meydana gelmiştir. En sık MÇD aralığına ($d/5$) sahip olan kiriş numunesinde (S5.0/125-250/3.3), MÇD’ler %44.85 kesme kapasitesi artışı sağlayarak diyagonal çekme göçmesini kısmen önlemiş ve kirişte splitting etkisiyle göçme gerçekleşmiştir. Kiriş yüksekliği 250 mm ve 360 mm için göçme tipleri karşılaştırıldığında, $h = 250$ mm ve $h = 360$ mm olan deney gruplarında MÇD aralığı $d/2.5$

olan kiriş numunesiyle beraber, diyagonal çekme hasar durumundan splitting hasar durumuna doğru davranış değişimi başlamıştır.



Şekil 4.67. Yükseklik değişimi için yapılan numunelerin hasar tipleri ($h = 360$ mm)



Şekil 4.68. Yükseklik değişimi için yapılan numunelerin hasar tipleri ($h = 250$ mm) (Uysal, 2024)

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışma kapsamında, toplam 17 adet kiriş numunesi dört noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Bu numunelerden 3 tanesi referans kesme kirişi olmak üzere, 14 tanesi ise 45° açılı MÇD yöntemi ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, Uysal (2024) tez çalışmasındaki deney sonuçları da bu çalışmanın verileriyle karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ve kiriş kesit yüksekliği değişken parametreler olarak belirlenmiş ve bu parametreler doğrultusunda kirişlerin yük-deplasman eğrisi, hasar türü ve yük taşıma kapasitesi incelenerek yorumlanmıştır. Çalışmanın spesifik bulguları aşağıda özetlenmiştir:

1. Kirişlerde MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısını gözlemlemek amacıyla, eğilme kapasitesi olabildiğince yüksek ve kesme kapasitesi ise olabildiğince düşük olacak şekilde kesit ve donatı tasarımı yapılmıştır. Yapılan kiriş donatı tasarımından beklenildiği gibi referans numunelerde ve güçlendirme uygulanan tüm deney numunelerinde kesme hasarı (diyagonal çekme - splitting) sonucu göçme gerçekleşmiştir.
2. Deney kirişlerinde uygulanan MÇD aralığı sıklaştıkça göçme mekanizması diyagonal çekme kırılmasından splitting kırılmasına doğru değişim göstermektedir. Güçlendirilen kirişlerde MÇD aralığı azaldıkça, kirişin kesme kapasitesine olan katkısı artmakta ve kiriş diyagonal çekmeden ziyade splitting göçmesine maruz kalmaktadır. Diyagonal çekme göçmesi ani ve gevrek bir şekilde gerçekleştiği için, MÇD aralığının doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Diyagonal çekme göçmesi ani ve gevrek bir şekilde meydana geldiğinden dolayı, MÇD aralığının doğru seçilmesi kritik önem taşımaktadır.
3. Deney kirişlerinde a_v/d oranı 2.5'ten 4.9'a doğru arttıkça MÇD'lerin etkinliği azalmıştır. a_v/d oranı 2.5 olan deney grubunda kesme kapasitesinde en yüksek artış %86.24 olarak gözlenirken, a_v/d oranı 4.9 olan deney grubunda bu artış %14.93'e düşmüştür. Bu durumun temel nedeni, a_v/d oranının artmasıyla birlikte kirişlerde kesme kuvveti talebi azalırken eğilme açısından zorlanmasıdır. Bu durum, dik açılı eğilme çatlaklarının kiriş boyunca yayılmasına yol açmaktadır. Bu çatlaklar, MÇD'ler için açılan deliklerle birleşmekte ve MÇD'lerin etkinliğini azaltmaktadır. Öte yandan, a_v/d oranı azaldıkça kirişlerde kesme kuvveti talebi

artmakta ve kirişin eğilme talebi azalmaktadır. Bu durumda, kirişte meydana gelen dik açılı eğilme çatlakları MÇD deliklerine ulaşamadığından dolayı MÇD'lerin etkinliği artmaktadır.

4. Kiriş kesit yüksekliği 250 mm'den 360 mm'ye doğru arttıkça MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısı azalmıştır. 360 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerinde, 250 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerine kıyasla, sırasıyla %15.84, %27.45, %18.54, %5.42 ve %8.89 oranlarında kesme kapasitesinde daha az artış gözlenmiştir. Ancak bu durum her iki deney grubunda aynı MÇD oranına sahip olmasından kaynaklanmıştır. Daha yüksek kirişlerde betonun kesme kapasitesine katkısının daha fazla olmasından dolayı toplam kesme kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle esasen MÇD'lerin kesme kapasitesine etkisi neredeyse aynı olmasına karşın, toplam kesme kuvveti içindeki MÇD'nin payı azaldığından MÇD'nin kesme kapasitesine daha az oranda katkıda bulunuyor gibi algılanmasına yol açmaktadır.
5. MÇD ile güçlendirilen numunelerin deney sonu hasar durumları incelendiğinde, MÇD'lerde herhangi bir sıyrılma (bir numune hariç) olmadığı görülmüştür. Bu durumda, MÇD ile güçlendirme uygulamasında ankraj derinliğinin 10Ø olarak alınmasının MÇD ile beton arasındaki aderans güvenliği açısından yeterli olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, beton dayanımı, deliğin temizlenme yöntemi ve kullanılan epoksinin mekanik özellikleri gibi faktörlerin de önemli etkileri olduğu belirtilmelidir.
6. Yapılan tez çalışmasında kullanılan MÇD güçlendirme yöntemi, kiriş kesme kapasitesine %86.24'e kadar katkı sağlayarak, kesme kapasitesi zayıf kiriş elemanların MÇD'ler ile güçlendirilebileceğini göstermesi açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışma, gelecek araştırmalar için değerli bir referans kaynağı oluşturmaktadır.

5.2. Öneriler

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

1. Deneylerde her tip numune için birer kiriş deneyi yapılmıştır. Fakat, her numune için deney sayısının artırılması ve sonuçların ortalamasının alınması, sonuçların güvenilirliğini artırabilir.

2. Güçlendirme uygulamasında kullanılan MÇD'lerin ankraj etkinliğini araştırmak için MÇD çapı, ankraj derinliği, malzeme tipi ve epoksi türü değişken parametreler seçilerek deneysel çalışma yapılabilir.
3. Deneylerde kullanılan boyuna ve enine donatı çapı ve miktarı, MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısını gözlemleyebilmek için belirli bir standartta tutulmuştur. Ancak, daha az boyuna donatı kullanılarak MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısı sonucu kirişlerde eğilme davranışı gözlemlenebilir.
4. Beton sınıfı ve etriye aralığı değişken parametreler seçilerek, bu faktörlerin MÇD uygulamaları üzerindeki etkileri araştırılabilir.
5. MÇD ile güçlendirme uygulamasının yangın ve korozyon gibi uzun vadeli faktörler altındaki performansı incelenebilir.
6. Bu çalışma kapsamında düşey yükler altında incelenen MÇD uygulaması, deprem ve diğer dinamik yükler altında etkinliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- 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., 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. and 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. and Arslan, M. H., 2023, Strengthening shear deficiency in undamaged reinforced concrete beams using innovative 45° mechanical steel stitches. *Structures*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105523>
- Alshlash, S., 2019, Betonarme kirişlerde onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi ve maliyet analizi, Yüksek lisans tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Alshlash, S., Aksoylu, C., Erkan, İ. H. ve Arslan, M. H., 2019, Kesme kapasitesi yetersiz ön hasarlı betonarme kirişlerin “dikiş demirleri” ile onarım/ güçlendirilmesi, IV. *Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik*, Ankara, 178-183.
- Arslan, G., Sevuk, F. and Ekiz, I., 2006, Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams, *Construction and Building Materials*, 22(3), 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.009>
- Arslan, M. H., Yazman, Ş., Hamad, A. A., Aksoylu, C., Özkılıç, Y.O. and Gemi, L., 2022, Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics, *Structures*, 39, 527-542. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.046>
- Askar, M. K., Hassan, A. F. and Al-Kamaki, Y. S. S. (2022). Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art, *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01189. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01189>
- Aslan, S., Erkan, İ. H., Aksoylu, C. and Arslan, M. H., 2024, An experimental investigation and cost analysis of flexural or shear strengthening pre-damaged RC beams, *Structures*, 62, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106091>
- Arslan, M., 1991. Betonarme Kirişlerin Epoksiyle Yapıştırılan Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi*, Ankara, 17576.

- Balcı, M.T, 2019, Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin ankrajlı sarım yöntemi kullanılarak bazalt elyaf kumaşlar ile güçlendirilmesi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi*, 593977.
- Bazant, Z. P. and Kim, J. K., 1984, Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams. *ACI Journal*, 81(5), 456-468.
- Bazant, Z.P. and Planas, J., 1998, Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, *Routledge*. New York, <https://doi.org/10.1201/9780203756799>
- Çakıroğlu, M.A. ve Terzi, S. 2010, Betonarme Sistemlerin Mantolama İle Güçlendirilmesi, *e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences*, 1A0116, 5, (4), 658-670.1A0116. <https://dergipark.org.tr/en/pub/nwsaeng/issue/19860/212828>
- Doğangün, A., 2020, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Erkan, İ. H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M. H., 2019, Ön hasarlı kesme kirişlerinin çelik plakalar ile onarımı/güçlendirilmesi, *The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference (IATENS'19)*, Seydişehir/Türkiye, 830-837.
- Erkan, İ. H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M. H., 2022, Mekanik çatlak kilit sistemi ile betonarme kiriş onarım ve güçlendirme yöntemi, *Türk Patent Enstitüsü*, TR 2020 01119 B.
- Ersoy, U., Özcebe, G. ve Canbay, E., 2019, Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri, *Evrin Yayınevi*, İstanbul.
- Hamoush, S. and Ahmad, S. H., 1997, Concrete crack repair by stitches, *Materials and Structures*, 30, 418-423.
- Haroon, M., Moon, J. S. and Kim, C., 2021, Performance of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer strips, *Materials*, 14(19), 5866. <https://doi.org/10.3390/ma14195866>
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Deierlein, G. G., Dean, B. S. and Chou, J. H., 2010, Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 481–491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000318](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000318)
- Hwang, S. J., Yang, Y. H. and Li, Y. A., 2022, Maximum shear strength of reinforced concrete beams. *ACI Materials Journal*, 119(2), 19-30.
- Ismail, K. S., 2016, Shear behaviour of reinforced concrete deep beams, Doctoral dissertation, *University of Sheffield*, Sheffield/England.
- Jaber, H.T., 2021, Influence of size on the shear strength of reinforced concrete beams, Doctoral dissertation, *University of Technology*, Baghdad/Iraq.

- Kaltakci, M. Y., Arslan, M. H., Korkmaz, H. H. and Ozturk, M., 2007, An investigation on failed or damaged reinforced concrete structures under their own-weight in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 14(6), 962-969.
- Kim, J. K. and Park, Y. D., 1996, Prediction of shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, *ACI Materials Journal*, 93(3), 213-222.
- Lafta, Y. J. and Ye, K., 2016, Specification of deep beams affect the shear strength capacity, *Civil and Environmental Research*, 8(2), 56-68.
- Liu, Y. and Dai, F., 2021, A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), 1203-1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>
- Muttoni, A. and Ruiz, M. F., 2008, Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width, *ACI Structural Journal*, 105(2), 163-172. <https://infoscience.epfl.ch/record/116126>
- Orbay, A., 2005, Ayrıntılı Örnekleriyle Betonarme I., *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Özkal, F.M, 2017, Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni Ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi, 20. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, ss.1-11. <https://avesis.ebyu.edu.tr/yayin/69eb07a8-b35b-494f-b76a-155f97c5f697/kesme-acikligi-kucuk-olan-betonarme-kirislerin-etriye-duzeni-ve-kenetlenme-yonunden-incelenmesi>
- Öztürk, M., 2018, Türkiye bina deprem yönetmeliği ve türkiye deprem tehlike haritası ile ilgili iç anadolu bölgesi bazında bir değerlendirme, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 17(2), 31-42.
- Pampanin, S., Calvi, G. M. and Moratti, M., 2002, Seismic behaviour of RC beam-column joints designed for gravity loads, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, 726, 1-10.
- Polat K, 2014, "Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Yapı Elemanlarının Kapasite Hesabı için Analitik Yöntemler" Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Uludağ Üniversitesi, Bursa. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/9d9e607d-d426-44be-9f5d-7e9fd2a4a32e/content>
- Qin, Z., Tian, Y., Li, G. and Liu, L., 2019, Study on bending behaviors of severely pre-cracked RC beams strengthened by BFRP sheets and steel plates, *Construction and Building Materials*, 219, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.056>
- Saatci, S. and Vecchio, F. J., 2009, Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 106(1), 78.
- Tankut, T., & Arslan, M. (1992). Epoksili Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş Davranışı. *Teknik Dergi*, 3(14). https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/12829/155504#article_cite

- TBDY-2019, 2019, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Ankara, 1-416
- TDY-2007, 2007, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.
- Tekeli, H. Esen, B. Övey, H.M. Arapoğlu, M. Pınarlık, M. Turgut, R., 2015, Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 13-20.
- TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-EN 1992-1-1, Beton yapıların tasarımı - Bölüm 1-1: Genel kurallar ve binalara, köprülere ve inşaat mühendisliği yapılarına uygulanacak kurallar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2024.
- TS-EN 12390-3:2019, Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2019.
- TS EN ISO 15630-1:2019, Çelik, Betonarme ve Ön Gerilmeli Beton için Deney Metotları - Bölüm 1: Donatı çubukları, halatı ve teli, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2019.
- TS EN 1504-3:2006, Beton Yapılar - Koruma ve Tamir için Mamul ve Sistemler - Tarifler, Gerekler, Kalite Kontrol ve Uygunluk Değerlendirmesi - Bölüm 3: Yapısal ve Yapısal Olmayan Tamir, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2006.
- TS 708, Betonarme için Donatı Çeliği, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2016.
- Turan, A.F., 2022, Betonarme kirişlerde donatı oranının ve genişlik/yükseklik oranının kiriş davranışına etkileri, Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Türk, R., 2020, Evaluating the shear behavior of reinforced concrete deep beams without shear reinforcement using strut and tie model, Master of science thesis, *European University of Lefke Institute of Graduate Studies and Research*, Lefke/KKTC.
- Uysal, Y., Aksoylu, C., Ozkılıç, Y. O., Basaran, B. and Arslan, M. H., 2023, A novel easy apply method on strengthening RC shear deficient members: 45° angled mechanical steel stitches, *3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23)*, Trabzon, 1565-1575. <https://doi.org/10.31462/icearc.2023.sme620>
- Uysal, Y., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O. ve Arslan, M. H., 2022, Kesme donatısı yetersiz ön hasarsız betonarme kirişlerin yenilikçi bir yaklaşımla güçlendirilmesi: mekanik çelik dikişler, 8. *Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı*, Eskişehir, 218-223.
- Uysal, Y., 2024, Kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin 45 derece açılı mekanik çelik dikişlerle güçlendirilmesinde optimum tasarımın araştırılması, Yüksek lisans tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya

- Vecchio, F. J., 2000, Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation, *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1070-1077. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:9\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1070))
- Wang, H. and Belarbi, A., 2013, Flexural durability of FRP bars embedded in fiber-reinforced-concrete, *Construction and Building Materials*, 44, 541-550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.065>
- Yang, I. H., Joh, C. and Kim, B. S., 2010, Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, 32(11), 3478-3487. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.017>
- Yılmaz, Z., Çankaya, F. ve Karakaya, A., 2018, Bina maliyet oranı ve bina güçlendirme maliyetini etkileyen faktörler arasındaki ilişki, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (51), 151-174.
- Zhang, J. H., Li, S. S., Xie, W. and Guo, Y. D., 2020, Experimental study on shear capacity of high strength reinforcement concrete deep beams with small shear span-depth ratio, *Materials*, 13(5), 1218.. <https://doi.org/10.3390/ma13051218>
- Zhang, S. S., Yu, T. and Chen, G. M., 2017, Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: Current status and research needs, *Composites Part B: Engineering*, 131, 30-42. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2017.07.072>