T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN 45 DERECE AÇILI MEKANİK ÇELİK DİKİŞLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNDE OPTİMUM TASARIMIN ARAŞTIRILMASI

Yusuf UYSAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf UYSAL tarafından hazırlanan "**Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin 45 Derece Açılı Mekanik Çelik Dikişlerle Güçlendirilmesinde Optimum Tasarımın Araştırılması**" adlı tez çalışması 11/06/2024 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.

Yusuf UYSAL

Tarih:11/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN 45 DERECE AÇILI MEKANİK ÇELİK DİKİŞLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNDE OPTİMUM TASARIMIN ARAŞTIRILMASI

Yusuf UYSAL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

2024, 143 Sayfa

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

Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz olan kirişler, pratik, ekonomik ve yenilikçi bir yöntem olan U formundaki Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) ile güçlendirilmiştir. MÇD'ler, kiriş gövdesinin her iki yüzünde, kesme açıklığı boyunca 45 derecelik açıyla uygulanmıştır. Bu kapsamda, biri referans olmak üzere diğer yedisi farklı MÇD aralıklarına sahip toplam sekiz kesme kiriş numunesi, düşey yükler altında test edilmiştir. MÇD'lerin çapı (Ø6), ankraj derinliği (10Ø) ve mekanik özellikleri ile betonarme kirişin geometrisi (125 mm × 250 mm × 2500 mm), boyuna (3Ø16 çekme ve 2Ø12 basınç) ve enine (Ø6/350 mm) donatıları sabit tutulmuştur. Kirişe uygulanan MÇD aralıkları, (*d*/5'ten d'ye kadar olan aralıklar) değiştirilerek, dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketim kapasitelerindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, en sık MÇD aralığına (*d*/5) sahip kirişte %53.74'lük bir kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Bununla birlikte, nominal akma ve toplam enerji tüketim kapasitesi, referans numuneye göre sırasıyla %144 ile %366 oranında artış göstermiştir. Kirişlerde yapılan hasar analizine göre en sık aralığa sahip MÇD uygulamasında (*d*/5), splitting (aderans hatası) hasarı gözlenirken, daha seyrek olan *d*/2 aralıklı yerleşime doğru ilerledikçe, hasar daha ani ve kırılgan olan diagonal tension (eğik çekme hasarı) göçmesine dönmüştür. *d/2* aralıklı yerleşimden daha seyrek olan *d*'ye doğru ilerledikçe, artık davranışa sadece diagonal tension hasarı hakim olmuştur. Son olarak, kirişlerde MÇD aralığı *d*/5'den *d*/2' ye arttıkça, kirişlerin nominal akma rijitliği, referans kirişe göre %2.1-%21.2 arasında düşüş eğilimi gösterse de, aralığın *d*/2'yi geçmesiyle beraber göçme modunun değişmesine bağlı olarak kiriş akma rijitlikleri tekrar referans kiriş seviyesine (-%2.5'den %2'ye yaklaşmasıyla) çıkmıştır. Dolayısıyla, düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği ile dikkat çeken bu yeni tekniğin, kirişlerin güçlendirilmesinde oldukça etkili olduğu ifade edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, güçlendirme, kesme kirişi, kesme hasarı, mekanik çelik dikiş

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE OPTIMUM DESIGN IN THE STRENGTHENING OF REİNFORCED CONCRETE BEAMS WITH INSUFFICIENT SHEAR CAPACITY USING MECHANİCAL STEEL STITCHES ANGLED AT 45 DEGREES

Yusuf UYSAL

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Ceyhun AKSOYLU

2024, 143 Pages

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

In this study, beams with insufficient shear capacity were strengthened with U-shaped Mechanical Steel Stitches (MSS), which is a practical, economical and innovative method. MSSs were applied on both faces of the beam web at a 45-degree angle along the shear span. In this context, a total of eight shear beam specimen, one of which was a reference specimen and the other seven with different MSS intervals, were tested under vertical loads. The diameter (Ø6), anchorage depth (10Ø) and mechanical properties of the MSS, as well as the geometry of the reinforced concrete beam (125 mm × 250 mm × 2500 mm), longitudinal (3Ø16 tension and 2Ø12 compression) and transverse (Ø6/350 mm) reinforcement were kept constant. By changing the MSS intervals applied to the beam (ranging from *d*/5 to d), the changes in strength, ductility, stiffness and energy consumption capacities were examined. As a result of the study, a 53.74% increase in shear capacity was observed in the beam with the most tightened MSS interval (*d*/5). However, the nominal yield and total energy consumption capacity increased by 144% and 366%, respectively, compared to the reference beam. According to the damage analysis conducted on beams, in the most frequently encountered MSS application with a spacing of (d/5), splitting damage is observed. However, as we move towards the less frequent spacing of d/2, the damage transitions to a more sudden and brittle phenomenon known as diagonal tension failure. As we move from the d/2 spacing to the sparsest d, the behavior is now dominated by diagonal tension damage alone. Finally, as the MSS spacing in beams increases from *d*/5 to *d*/2, the nominal yield stiffness of the beams tends to decrease between 2.1% and 21.2% compared to the reference beam; however, surpassing *d*/2 leads to a change in the failure mode, resulting in the beam yield stiffness returning to the reference beam level (approaching from -2.5% to 2%) due to the change in the failure mode associated with exceeding the *d*/2 spacing. Therefore, it can be concluded that this new technique, which stands out with its low cost and easy applicability, is very effective in strengthening beams.

Keywords: Reinforced concrete, strengthening, shear beam, shear damage, mechanical steel stitches

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında yanımda olan, engin bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak bana yol gösteren, yüksek lisans tezimin ortaya çıkmasında en büyük paya sahip olan ve hem akademik ve hem de kişilik olarak örnek aldığım değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım. Bu tez çalışmam sırasında, sık sık yardımlarına ve tecrübelerine başvurduğum hocalarım Sayın Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN, Doç. Dr. Boğaçhan BAŞARAN ve Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın deneysel aşamasını gerçekleştirilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı emekli teknisyeni Sayın Yüksel ÇİFTÇİ'ye ve deneylerin yapılmasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Yardımcı Prefabrik Yapı Elemanları A.Ş., Hasçelik 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 burs imkânı sağlayan ve tez çalışmamın gerçekleşmesine katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni maddi ve manevi olarak her zaman destekleyen aileme ithaf ediyorum.

Yusuf UYSAL
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 2
1.2. Tezin Önemi 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Kirişlerde Kesme Kırılması ile İlgili Çalışmalar 5
2.2. Güçlendirme Uygulamaları ile İlgili Çalışmalar 14
2.1.1. Lifli polimerler (FRP) ile güçlendirme 14
2.1.2. Çelik plaka ve levha ile sargılama 32
2.1.3. Betonarme mantolama 36
2.1.4. NSM (Near Surface Mounted) yöntemi 38
2.1.5. Mekanik bağlantılar 45
2.1.6. Mekanik çelik dikiş yöntemi (MÇD) 51

3. MATERYAL VE METOT **59**

3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Hasarı Davranışı 60
3.1.1. Kirişlerde görülen kesme hasarı türleri 64
3.1.2. Kiriş kesme davranışı üzerine a_v/d oranının etkisi 66
3.1.3. Kesme kuvvetini dengeleyen mekanizmalar 70
3.2. Deney Numuneleri 74
3.2.1. Deney numunelerinin boyutları 75
3.2.2. Deney numunelerinin donatı detayları 77
3.2.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri 78
3.3. Güçlendirme Metodolojisi 88
3.3.1. Mekanik çelik dikişlerin (MÇD) hazırlanması 88
3.3.2. Ankraj deliklerinin açılması 89
3.3.3. Ankraj deliklerinin temizlenmesi 90
3.3.4. Ankraj deliklerinin epoksi ile doldurulması 91
3.3.5. MÇD'lerin ankraj deliklerine yerleştirilmesi 91
3.4. Deney Düzeneği 92
3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması 95
3.5.1. Sünekliğin değerlendirilmesi 95
3.5.2. Enerji tüketme kapasitesinin değerlendirilmesi 96
3.5.3. Rijitliğin değerlendirilmesi 97

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 99

4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları 100
4.1.1. Referans numune 100
4.1.2. S1-220 numunesi 102
4.1.3. S2-165 numunesi 104
4.1.4. S3-130 numunesi 106
4.1.5. S4-110 numunesi 108
4.1.6. S5-90 numunesi 110
4.1.7. S6-75 numunesi 112
4.1.8. S7-45 numunesi 114
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi 116
4.2.1. Kesme kapasitesinin değerlendirilmesi 118
4.2.2. Göçme tiplerinin değerlendirilmesi 119
4.2.3. Rijitlik açısından değerlendirme 121
4.2.4. Eğilme kapasitesinin değerlendirilmesi 121
4.2.5. Süneklik ve enerji tüketimleri açısından değerlendirme 125
4.2.6. MÇD'nin kiriş kesme kapasitesine katkısının hesaplanması 126

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 129

5.1. Sonuçlar 129
5.2. Öneriler 131

KAYNAKLAR 133

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a : Basınç bloğu derinliği, mm
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
A_v : Enine donatı alanı, mm^2
MÇD'nin kesit alanı, mm^2
B420c : Akma dayanımı en düşük 420 MPa olan nervürlü donatı tipi
b : Kiriş gövde genişliği, mm
b_w : Kiriş gövde genişliği, mm
c : Tarafsız eksen derinliği, mm
c_c : Kiriş kesitinde en dış beton örtüsü, mm
C16 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 16 MPa olan beton
C20 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 20 MPa olan beton
C25 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 25 MPa olan beton
C35 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 35 MPa olan beton
C40 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 40 MPa olan beton
C50 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 50 MPa olan beton
d : Kesitin faydalı yüksekliği, mm
d' : Paspayı, mm
$E_{elastik}$: $0.85P_{max}$ 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
f_c : Betondaki basınç gerilmesi, MPa
f_c' : Betonun tasarım basınç dayanımı, MPa
f_s' : Basınç donatısı gerilmesi, MPa
f_{su} : Donatının kopma dayanımı, MPa
f_y : Akma noktasındaki donatı gerilmesi, MPa
f_{yk} : Donatının karakteristik akma dayanımı, MPa
f_{yt} : Enine donatı akma dayanımı, MPa
$f_{yt,\,MÇD}$: MÇD'ler tarafından taşınan gerilme, MPa
F_c : Betondaki basınç kuvveti, kN
F_s : Donatıdaki toplam çekme kuvveti, kN
F_s' : Basınç donatısı arafından taşınan kuvvet, kN
h : Kiriş toplam yüksekliği, mm
l_0 : İki mesnet arasındaki mesafe, mm
M_n : Nominal moment dayanımı, kNm
P_{max} : Maksimum yük değeri, kN
P_y : Akma noktasındaki yük değerini, kN
s : Enine donatı aralığı, mm
MÇD aralığı, mm
S_{max} : Maksimum yük seviyesindeki rijitlik, kN/mm

S_y : Nominal akma noktasındaki rijitlik, kN/mm
T_g : Polimer matrisli malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı, C^o
V_c : Kesme dayanımına beton katkısı, kN
V_{cr} : Betonun eğik çatlama dayanımı, kN
V_{Exp} : Deneysel çalışma sonucunda elde edilen MÇD'li kirişlerin taşıdığı maksimum kesme kapasitesi, kN
$V_{exp,Ref}$: Referans kirişin maksimum kesme kapasitesi, kN
$V_{MÇD}$: MÇD'ler tarafından taşınan kesme kuvveti, kN
V_n : Nominal kesme kuvveti, kN
V_s : Enine donatının kesme dayanımına katkısı, kN
α : MÇD'nin boyuna donatı ile yaptığı açı, ^{o}
$\beta_1 = k_1$: Ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı
δ : Deplasman değeri, mm
δ_{max} : Maksimum yük seviyesindeki deplasman değerini, mm
δ_u : Kopma anındaki deplasman değeri, mm
δ_y : Akma anındaki deplasman değeri, mm
ε_{cu} : Basınç bölgesinin en dış lifindeki betonun birim kısalması
ε_s : Çekme donatısı birim uzaması
ε_s' : Basınç donatısı birim uzaması
ε_y : Donatının akma anındaki birim uzaması
Ø : Donatı çapı, mm
$Ø_{etr}$: Etriye donatı çapı, mm
$Ø_l$: Boyuna donatı çapı, mm
μ : Süneklik katsayısı
ρ' : Basınç donatısı oranı
ρ : Çekme donatısı oranı
ρ_b : Dengeli donatı oranı
ρ_{min} : Minimum donatı oranı
ρ_w : Çekme donatısı oranı
τ : Kayma gerilmeleri, MPa
σ_c : Asal basınç gerilmeleri, MPa
σ_t : Asal çekme gerilmeleri, MPa

Kısaltmalar

AASHTO LFRD	: Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
AE	: Akustik Emisyon Yöntemi
AFRP	: Aramid Fiber Takviyeli Polimer
BFRP	: Bazalt Fiber Takviyeli Polimer
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CFS	: Soğukta Şekillendirilmiş Çelik
CSA	: Kanada Standartlar Kuruluşu
DT	: Eğik Çekme Kırılması
EN	: Avrupa Standartları
ETS	: Kesit Boyunca Çubuk Gömme Yöntemi
FIB	: Uluslararası Beton Federasyonu
FRCM	: Fiber Takviyeli Çimento Matrisi

FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
GB 50010-2010	: Çin Ulusal Standartları 2010 Yapı Yönetmeliği
GFRC	: Cam Fiber Takviyeli Beton
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
MS	: Mekanik Dikiş (Mechanical Stitches)
MSS	: Mekanik Çelik Dikiş (Mechanical Steel Stitches)
MÇD	: Mekanik Çelik Dikiş
NSM	: Yüzeye Yakın Montaj
S	: Aderans Hatası
TBDY-2019	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019
TS 500-2000	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

1. GİRİŞ

Betonarme yapıları ayakta tutan taşıyıcı sistem elemanları, genellikle eğilme, kesme, eksenel kuvvetler veya bu kuvvetlerin ortak etkisi sonucu oluşan zorlamalara maruz kalmaktadır. Kesme kuvvetinin tüm taşıyıcı elemanlarda ciddi bir tehlike oluşturmasının yanı sıra, bu kuvvete ek olarak kiriş ve döşemelerde eğilme etkisi görülürken, kolon ve perde elemanlarda eğilme ile birlikte eksenel kuvvet etkisi de görülmektedir. Bu durumda, taşıyıcı sistem elemanları arasında kuvvet paylaşımı ve yük aktarımı mekanizması kurularak yapıya gelen yükler, döşemelerden kirişlere, kolonlara, temellere ve en son olarak da zemine aktarılır. Yapıya gelen yüklerin güvenli bir şekilde taşınması için bu süreçteki yapı elemanlarının doğru bir şekilde tasarlanması, boyutlandırılması ve sahada uygulanması son derece önemlidir (Pampanin ve ark., 2002).

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). Yapıdaki tüm taşıyıcı eleman kesitlerinin sünek davranış sergileyecek şekilde boyutlandırılması ve donatılandırılması halinde, yapının tamamında sistemsel olarak sünek bir davranışın sağlanıp gevrek kırılmanın önlenebileceği düşünülebilir. Ancak bu düşünce her zaman mümkün değildir. Basit eğilme altındaki bir kiriş elemanında, kiriş davranışı kesitteki donatıya bağlı iken bileşik eğilme (eğilme ve eksenel kuvvet) altındaki bir kolon elemanında, kolon davranışını eksenel yük seviyesi belirlemektedir. Eğilme ve eksenel yüklerin ortak etkisine maruz kalan bu kolon elemanlarında, gevrek kırılmaların önlenmesi için eksenel yük miktarında sınırlama yapılması gerekebilir. Böylece, bu tip betonarme elemanlarda istenilen süneklik tam anlamıyla sağlanmasa da, yapının genelinde sünek davranış sergilemesi hususunda oldukça olumlu etkisi olduğu söylenebilir (Ersoy ve ark., 2019).

Geçmiş yıllardan günümüze kadar gelen yönetmeliklere bakıldığında, yapının enerji tüketiminin gevrek bir davranış ile karşılanmasına karşı çıkıldığı ve sünek bir davranışa dayalı tasarımlar yapılması gerektiği belirtilmiştir (Aksoylu ve Arslan, 2019; Börekçi, 2019; Özmen ve Sayın, 2021). Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen kesme hasarları, ani, gevrek ve önceden fark edilmeyen şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu tip hasarlar, yapıların güvenli bir şekilde ayakta kalması için istenmeyen ve son derece tehlikeli bir kırılma türüdür. Gevrek davranış sergileyen yapılar, yıkım gerçekleşmeden önce önlem alma veya yapıyı boşaltma olanağı tanımaz. Bu sebeple,

modern deprem yönetmelikleri, bu ani ve gevrek kırılmaları önlemek amacıyla yapı taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılmasında tasarımcıları sünek tasarımlara yöneltmektedir (Naqash ve ark., 2024). Betonarme kirişler sünek davranışa katkısı bakımından oldukça önemli taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Bu nedenle, yapıların taşıyıcı elemanlarında hasar oluşması durumunda, öncelikle kirişlerde ve bu hasarın özellikle eğilme şeklinde olmasının tercih edildiği bilinmektedir (Hou ve Xia, 2021). Bu şekilde, yapılar deprem yükleri altında yeterli enerji sönümlemesi yaparak sünek bir davranış sergileyebilir (Naderpour ve Alavi, 2017).

Betonarme yapıların tasarımında kullanılan güncel yönetmeliklerin (TDY-2007 ve TBDY-2019) yürürlüğe girmesiyle birlikte depreme dayanıklı yapı tasarımında önemli adımlar atılmış olsa da, özellikle 1998 yılı öncesinde yapılan yapıların yeterli düzeyde rijitlik, süneklik ve dayanıma sahip olmadığı bilinmektedir (Arslan ve Korkmaz, 2007; Kaltakci ve ark., 2007; Öztürk ve ark., 2018). Türkiye'deki yapı stoğu incelendiğinde deprem yüklerinin yanı sıra sadece düşey yükler altında bile kapasite açısından yetersiz yapılar olduğu görülmüştür (Şenol ve ark., 2023). Bununla birlikte yapılarda tasarım ve uygulama hataları, yapının kullanım amacının değiştirilmesi, çeşitli çevre koşulları, taşıyıcı elemanlarda korozyon gibi durumlardan dolayı yapıların güçlendirilmesini gerektirebilir. Böyle bir durumda mevcut yapıyı yıkıp yeniden inşa etmek, uzun zaman almakta ve oldukça maliyetli olmaktadır. Servis yükleri altında yetersiz olduğu düşünülen bir yapının yıkılıp tekrar inşa edilmesi veya güçlendirilmesi konusunda net bir yönetmelik kararı olmamakla birlikte, güçlendirme kararı alınırken güçlendirme maliyetinin, yeniden inşa maliyetine oranının %40'ı aşmaması önerilmektedir (Yilmaz ve Karakaya, 2018). Yani, eğer yapının güçlendirme maliyeti, yeniden inşa maliyetinin %40'ından az ise güçlendirme, fazla ise yapının yıkılıp yeniden inşa edilmesi tavsiye edilmektedir. Güçlendirme kararı alınırken, yapının rijitlik, süneklik ve dayanım performansı, güçlendirme maliyeti, uygulanabilirlik ve mimari kaygılar gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Bu çerçevede, istenilen dayanım düzeyine ve güçlendirme hedeflerine ulaşmak için çeşitli onarım ve güçlendirme uygulamaları kullanılmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, kesme açısından yetersiz düşük beton dayanımına sahip mevcut betonarme kirişlerin kesme bölgelerini güçlendirmek için diğer güçlendirme yöntemlerine (çelik, lifli polimer ve betonarme) göre daha az maliyetli ve etkili bir

alternatif olarak değerlendirilen Mekanik Çelik Dikiş (MÇD, MSS (Mechanical Steel Stitches)) yöntemi incelenmiştir. Oldukça pratik ve uygulanabilir olması ile dikkat çeken bu yenilikçi yöntemde, optimum MÇD aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

MÇD ile ilgili yapılan kapsamlı çalışmalar (Alshlash, 2019; Aksoylu, 2021; Aksoylu ve ark., 2022, 2023; Uysal ve ark., 2023; Aslan ve ark., 2024), daha fazla maliyet ve zaman gerektiren geleneksel yöntemlere göre MÇD ile güçlendirme yönteminin alternatif, yenilikçi bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur. Elbette, diğer güçlendirme yöntemleri gibi, bu yöntemin de etkili çalışabildiği belli sınırları vardır. Bu çalışmanın temel amacı, literatürde ve uygulamada bulunan geleneksel kiriş güçlendirme alternatiflerine kıyasla daha pratik olduğu düşünülen MÇD uygulamasındaki sınırları belirlemek ve bu güçlendirmenin etkin olduğu optimum MÇD aralığını belirlemektir. Ayrıca, mevcut kirişlerin kesme performansını artırmak amacıyla MÇD uygulamalarına yönelik tasarım rehberini hazırlamak ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY-2019) yeni bir güçlendirme alternatifinin eklenmesi için gerekli bilimsel altyapıyı oluşturmak çalışmanın temel motivasyonları arasındadır. Bu kapsamda, düşey yükleme altında bir grup kiriş deneyi yapılarak MÇD yönteminin optimum dikiş aralığı ve bu yöntemin uygulanabilirlik sınırlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

1.2. Tezin Önemi

Betonarme yapı elemanlarının üzerlerindeki yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için, süneklik, dayanım ve rijitlik olmak üzere üç temel parametreye yeterli düzeyde sahip olması gerekmektedir (Cansız, 2022). Mevcut betonarme yapıların bir kısmı çeşitli nedenlerden dolayı bu parametrelere yeterli düzeyde sahip değildir. Bu nedenle, deprem yükleri ve hatta servis yükleri altında bile bazı yapılar hasar görebilmektedir. Betonarme bir binada hasarla ilk tanışan elemanlar genellikle kirişlerdir. Kirişlerde meydana gelen hasarlar genellikle kesme veya eğilme hasarı şeklinde (bazen her ikisi de) görülmektedir. Özellikle kesme hasarları ani ve gevrek bir kırılma olduğu için yapı davranışı üzerinde daha kritik rol oynamaktadır. Kesme hasarlarının oluşmasında birçok parametrenin etkili olduğu bilinmektedir. Ancak, genellikle beton basınç dayanımının düşük olması ve betonarme elemanın kesme gerilmesini karşılayacak yeterli etriye donatısını bulundurmaması, mevcut betonarme yapılarda en çok karşılaşılan eksikliklerdir (Kishi ve ark., 2002). Bu doğrultuda, taşıyıcı elemanların kesme ve eğilme kapasitesini arttırmak için çok sayıda araştırma yapılmış ve

çeşitli güçlendirme yöntemleri üzerinde çalışılmıştır (Askar ve ark., 2022). Betonarme mantolama, mekanik bağlantılar ve ankrajlar yöntemi ve çelik plakalar ile güçlendirme gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra, son dönemde yaygınlaşan FRP ile sarma yöntemi de uygulamada sıklıkla kullanılan güçlendirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Belirtildiği gibi kiriş elemanların güçlendirilmesine yönelik alternatifler oldukça fazladır. Ancak uygulamada, hasar tipine ve yerine göre hangi güçlendirme yönteminin seçileceği oldukça önemli ve karar verilmesi de bir o kadar zor bir durumdur. Uygulamadaki kimi mühendisler, güçlendirme yöntemini seçerken zorlanmaktadırlar. Etkili bir güçlendirme seçilirken yapının rijitliğini, sünekliğini ve taşıma gücü kapasitesini ne kadar arttırdığına dikkat edilmelidir. Aksoylu (2021) yaptığı çalışmada, Mekanik çelik dikiş (MÇD) uygulamasının kiriş kapasitesinde %16,8 dayanım ve %592 enerji tüketim artışı sağlayarak sünekliğe önemli katkılar sağladığını göstermiştir. Bu yöntemin dayanım ve süneklik açısından da oldukça etkili olduğu yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında da kullanılan MÇD yönteminin diğer güçlendirme yöntemlerinden daha ekonomik olması da dikkat çekicidir. Bununla birlikte, çalışmanın sonunda optimum MÇD aralığının belirlenmesi, MÇD yönteminin uygulamaya yönelik kullanılması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, yenilikçi bir güçlendirme uygulaması olan MÇD yöntemi, diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha pratik bir çözüm olarak sunulmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mevcut yapılarda zaman ilerledikçe çeşitli sebeplerden (çevresel faktörler, kullanıcı esaslı etkiler, yapı kullanım amacının değişmesi vb.) dolayı taşıyıcı sistemlerinde dayanım kaybı yaşanmaktadır. Bu soruna çözüm olarak, dayanım açısından yetersiz olduğu tespit edilen taşıyıcı sistemde çeşitli onarım ve güçlendirme uygulamaları yapılmaktadır. Fakat güçlendirme yöntemi seçilirken zaman ve maliyet açısından avantajlı olan en uygun metodun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde, güçlendirme yöntemlerin etkinliğini araştırmak amacıyla, konvansiyonel (Çelik plaka ve levha ile sargılama, Betonarme mantolama) ve yenilikçi (Lifli polimer ile güçlendirme, beton yüzeyinde oluklar açarak bu oluklara malzeme yerleştirilen güçlendirme (NSM (Yüzeye yakın montaj, Near Surface Mounted)) ve Mekanik bağlantılar) olmak üzere birçok güçlendirme uygulaması araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmada ise kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişler, literatür açısından çok yeni bir güçlendirme yöntemi olan Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) yöntemi ile güçlendirilerek kiriş kesme kapasitesine etkisi araştırılmış olup optimum MÇD aralığı belirlenmiştir. Bu bölümde ilk olarak, çalışmanın temel motivasyonunu oluşturan kirişlerin kesme davranışıyla ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Daha sonra, literatürde güçlendirme uygulamaları ile ilgili araştırmacılar tarafından incelenen çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında, literatürde kullanılan MSS (Mechanical Steel Stitches) ve MS (Mechanical Stitches) kısaltmaları yerine MÇD (Mekanik Çelik Dikiş) kısaltması kullanılmıştır.

2.1. Kirişlerde Kesme Kırılması ile İlgili Çalışmalar

Literatür araştırmasının ilk kısmını oluşturan bu bölümde, betonarme kirişlerde görülen kesme kırılması ile bu kırılma türünü etkileyen parametreler üzerine yapılan literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

Garip (2011), deneysel tez çalışmasında betonarme kirişlerde kullanılan çekme donatısının kesme davranışına olan etkisini incelemiştir. Bu kapsamda üretilen 6 tane kiriş numunesinde çekme bölgesinde 1Ø16, 1Ø22, 2Ø16, 1Ø26 ve 2Ø22 olmak üzere farklı donatılar kullanılmıştır. Kirişlerde sırasıyla donatı oranları %0.58, %1.10, %1.16, %1.54 ve %2.20'ye karşılık gelmektedir. Geometrik boyutları 150 mm × 230 mm × 1400 mm olan deney kirişleri kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 2.5 olacak şekilde

3 noktalı yükleme testine maruz bırakılmıştır. Enine donatı bulundurmayan tüm deney kirişlerinde, beton basınç dayanımı aynı olup 25 MPa'dır. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre çekme donatısının artmasıyla kirişlerin yük taşıma kapasitesinde artış gözlenirken, aynı yük değerlerine karşılık gelen deplasman miktarlarında azalma görülmüştür. Deney kirişleri (boyuna donatılar 1Ø16, 1Ø22, 2Ø16, 1Ø26 ve 2Ø22) sırasıyla 62 kN, 75 kN, 70 kN, 79 kN ve 100 kN yük değerlerine ulaştıklarında kesme kırılmasından göçmüştür. Sonuç olarak kirişlerde kullanılan çekme donatısının kesme davranışı üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür.

Vegera ve ark. (2015), yaptıkları deneysel çalışmada kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranına (a_v/d) bağlı olarak kiriş kesme kapasitesindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu amaçla, deney kirişleri için 100 mm × 200 × 2100 mm geometrik boyutları seçilmiş olup, çekme bölgesinde 2 adet Ø22 donatı, basınç bölgesinde 2 adet Ø12 donatı ve enine donatı olarak da Ø8/100 mm etriye kullanılmıştır. Deney kirişleri yükleme düzeneğinde a_v/d oranı 1, 1.5 ve 2 dikkate alınarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre a_v/d oranın artmasıyla kirişlerde meydana gelen maksimum deformasyonların azaldığı görülmüştür. Deneysel çalışmada, a_v/d oranı küçük olan kirişlerin, betonun erken ezilmesinden dolayı, a_v/d oranı büyük olan kirişlere göre daha gevrek bir göçme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda, betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin hesaplanmasında önerilen ampirik formül ile deney verileri karşılaştırıldığında, ampirik formülün deney sonuçlarına yakın kesme kapasitesi değerleri sunduğu belirlenmiştir.

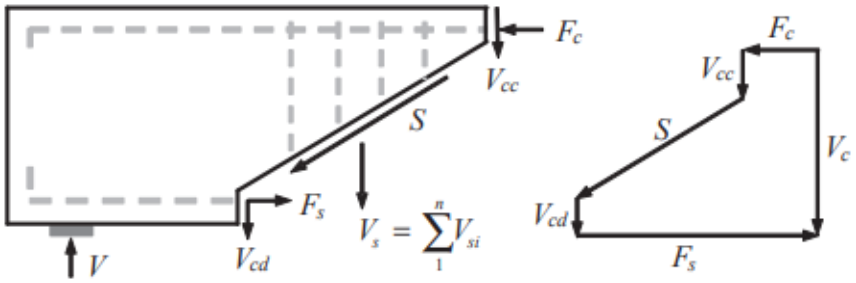
Ünal (2016), yaptığı deneysel çalışmada ankastre mesnet ve basit mesnet koşullarının kiriş kesme davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kiriş kesme dayanımını etkileyen faktörlerin incelendiği çalışmada, ankastre mesnetli ve basit mesnetli kiriş numunelerinde kesme açıklığı ile faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve etriye aralığı değişken parametreler olarak ele alınmıştır. Bu amaçla, 4 tanesi basit mesnetli ve 12 tanesi ankastre mesnetli olmak üzere toplamda 16 tane 1/1 geometrik ölçekli kiriş numuneleri, 4 noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen deney kirişlerinde a_v/d oranı 1, 2 ve 3 için deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı etriye aralıkları için ise Ø8/75 mm, Ø8/150 mm ve Ø8/300 mm etriye aralığı kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, yük-deplasman eğrileri, rijitlik, enerji tüketimi ve moment-eğrilik grafikleri elde edilmiş ve yük taşıma kapasitelerinin yaklaşık değeri için teorik hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, a_v/d oranı düşük olan numuneler, yüksek olan numunelere göre daha fazla yük taşırken, a_v/d oranı düşük olan

numuneler kesme kırılmasına daha eğilimli olduğu görülmüştür. Bu nedenle, a_v/d oranı azaldıkça numunelerde süneklikte azalmalar olmuştur. Buna ek olarak, a_v/d oranı azaldıkça kirişlerde rijitlik arışı gözlemlenmiştir. Kirişlerdeki başlangıç rijitliği açısından, ankastre mesnet koşullarına sahip olan kirişlerin, basit mesnet koşullarına sahip olan kirişlere göre çok daha fazla başlangıç rijitliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Etriye aralığı dikkate alındığında, etriye aralığının azalmasıyla tüketilen enerji miktarı artarken, başlangıç rijitliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmaya göre, kirişin sünek bir davranış sergileyebilmesi için Ø8/300 mm etriye aralığına sahip kirişlerde etriyenin yetersiz olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında yapılan teorik hesaplamalar elde edilen deneysel sonuçlara oldukça yakın değerler vermiştir.

Demir (2018), yaptığı tez çalışmasında yüksek kirişlerde oluşan eğik kesme çatlaklarını 3 aşama şeklinde incelemiştir. İlk aşamada, kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve beton basınç dayanımı parametrelerinin kiriş kesme dayanımına katkısını incelemek amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır. İkinci aşamada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemini (ABAQUS) kullanılarak deneylerde elde edilen sonuçların doğrulaması hedeflenmiştir. Son aşamada, elde edilen deney ve nümerik analiz sonuçları dikkate alınarak, birinci aşamada kullanılan boyut ve malzeme özellikleri aynı olan yeni yüksek kirişler üretilerek parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında üretilen 12 adet kiriş numunesinin boyutları ve malzeme özellikleri farklı olup, üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kirişlerde genel olarak kiriş genişliği (200 mm) sabit tutularak kiriş yüksekliği ve içerisindeki donatılar ile birlikte a_v/d oranı ve beton basınç dayanımı değiştirilmiştir. Belirtilen deneylerden elde edilen sonuçlar, ABAQUS programı kullanılarak doğrulandıktan sonra aynı özelliklere sahip 24 adet yüksek kiriş üzerinde parametrik olarak inceleme yapılarak çalışma sonuçlandırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, a_v/d oranı azaldıkça kirişlerde yük taşıma kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, düşey deplasmanlarda azalma olup daha gevrek bir davranışa sebep olduğu belirtilmiştir. Beton basınç dayanımı açısından incelendiğinde, klasik kirişlerde olduğu gibi yüksek kirişlerde de beton basınç dayanımının artmasıyla kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde artışlar gözlenmiştir. İkinci aşamada yapılan nümerik modelleme sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasında, yük-çatlak genişliği açısından küçük farklar olmasına rağmen, önemli ölçüde uyum sağladığı belirtilmiştir. Üçüncü aşamada ise, deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar esas alınarak, kirişlerde eğik çatlak davranışını etkileyen parametrelerin kesme donatısı oranı, beton basınç dayanımı, kesit alanı ve çekme donatısı

olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği parametrik bir formül önerilmiştir.

Hu ve Wu (2018), yaptıkları deneysel çalışmada, yönetmeliklerde (ACI, AASHTO LRFD ve CSA) kesme hesabı yapılırken dikkate alınan V_c (beton katkısı), V_s (kesme donatısı katkısı) ve V_{cr} (eğik çatlama dayanımı) parametrelerini incelemişlerdir. Şekil 2.1'de kesme kuvveti bileşenleri gösterilmiştir. Kiriş kesit boyutları 180 mm × 360 mm sabit tutularak kiriş uzunluğu 1410 mm, 1780 mm ve 2150 mm olacak şekilde 11 tane kiriş numunesi üretilmiştir. Kiriş uzunluklarının değişmesine bağlı olarak kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) sırasıyla 1.9, 2.5 ve 3.1 olarak dikkate alınmıştır. Deney kirişleri 3 grup halinde konsol yükleme (iki noktada mesnetli ve tek noktadan yük aktarımı yapılacak şekilde) altında test edilmiştir. Kirişler, 1.deney grubunda etriyesiz, 2.deney grubunda nervürlü etriye ve 3.deney grubunda ise nervürsüz düz donatılı etriye olacak şekilde üretilmiştir. 28 gün sonundaki silindir beton basınç dayanımı 30 MPa olan deney kirişlerinde, boyuna donatı oranları tüm kirişler için aynı seçilmiştir. Kirişlerdeki enine ve boyuna donatıların gerinimlerini ölçmek için strain gauge ölçüm araçları kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre, a_v/d oranı arttıkça V_c azalırken V_s'nin de arttığı görülmüştür. Fakat, V_{cr}'nin a_v/d oranına bağlı olarak bir değişim eğiliminin olmadığı gözlenmiştir. Kirişlerde a_v/d oranının büyük olduğu durumlarda, V_c'nin değişiminden dolayı V_c, V_{cr}'den daha küçük olurken a_v/d oranının küçük olduğu durumlarda V_{cr}'den çok daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum, kirişin ilk çatlama dayanımının, genel anlamda betonun kesme dayanımına katkı sağlamadığı görüşünü desteklemiştir. Kesme donatısı bulunduran ve bulundurmayan kirişlerde, özellikle de a_v/d oranının 2,5 ve üstü olan kirişlerde elde edilen V_c değerleri arasında oldukça yüksek farklar gözlenmiştir. Buna ek olarak, a_v/d oranının 2,5 ve üstü için nervürlü etriyelere sahip kirişlerde, etriyeler akma noktasına ulaşmazken, nervürsüz düz etriyelere sahip kirişlerde etriyelerin akma noktasına ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 2.1. Kirişte kesme kuvveti bileşenleri (Hu ve Wu, 2018)

Uysal (2019), yaptığı tez çalışmasında, kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) ve beton basınç dayanımı parametrelerinin kiriş kesme davranışına olan etkisini araştırmıştır. Bunun için farklı a_v/d oranları (2.0, 2.51, 3.13 ve 4.0) ve beton basınç dayanımları (C16 ve C50 beton sınıfı) dikkate alınarak 15 tane betonarme kiriş numunesi dört noktalı eğilme düzeneğinde test edilmiştir. Kiriş numuneleri 200 mm × 300 mm × 3000 mm geometrik kesit boyutlarına sahip olup kiriş çekme bölgesinde 3Ø12 donatı kullanılmıştır. Tüm deney kirişlerinde basınç donatısı ve enine donatı kullanılmamıştır. Boyuna donatıların alt kısımlarında 25 mm plastik paspayı kullanılmıştır. Kiriş kesitleri değiştirilmeden yükleme noktası değiştirilerek farklı a_v/d oranları elde edilmiştir. Deneylerde elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri TS500-2000, Eurocode 2 ve ACI-318-19' da yer alan kesme donatısı bulundurmayan kirişlerin kesme dayanımları için kullanılan bağıntılar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, a_v/d oranlarının değişiminin kiriş kesme kapasitesini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Genel olarak tüm deney kirişlerinde a_v/d oranının azalmasıyla kırılma yüklerinin arttığı görülmüştür. Sadece 4. gruptaki deneylerde yer alan av/d oranı 2.51 olan kirişte kırılma yükü 128.71 kN iken, av/d oranı 2 olan kirişte kırılma yükü 120.21 kN olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda beton basınç dayanımının kesme dayanımına olan katkısının karmaşık olmasından dolayı daha fazla deneysel çalışma ile desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Belirtilen standartlara göre hesaplanan kesme dayanımı / deney sonucu elde edilen kesme dayanımı oranları TS500-2000'de 1.133, Eurocode 2'de 0.761 ve ACI-318-19'da ise 1.150 olarak elde edilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre, TS500-2000 standardının deney sonuçlarına en yakın ve Eurocode 2'nin ise en uzak sonucu verdiği belirtilmiştir.

Vegera ve ark. (2019), çalışmasında 100 mm × 200 mm × 2100 mm boyutlarına sahip 12 adet kiriş üzerinde deneyler yaparak kesme dayanımını karakterize eden parametreleri araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında, kirişler içerisinde enine donatı olup olmaması, farklı kesme açıklığı ve kiriş dış yüzeyine yapılan FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) kompozit uygulamasının olup olmaması durumları test edilmiştir. Kirişlerde enine donatılar Ø6/100 mm aralıklar ile yerleştirilmiştir. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 1, 1.5 ve 2 için yükleme düzenekleri hazırlanmıştır. FRCM kompozit kumaş malzemeleri, 70 mm şeritler halinde 100 mm aralıklar ile kiriş dış yüzeyine uygulanmıştır. Deney sonunda elde edilen verilere göre, kirişin hizmet verme kapasitesini (serviceability capacity) en çok etkileyen parametre kesme açıklığı

olmuştur. Kesme açıklığı azaldıkça maksimum hizmet verme kapasitesinin arttığı, ancak kesme kapasitesinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca, kullanılan FRCM uygulamasının betonarme kirişler için kesme üzerindeki çatlak direncini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

Üstün (2020) yaptığı tez çalışmasında, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini arttırmak için yeni yaklaşımlar elde etmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, kirişlerde kullanılan etriyelerin (enine donatıların) uygulanma açısının kiriş kesme kapasitesine olan katkısını incelemişlerdir. Bu kapsamda, 30, 45, 60, 90 ve 135 derecelik etriyelere sahip deney kirişleri üretilerek, kullanılan etriyelerin kesme kapasitesine olan katkısını, etriyesiz kiriş numunesi ile karşılaştırarak gözlemlemişlerdir. Kesme davranışının incelendiği 6 tane deney kirişinde, eğilme donatısı oldukça yüksek tutularak etriyelerdeki açı değişiminin kesme kapasitesine olan katkısının net bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır. Kirişlerde diğer tüm özellikler sabit tutularak hazırlanan deney kirişleri, dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarını desteklemek amacıyla, ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak deney kirişleri modellenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre en yüksek kesme kapasitesi performansı göstersen 45º etriyeli kiriş 90º etriyeli (klasik etriyeli kiriş) kirişe göre %11.72 daha fazla kesme dayanımı sağlamıştır. 30º ve 60º etriyeli kiriş numunelerindeki dayanım artışı ise sırasıyla %7.94 ve %4.94 olmuştur. 135º etriyeli kirişte ise 90º etriyeli kirişe göre %51.61 daha az kesme dayanımı gözlenmiştir. Bu anormal durumun, uygulaması yapılan 135º etriyelerin açılı enine donatı olarak değil, yatay donatı olarak çalışmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Deney sonuçları ile ABAQUS analiz sonuçları arasında yapılan karşılaştırmaya göre, 30º, 60º ve 90º etriyeli kirişlerde yük taşıma kapasitesi elde edilen deney verilerine göre sırasıyla %10.28, %8.46, %6.08 daha az bulunmuştur. 45º etriyeli kirişlerde yapılan analiz sonuçları ile %99.02 yakınlık elde edilirken 135º etriyeli analiz modelinde %109.95 daha fazla yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak, analiz programında 135º etriyelerin yük aktarımını sağlayarak, deneyde görülenin aksine yük taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir.

Zhang ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada kesme kapasitesi yüksek olan derin kirişlerde kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a_v/d), boyuna donatı oranı ve enine donatı oranı parametrelerinin kesme davranışına olan etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, 200 mm × 600 mm kesit boyutlarına ve 1600 mm uzunluğa sahip 8 tane kiriş numunesi üretilerek 4 noktalı eğilme deneyine maruz bırakılmıştır. Kirişler için etkili açıklık (İki mesnet arası uzaklık)/yükseklik oranı (l_0/h) 2.0 olarak dikkate alınmıştır. Çalışma

kapsamında değişken olarak seçilen av/d oranları için 0.3, 0.6 ve 0.9, boyuna donatı oranları için %0.67, %1.05 ve %1.27, enine donatı oranları için ise %0.00, %0.25, %0.33 ve %0.50 oranları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada kiriş içerisindeki boyuna donatıların gerilmesi, betonun gerilmesi, orta açıklıkta oluşan deformasyonlar, kırılma sürecinin sonuna kadar kirişte görülen hasar tipleri, göçme mekanizması ve yük-deplasman eğrileri incelenmiştir. Yapılan incelemelere göre, deneylerde dikkate alınan kirişlerin a_v/d oranları (0.3, 0.6 ve 0.9) küçük olmasından dolayı kirişlerin göçme modu kesme-basınç kırılması (diagonal compression failure) şeklinde olmuştur. Deney kirişlerinde a_v/d oranının azalmasıyla ve boyuna donatı oranının artmasıyla kiriş kesme kapasitesinin etkili bir şekilde arttığı görülürken enine donatı oranının kesme kapasitesi üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir. Araştırmacılar, ayrıca çalışmada elde ettikleri test sonuçlarını GB 50010-2010, ACI 318-14, EN 1992-1-1:2004 ve CSA A23.3-04 yönetmeliklerinde yer alan kesme kapasitesi hesapları ile karşılaştırmışlardır. Yapılan bu karşılaştırmaya göre deneysel olarak elde edilen sonuçlar GB 50010-2010 ve ACI 318-14 yönetmeliklerine çok iyi uyum sağlarken EN 1992-1-1:2004 ve CSA A23.3-04 yönetmeliklerinde çok aşırı güvende kaldığı tespit edilmiştir.

Cansız (2021), yaptığı analitik çalışmada farklı kesme açıklığı ve farklı sarılma bölgesi uzunluğuna sahip 9 adet kirişi modelleyerek yük-deplasman eğrilerini incelemiştir. Bu kapsamda, 3 farklı sarılma bölgesi uzunluğu ve kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 4-8 aralığı için Seismo-Struct 2020 bilgisayar destekli analiz programı kullanılarak sismik analiz yapılmış ve kesme açıklığı ile sarılma bölgesi uzunluğunun kiriş davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, TBDY-2019'da kirişler için 2h olarak tanımlanan sarılma bölgesi uzunluğunun a_v/d oranı küçük olan kirişlerde uygun sonuçlar verirken, yapılan kısıtlı sayıdaki modellemelere göre a_v/d oranı 5 ve üstü olan kirişler için 2h değerinin düşük olup 3h mertebesine yükseltilmesi önerilmektedir. Kiriş açıklığının yüksek olduğu kirişlerde, 2h değerinin güvensiz kalmasından dolayı kiriş sarılma bölgesi uzunluğunun belirlenmesinde, kiriş yüksekliği dışında başka parametrelerinde dikkate alınması gerektiği savunulmuştur.

Jaber ve ark. (2021), yüksek basınç dayanımına sahip kirişlerde boyut değişiminin kiriş kesme davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla kiriş uzunluğu 1600 mm sabit tutularak kesit boyutları 75 mm × 150 mm, 100 mm × 200 mm, 125 mm × 250 mm ve 150 mm × 300 mm olmak üzere 16 tane kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerde kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) kesit boyutlarının birbirinden farklı seçilmesinden dolayı 2.07 - 4.96 aralığında değişmektedir. Deney kirişleri, BA, BB, BC ve BD olmak

üzere dört farklı gruba ayrılmış ve her birinde 4 kiriş deneyi olacak şekilde planlanmıştır. Farklı boyuna donatılara sahip olan deney kirişleri (Boyuna donatı oranı 0.00503 ile 0.01408 aralığında değişmektedir), etriyesiz olarak tasarlanmıştır. Beton basınç dayanımı olarak 45 MPa ve 65 MPa seçilen kirişler, 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney sonunda elde edilen sonuçlara göre, 1 tane kiriş numunesi dışında tüm kirişlerde kesme kırılması gözlenmiştir. Kirişlerde boyut değişiminin kesme davranışına etkisi, beton basınç dayanımı ve boyuna donatı oranına kıyasla daha fazla olmuştur. Kiriş yüksekliğinin 150 mm'den 250 mm'ye artmasıyla çatlama dayanımı/nihai kesme dayanımı oranında artış gözlenmemişken, kiriş yüksekliğinin 150 mm'den 300 mm'ye yükselmesiyle çatlama dayanımı/nihai kesme dayanımı oranında artış gözlenmiştir. Kiriş genişliklerinin artmasıyla kirişlerin ilk rijitliklerinde artış olduğu gözlenmiştir. Beton basınç dayanımının 45 MPa'dan 65 Mpa'a çıkarılmasıyla, boyuna donatı/dengeli donatı oranı 0.18 olan kirişlerin kesme kapasitesindeki yüzdelik artışlar sırasıyla %29, %27, %33 ve %6 olurken, boyuna donatı/dengeli donatı oranı 0.28 olan kirişlerin kesme kapasitesindeki yüzdelik artışlar sırasıyla %2, %28, %53 ve %42 olmuştur.

Esen ve ark. (2022)'nın yaptığı çalışmada kirişlerde beton basınç dayanımı, eğilme donatısı ve etriye aralığı parametrelerinin kesme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, 150 mm × 300 mm × 2200 mm geometrik boyutlara sahip olan 16 adet kiriş numunesi üretilerek 3 noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Kirişlerde beton sınıfı olarak 5, 7, 9 ve 20 MPa, eğilme donatısı (boyuna donatı) olarak 2Ø12 ve 3Ø12, etriye aralığı ise 100 mm ve 300 mm olacak şekilde değişkenler üzerinde çalışılmıştır. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, 5 MPa beton basınç dayanımına sahip olan kirişlerde yapılan etriye sıklaştırmasının kiriş davranışına çok az etkisi olurken 7 ve 9 MPa beton basınç dayanımına sahip olan kirişlerde yapılan etriye sıklaştırmasının kiriş davranışını önemli ölçüde belirlediği görülmüştür. Ayrıca, beton basınç dayanımının artmasıyla kirişlerin yük taşıma kapasitesi, sünekliği, enerji tüketme potansiyeli ve eğilme rijitliğinin arttığı gözlenmiştir. Beton basınç dayanımının kiriş kesme kapasitesine olan etkisi diğer koşulların (etriye aralığı ve boyuna donatı miktarı) en elverişsiz olduğu durumlarda çok daha belirgin olmuştur. Etriye aralığının azalması, kirişin yük taşıma kapasitesi ve rijitliğine kıyasla süneklik ve enerji tüketim miktarını daha çok arttırmıştır. Araştırmacılar, betonarme kirişlerin kesit ve kapasite hesabı yapılırken dikkate alınan varsayımların, düşük beton basınç dayanımına sahip olan kirişlerde etkili olmayabileceğini belirterek, elde edilen sonuçların deney verileri ile desteklenmesinin uygun olacağını savunmuşlardır.

Hwang ve ark. (2022) yaptıkları analitik çalışmada, kirişlerin maksimum kesme dayanımına ilişkin ACI 318-19 yönetmeliğine ait sınır durumunu inceleyerek alternatif bir hesap modeli önermişlerdir. Bu hesap modelini oluşturmak için literatürde yapılmış olan 306 adet kiriş deneyi verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamındaki deney verileri seçilirken kirişlerin ön gerilmesiz, dikdörtgen kesitli ve normal ağırlıktaki betona sahip olması, kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı 2'den büyük olması ve kirişlerde 3 tip kesme hasarından bir tanesinin gözlemlenmiş olmasına dikkat edilmiştir. Bu hasar tipleri kesme-çekme kırılması (shear tension failure), kesme-basınç kırılması (shear compression failure) ve dengeli kesme kırılması (shear balanced failure) şeklindedir. Literatürdeki deney verilerinin analiz edilmesi sonucunda önerilen formüle göre, kirişlerin maksimum kesme dayanımının belirlenmesinde beton dayanımı ve boyuna çekme donatısı gibi iki etkili parametrenin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek dayanımlı betona sahip kirişlerde ACI 318-19 yönetmeliğindeki sınırlamanın uygun olduğu, ancak yüksek oranda çekme donatısı bulunan kirişler için çok fazla güvenli tarafta kaldığı ifade edilmiştir.

Turan (2022) yaptığı tez çalışmasında, betonarme kiriş davranışını etkileyen parametreler üzerinde iki aşamadan oluşan deneysel çalışmalar yaparak elde ettiği sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde analitik olarak irdelemiştir. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında, TBDY-2019'da (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) belirtilen minimum ve maksimum donatı oranı sınırlarına uygun şekilde ve bu sınırların dışında olmak üzere, toplamda 6 adet kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktalı eğilme düzeneğinde test edilmiştir. İkinci aşamada ise 3 farklı b_w/h (genişlik/yükseklik) oranına sahip 6 adet deney kirişi test edilmiş ve kirişlerin göçme durumları incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan kiriş deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, maksimum donatı oranı, dengeli donatı oranı ve denge üstü donatı oranına sahip kirişlerde kesme göçmesi görülürken, minimum donatı oranı ve bu orandan daha az donatı oranına sahip kirişlerde ise eğilme göçmesi gözlemlenmiştir. Kirişlerde kullanılan donatı miktarının artmasıyla kirişleri yük taşıma kapasitelerinde artış görülmüştür. Ayrıca, farklı geometrik boyutlara sahip olan kirişler, yükleme altında çatlaklar oluşana kadar lineer yük deplasman eğrisine sahipken, çatlakların ilerlemesiyle kiriş rijitliklerinde azalmalar gözlemlenmiştir.

Monney ve ark. (2023), kirişlerde kesme davranışını detaylı olarak inceleyebilmek için 2 bölümden oluşan 10 tane kiriş deneyi yapmışlardır. Bu çalışmanın 1. Bölümünde, 2 farklı tipte etriye kanca bükümü yapılarak üretilen 250 mm × 600 mm × 2575 mm geometrik boyutlara sahip olan 4 adet kiriş numunesi 3 noktalı yükleme

düzeneğinde test edilmiştir. Bu bölümdeki kirişlerde iki farklı sınıfta yer alan donatılar (EN 1992-1-1:2004 standardına göre B500A ve B500C olarak sınıflandırılmaktadır) kullanılmıştır. Kiriş çekme bölgesinde 3Ø28 ve basınç bölgesinde ise 2Ø16 donatılar kullanılmıştır. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 3.27 alınarak deney kirişleri test edilmiştir. Çalışmanın 2. bölümünde ise deney kirişlerinin uzunluğu (7800 mm) ve yüksekliği (700 mm) sabit tutularak kiriş gövde genişliği (800, 600, ve 500 mm) değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Farklı donatı oranlarına sahip olan 2. bölüm kirişleri (a_v/d) 4.0 alınarak 3 noktalı yükleme testine maruz bırakılmıştır. Deneylerde, dijital görüntü korelasyonu ve fiber optik ölçümler gibi rafine ölçüm teknikleri kullanılarak, beton ve donatıdaki gerinimler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarında kirişlerin düşük enine donatı bulundurması durumunda çatlakların engellenemeyeceğini ve oluşan kritik kesme kuvvetinin aniden ilerleyerek enine donatıların kopmasına sebep olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, kullanılan enine donatının çekme dayanımı düşük miktarda enine donatı bulunduran kirişlerin kesme dayanımını yöneten bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde araştırmacılar tarafından yapılmış olan, farklı parametrelerin etkisinin analiz edildiği, 236 numuneden oluşan kapsamlı bir veri tabanının analizi yapılarak doğrulanmıştır.

2.2. Güçlendirme Uygulamaları ile İlgili Çalışmalar

Literatür araştırmasının bu kısmında sırasıyla,

- Lifli polimerler ile güçlendirme,
- Çelik plaka ve levhalar ile sargılama,
- Betonarme mantolama
- NSM (Near Surface Mounted) yöntemi
- Mekanik bağlantılar ve
- Mekanik çelik dikiş yöntemi (MÇD) olmak üzere güçlendirme uygulamaları ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

2.1.1. Lifli polimerler (FRP) ile güçlendirme

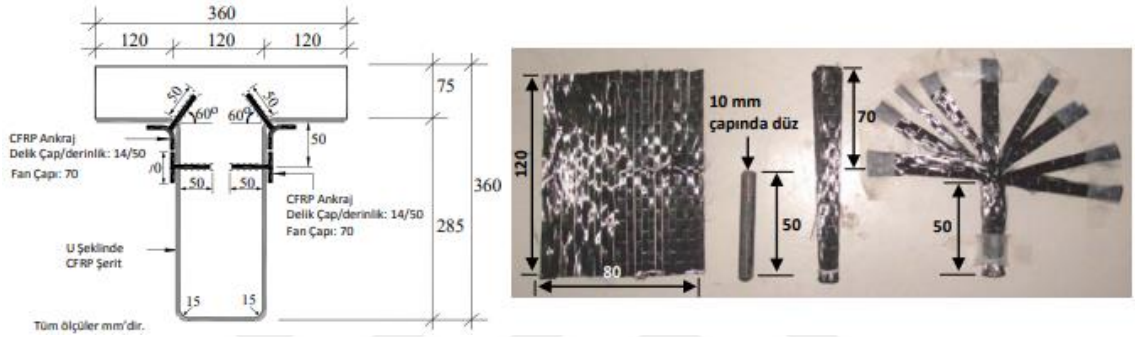
Jayaprakash ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada kesme kapasitesi yetersiz betonarme dikdörtgen kesitli kirişlerin Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) ile

güçlendirilerek kesme kapasitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, herhangi bir kesme donatısı içermeyen 16 adet kiriş numunesi üretilerek test edilmiştir. Bu kirişlerden 4 tanesi kontrol kirişi seçilerek hasar modları incelenmiştir. Geriye kalan 6 tanesine ön hasar verildikten sonra CFRP ile güçlendirilmiş ve diğer 6 tanesine ise ön hasar olmaksızın CFRP ile güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmada boyuna çekme donatısı takviyesi oranı, a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik), CFRP şerit aralığı, CFRP miktarı ve CFRP yönü değişken parametre olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre CFRP uygulamasının kesme kapasitesine önemli ölçüde katkı sağladığı belirtilmiştir. Şekil 2.2'de güçlendirme yapılan deney kirişlerinin deney sonu göçme mekanizmaları gösterilmiştir. CFRP ile güçlendirilen kirişlerde, kontrol kiriş numunelerine göre %11 - %139 aralığında değişen kesme kapasitesi artışları görülmüştür. Bu sayede, CFRP'lerin şerit şeklinde kullanımının kiriş kesme kapasitesine olan katkısı belirgin bir şekilde gözlenmiştir.

Şekil 2.2. CFRP şeritlerle güçlendirilen deney kirişlerinin deney sonu göçme mekanizmaları (Jayaprakash ve ark., 2008)

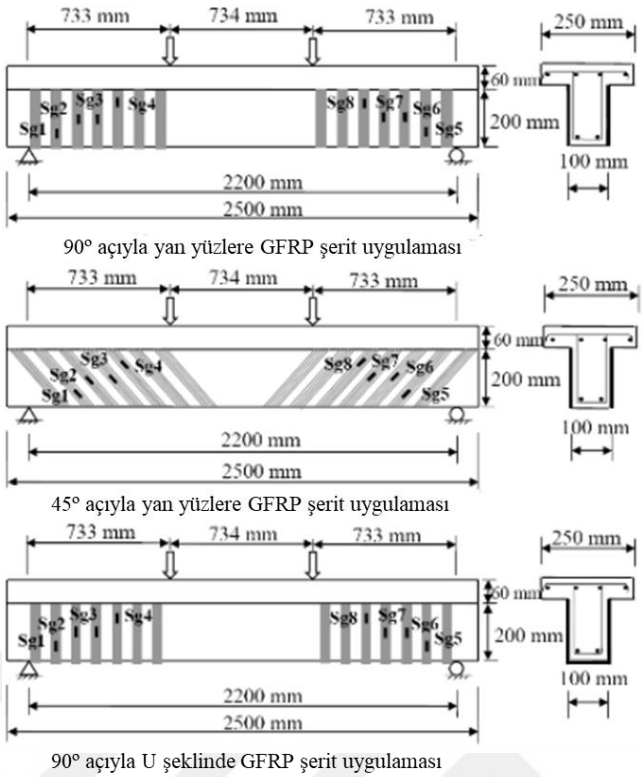
Anıl ve ark. (2011) çalışmalarında, kesme açısından yetersiz olarak tasarlanan kirişleri CFRP şeritlerle güçlendirmiş ve yapılan güçlendirmenin kesme kapasitesine etkisi ve süneklik düzeyinde oluşturduğu artışları gözlemlemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan güçlendirme sayesinde, kesme dayanımı yetersiz kirişlerin kesme hasarından göçmesini engelleyerek davranışın eğilmeye gitmesini amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, biri referans olmak üzere toplamda 7 adet ½ ölçekli T şeklindeki kirişler deneylere tabi tutulmuştur. Numuneler ankrajlı ve ankrajsız U biçiminde CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Şekil 2.3'te ankraj detayları sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada 125, 150 ve 200 mm CFRP şerit aralığı seçilerek güçlendirme uygulamasında CFRP şerit aralığının etkisi de araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, ankrajsız olarak güçlendirilmiş kirişlerde kesme kapasitesinin arttığı, ancak bu kapasitenin kirişlerin

sünek davranış gösterecek düzeyine ulaşmak için yeterli olmadığı vurgulanmıştır. Bunun sebebi, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması (debonding) ve bu ayrılan bölgelerde ilerleyen çatlakların kesme kırılmasına yol açarak, gevrek bir kırılmaya sebep olmasıdır. Ankrajlı numunelerde yapılan güçlendirme, kesme kapasitesinde önemli bir artış sağlamış ve kirişin davranışını kesmeden eğilme davranışına çevirmiştir. Yapılan ankrajlı ve ankrajsız CFRP uygulamaları için deplasman değerleri karşılaştırıldığında, ankrajlı uygulamadaki deplasman değerlerinin ankrajsız uygulamaya göre %44 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.3. CFRP şeritlerin ankraj detayları (Anıl ve ark., 2011)

Panda ve ark. (2013), kesme yönünden yetersiz T kirişlerin farklı konfigürasyonlarda ve yönlerde Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) ile güçlendirerek kesme kapasitesinde meydana gelen artışlar üzerine odaklanmışlardır. Ayrıca, kirişlerde farklı etriye aralıkları da ayrı parametre olarak dikkate almışlardır. Bu çalışma kapsamında, 2500 mm uzunluğundaki T şeklindeki 12 kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden 3 tanesi referans olarak belirlenirken, toplam 9 kiriş için güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Güçlendirme yapılan kirişlerde, etriyesiz, 200 mm ve 300 mm etriye aralıklarına sahip numuneler üretilmiş ve GFRP uygulama açıları 90° ve 45° olmak üzere, U ve sadece yandan uygulama biçimleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan numunelerin detayları ve güçlendirme konfigürasyonları Şekil 2.4'te sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda, 45° açıyla yapılan güçlendirme uygulamasının, 90° açıyla yapılan güçlendirme uygulamasına kıyasla daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kirişlerdeki etriye sıklığı bakımından kıyaslandığında, etriye sıklığının artmasıyla GFRP güçlendirmelerinin etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.



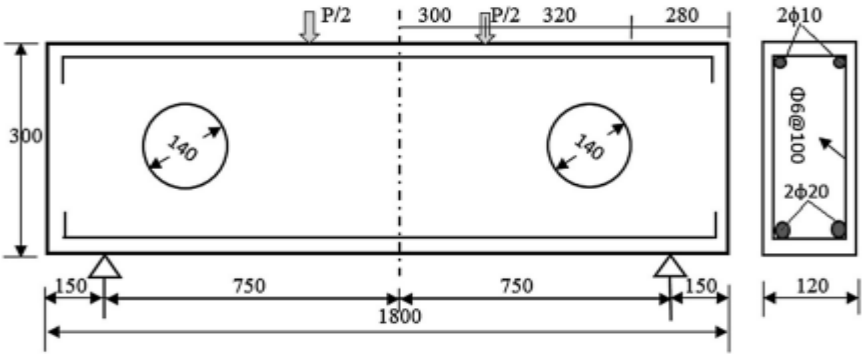
Şekil 2.4. GFRP şerit konfigürasyonları ve numune detayları (Panda ve ark., 2013)

Mofidi ve Chaallal (2014) yaptıkları çalışmada, kesme yönünden yetersiz olan 4520 mm uzunluğundaki T şeklindeki kirişler üzerinde CFRP'nin şerit ve tam sargı konfigürasyonlarını uygulamışlardır. Bu çalışma kapsamında birincil olarak CFRP uygulamasının kesme kapasitesi üzerinde etkili olan parametrelerin deneysel ve analitik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. İkincil olarak ise kesme yönünden güçlendirilmiş olan kesme direncini hesaplayabilmek adına tutarlı bir tasarım denklemi oluşturulması hedeflenmiştir. Bu çalışmanın deneysel kısmı için 12 adet T kiriş üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Değişken parametreler olarak etriyenin olup olmaması, tam sargı veya şerit CFRP uygulaması ve CFRP eksenel rijitliği dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın sonunda belirtilen değişkenler dışındaki diğer parametreleri de dikkate alan yeni bir tasarım denklemi önerilmiştir. Önerilen denklemin doğruluğu yapılan deneylerden elde edilen veriler ile desteklenmiştir.

(Ma ve Li, 2017), literatürdeki FRP güçlendirme uygulamalarının deprem sonrasında kontrol edilememesi sorununu ele alarak, bu çalışmada Bazalt Fiber Takviyeli Polimer (BFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kolonlarda yanal çevrimsel yükleme altında oluşan çatlak sürecini Akustik Emisyon (AE) teknikleriyle incelemişlerdir. Bu deneysel çalışma için 28 günlük beton basınç dayanımı 47.5 MPa olan 300 mm × 300

mm kesit boyutlarına sahip 2 adet kolon üretilmiştir. Bu kolonlardan bir tanesi BFRP ile güçlendirilirken, diğeri herhangi bir güçlendirme yapılmaksızın referans kiriş olarak kullanılmıştır. Yapılan çevrimsel yük analizi sonucunda, kullanılan AE yönteminin hem BFRP ile güçlendirilmiş hem de güçlendirilmemiş kolonlar için çatlak sürecinin özelliklerini belirlemede oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. AE yöntemindeki vuruşların dağılımına bağlı olarak sağlam, hafif, orta ve ciddi olmak üzere dört farklı hasar seviyesi ifade edilmiştir. Ayrıca, yapılan çevrimsel yükleme altında BFRP ile güçlendirilmiş kolonun AE enerjisi ile histerestik enerjisi arasında yakınlık olduğu görülmüştür. Böylece, AE yöntemi FRP ile güçlendirilmiş kolonların hasar seviyelerini belirlemek için etkili olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, mühendislik uygulamalarında AE yönteminin FRP ile güçlendirilmiş kolonların hasar değerlendirilmesinde kullanılabilir olduğunu doğrulamışlardır.

Osman ve ark. (2017) yaptıkları deneysel çalışmada, kiriş açıklıklarında delikler açılmış olan numunelerin hasar modlarını ve kiriş davranışını etkili bir şekilde iyileştiren Aramid Fiber Takviyeli Polimer (AFRP) ile güçlendirilmesini incelemişlerdir. Servis yüklerinin sebep olduğu hasarları araştırmak ve uygulamadaki yapı davranışını (kirişlerde deliklerin açılması) temsil etmesi amacıyla, kirişlerde her iki uç bölgesinde 140 mm çapında delikler açılmıştır (Şekil 2.5). Bu deneysel çalışma için iki tane güçlendirilmemiş referans kirişi, farklı seviyelerde ön hasar verilmiş olan 4 tane AFRP ile güçlendirilmiş numune ve bir tane de ön hasar verilmemiş olan AFRP ile güçlendirilmiş numune olmak üzere toplamda 7 tane numune üzerinde incelemeler yapılmıştır. İlk aşama olarak %50 ve %70 oranına kadar kirişlere ön hasar verilmiş ve bu kirişler farklı AFRP konfigürasyonları ile güçlendirilmiştir. Ardından, 120 mm × 300 mm × 1800 mm boyutlarına sahip kiriş numuneleri dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılan AFRP güçlendirme yönteminin kiriş üzerinde var olan hasar derecesi ve göçme modu üzerinde önemli iyileştirme sağladığı görülmüştür. Deney kirişlerinde yapılan güçlendirme uygulaması sayesinde referans kirişe göre %21.8'den %66.4'e kadar yük taşıma kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Kırılma yükü altında kirişte oluşan çatlak genişliği, referans kirişe kıyasla %25.6-82.7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar ACI 440.2R-08 yönetmeliğini kullanarak elde ettikleri analitik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlara göre deneysel verilerin tutarlı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.5. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş numunesi (Osman ve ark., 2017)

Kaygusuz (2018) yaptığı deneysel çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bıraktığı betonarme kirişleri GFRP ve CFRP malzemesiyle güçlendirerek meydana gelen davranışları araştırmıştır. Bu çalışma kapsamında, 8 tane betonarme kiriş numunesi üretilmiş ve sonrasında 3 saatlik süre zarfında 600 °C sıcaklıkta fırında tutulmuştur. Bu numunelerden 3 tanesi GFRP ile, 3 tanesi CFRP ile güçlendirilirken, geriye kalan 2 tane kiriş numunesi kontrol kirişi olarak kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan kirişler, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak her bir numune için yük-deplasman grafiği, enerji tüketimi, rijitliği ve sünekliği incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, güçlendirme uygulanmayan ve yüksek sıcaklığa maruz kalan kirişler, kontrol kiriş numunesi ile karşılaştırıldığında; maksimum yük taşıma miktarında %16, maksimum deplasman değerinde %46, kirişin enerji tüketiminde %61 ve kirişin kesme kapasitesinde %50 kadar daha az performans göstermiştir. Ayrıca, fiber takviyeli polimer (CFRP-GFRP) ile güçlendirilmiş kirişlerin, yük taşıma kapasitesi referans kiriş numunesine kıyasla %4-30 kadar arttığı gözlemlenmiştir.

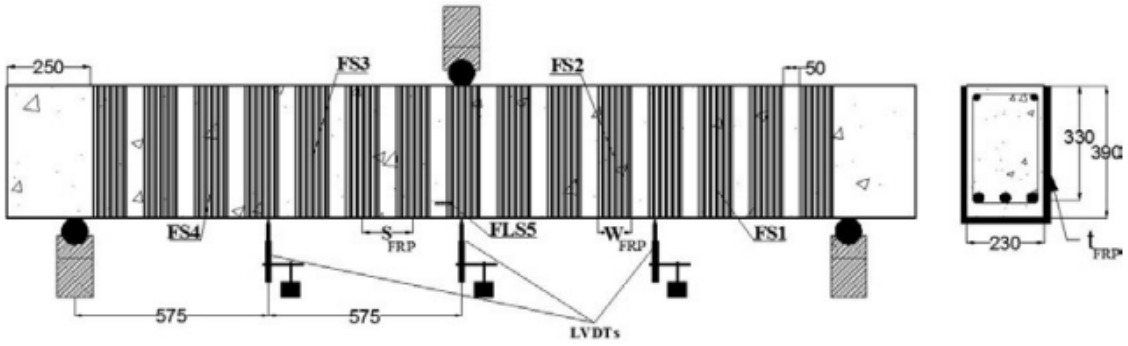
Aksoylu ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, CFRP ile tam sargı ve yarım sargı uygulamaları yapılarak, 3200 mm uzunluğundaki inceltilmiş uçlu aşık kirişlerinde yapılan güçlendirmenin kesme dayanımına katkısı araştırılmıştır. 1 adet referans ve 2 adet güçlendirilmiş aşık kirişleri dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 2.6'da kesme bölgesi güçlendirilen kiriş numuneleri ve deney düzeneği sunulmuştur. Çalışmanın sonunda referans numuneye göre tam sargılı olarak güçlendirilen kirişte %60, yarım sargılı olarak güçlendirilen kirişte ise %49 kadar kesme kapasitesinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tam sargılı güçlendirmede gereğinden fazla CFRP kullanımından dolayı istenilen süneklik düzeyi sağlanamamış, ideal sünek davranışa yarım sargılı güçlendirme uygulaması ile ulaşılmıştır.

Şekil 2.6. CFRP ile kesme bölgesi güçlendirilen aşık kirişleri ve deney düzeneği (Aksoylu ve ark., 2019)

Akyürek (2019) yaptığı çalışmada, GFRP ile sargılanmış donatılar için T_g (Polimer matrisli malzemelerin geçiş sıcaklığı) sıcaklığına bağlı olarak numunenin yangın etkisine karşı davranışı, beton, paspayı ve beton sınıflarını parametre seçerek gözlemler yapmıştır. GFRP güçlendirme yöntemi, farklı paspayı ve beton sınıflarına sahip numuneler üzerinde uygulanmış ve bu numunelerin yangına karşı dayanıklılığını belirlemek için fırında yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin sıcaklığını ölçmek için *Thermocouple* diye adlandırılan sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Hedeflenen T_g sıcaklığına ulaşıldığında, numune fırından çıkarılarak, donatı sıcaklığı, beton sıcaklığı ve ortam sıcaklığı aşamalı bir şekilde gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen veriler grafik ortamına çıkarılarak numuneler arasında kıyaslama yapılmıştır. Güçlendirilmiş kiriş numunelerinde, T_g sıcaklığına ulaşılana kadar geçen süre tespit edilerek numuneler için bir kritik zaman belirlemişlerdir. Elde edilen bu verilere göre 6 cm'lik paspayına sahip olan numune en iyi davranışı gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, beton sınıfı açısından C40 beton sınıfı en iyi performans sağladığı tespit edilmiştir.

Karzad ve ark. (2017) yaptıkları deneysel çalışmada, ön hasarlı betonarme kirişler üzerinde CFRP güçlendirme yöntemlerini uygulamış ve bu alanda gözlemler yapmışlardır. 230 mm × 390 mm × 2700 mm boyutlarına sahip 5 adet kiriş 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney boyunca aşamalı olarak yük miktarı, deplasman miktarı ve CFRP şeritlerinde meydana gelen gerilmeler ölçülmüştür. Deneysel çalışma için üretilen betonarme kirişlerden 2 tanesine yükleme altında belirli seviyelere kadar ön

hasar verilmiştir. Hasar verildikten sonra, CFRP kumaş malzemesi, 2 katlı olarak şerit şeklinde epoksi malzemesi ile birlikte uygulanmıştır. Bu çalışmada 2 tane ön hasarlı güçlendirilmiş, 2 tane ön hasarsız güçlendirilmiş ve 1 tane ön hasarsız güçlendirilmemiş kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan deney sonunda 2 kat CFRP uygulaması referans kirişe göre kesme kapasitesini %95 oranında artırmıştır. Ayrıca, bu çalışmada CFRP kumaşlarının henüz tam kapasiteye ulaşmadan kiriş yüzeyinden ayrıldığı tespit edilmiştir. Şekil 2.7'de CFRP şerit uygulaması ve deney yükleme mekanizması gösterilmiştir.

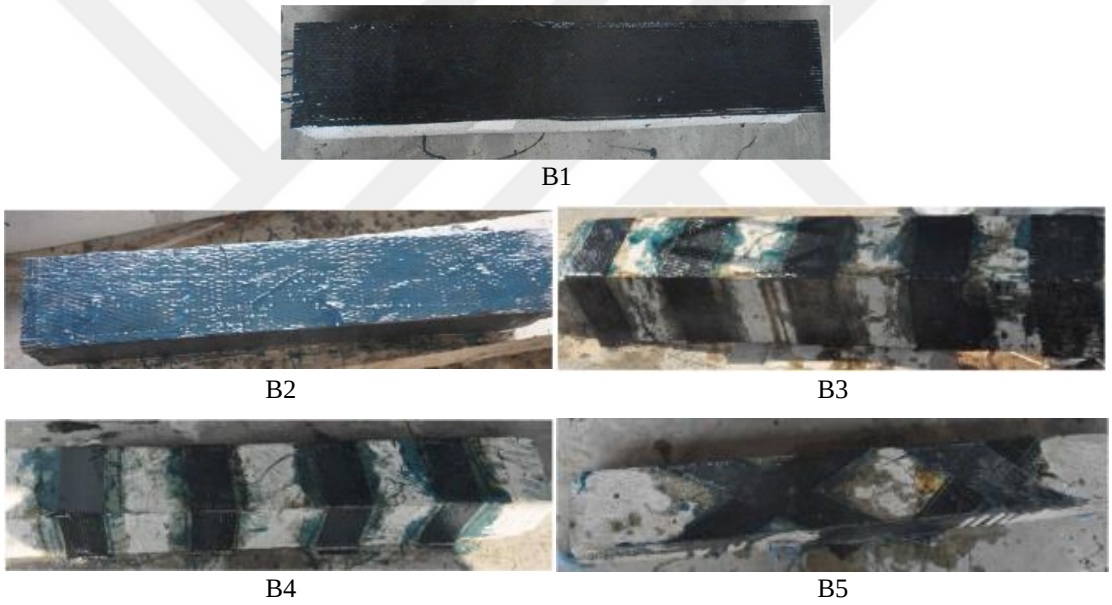


Şekil 2.7. CFRP şerit uygulaması ve 3 noktalı yükleme düzeneği (Karzad ve ark., 2017)

Qin ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, düşey yükleme altında hasar görmüş kirişlerin iki farklı yöntem olan BFRP ve çelik plakalar yöntemlerini bir arada kullanılarak yapılan güçlendirmelerin kiriş davranışına etkisini araştırmışlardır. Bunun için C40 dayanımına sahip, 200 mm × 300 mm × 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 yapıldıktan sonra kirişler dört noktalı eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonunda, ciddi hasar verilmiş olan kirişlerin BFRP ve çelik levhalarla güçlendirilmesi, rijitliği ve eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Farklı güçlendirme konfigürasyonlarına bağlı olarak güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasiteleri referans kirişe göre artış miktarları %25.74, %40.62, %49.68, %21.84, %28.47 ve %17.74 şeklinde olmuştur. Ayrıca, aşamalı olarak izlenen deneyde, BFRP malzemesinin çelik plakalardan daha önce moment yükü ve çekme gerilmelerine maruz kaldığı ve çelik plakaların ise kiriş taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra devreye girdiği tespit edilmiştir.

Siddika ve ark. (2019) yaptıkları deneysel çalışma kapsamında, 150 mm × 150 mm × 700 mm boyutlarına sahip kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerini CFRP

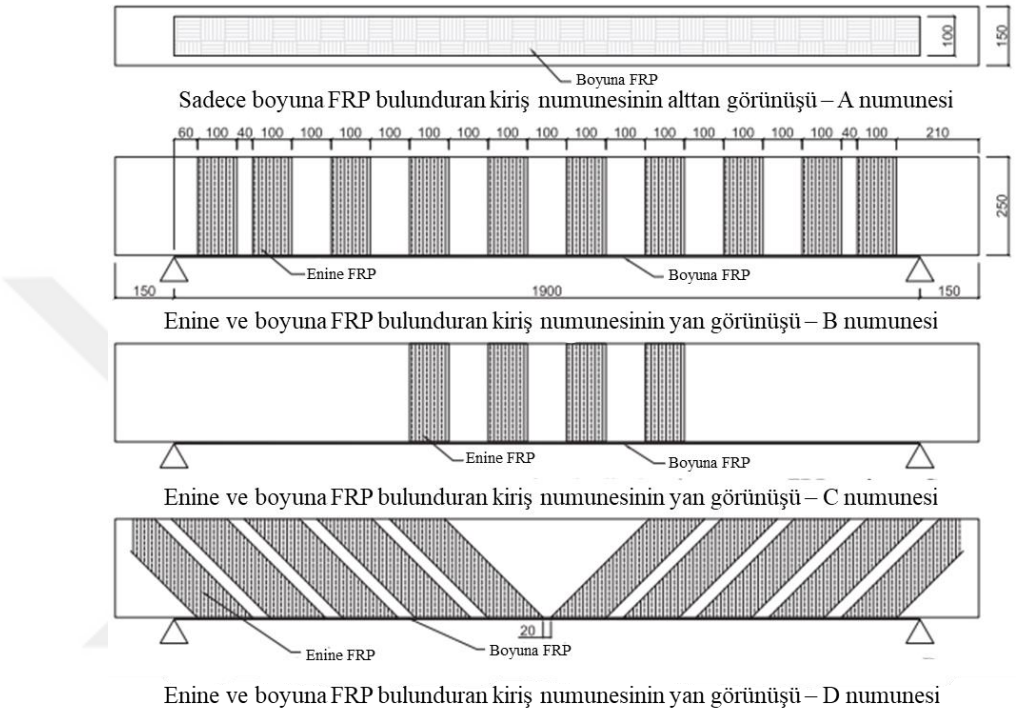
kullanarak arttırmayı amaçlamışlardır. Bunun için beş farklı CFRP güçlendirme konfigürasyonu ile birlikte iki farklı yüzey işlemi türü deneysel işleme tabi tutulmuş ve güçlendirilmiş kirişlere ait yük-deplasman değişimleri gözlemlenmiştir. Şekil 2.8'de deney kirişlerinde kullanılan CFRP konfigürasyonları gösterilmiştir. Deneysel çalışmanın sonunda, referans numuneye göre CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde rijitliğin artmasının yanı sıra güçlendirme uygulamalarının süneklik kapasitesine de önemli ölçüde katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kiriş yüzeyine uygulanan CFRP şeritlerinin kiriş içerisindeki etriyelere denk gelmesi durumunda kirişin mukavemetini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada ACI 440.2R-17 yönetmeliğine göre yapılan analitik hesaplamaların, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında daha güvenli tarafta kaldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Deney kirişlerinde kullanılan CFRP konfigürasyonları (Siddika ve ark., 2019)

Pham ve ark. (2020) çalışmasında, %0, %15 ve %30 oranında kauçuk malzemesi bulunduran kiriş numuneleri BFRP malzemesi ile güçlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, 150 mm × 250 mm × 2200 mm boyutlarına sahip on iki adet kiriş üzerinde çeşitli BFRP sarma konfigürasyonları uygulanmış ve kirişlerin darbe direnci performansları incelenmiştir. Bu inceleme sürecinde darbe etkisi altında etkili olan güçlendirme tipinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Şekil 2.9'da deney kirişlerinde uygulanan BFRP güçlendirme konfigürasyonları gösterilmiştir. Yapılan analizler sonunda kauçuk kullanılan betonun, normal betona göre %10-18 kadar daha yüksek enerji tükettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kauçuk kullanılan beton malzemesinin basınç dayanımları

normal betona göre daha az olmasına rağmen, aynı darbe etkisi altında referans kirişlere göre daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca, darbe etkisine en çok maruz kalan bölgelerde yapılan U şeklindeki BFRP şerit sargılaması, tüm kirişi eşit olarak saran BFRP uygulamaları ile benzer performansı gösterdiğinden, uygulamada U şeklinde BFRP sargılamasının kullanılmasının daha ekonomik olacağı önerilmektedir.



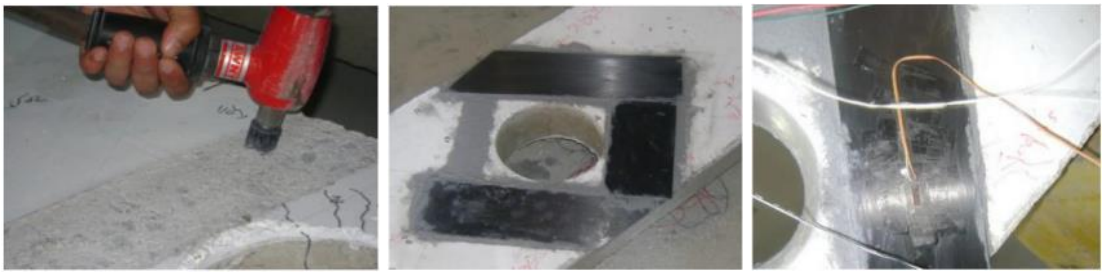
Şekil 2.9. Deney kirişlerinde kullanılan BFRP konfigürasyonları (Pham ve ark., 2020)

Raval ve ark. (2020), ekonomik olması şartıyla güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan mevcut yapıların yeterli dayanıma ulaştırılması için kullanılacak uygulamalar üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, betonarme kirişler üzerinde AFRP'nin farklı konfigürasyonlarını deneyerek güçlendirme yönteminin kesme kapasitesine olan katkısını araştırmayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla, 45° açıyla şerit halinde, iki farklı şerit genişliği kullanılarak 90° açıyla şerit halinde ve 90° açıyla tam sargı olacak şekilde AFRP konfigürasyonları tasarlamışlardır. Bu çalışma için 150 mm × 150 mm × 700 mm boyutlarında C20 ve C25 beton dayanımlarına sahip 18 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Her bir AFRP konfigürasyonu için güçlendirme uygulamaları yapılmış ve referans kirişlerle birlikte dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini iyileştirmek için 90° olarak uygulanan AFRP güçlendirme tasarımı referans kirişe göre %48.66 kapasite artışı

sağlarken, 45° olarak uygulanan AFRP güçlendirme tasarımı referans kirişe göre %36 kadar kapasite artışı sağlamıştır. Araştırmacılar, elde ettikleri verilere dayanarak 90° AFRP uygulamasının 45°'ye göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Abd (2021) çalışmasında, farklı etriye aralıkları olarak 50 mm, 100 mm ve 150 mm etriye aralığına sahip 12 adet kiriş üzerinde farklı CFRP konfigürasyonlarını denemiştir. 100 mm × 200 mm × 1100 mm boyutlarına sahip kirişlerde alt donatı olarak 2Ø12 ve üst donatı olarak ise 2Ø4 donatı kullanılmıştır. 9 adet kirişten 3 tanesi 90° şerit şeklinde, 3 tanesi eğimli yerleşim şeklinde ve diğer 3 tanesi ise X şeklinde güçlendirilmiştir. Her etriye aralığına sahip birer numune, herhangi bir güçlendirmeye tabi tutulmadan referans kiriş olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonunda, X şeklinde yapılan güçlendirme diğerlerine göre en iyi davranışı göstermiştir. X şeklinde yapılan güçlendirme referans kirişlere göre yük kapasitesinde yaklaşık %70 artış sağlarken, maksimum deplasman değerinde ise %39 kadar bir azalma sağlamıştır. X şeklindeki güçlendirme uygulamasının diğerlerine göre daha iyi davranış sergilediği gözlemlendiğinden, araştırmacı çalışma sonucunda X şeklinde güçlendirme yapılmasını önermektedir.

Abed ve ark. (2021) yaptıkları deneysel çalışmada, kirişlerin kesme bölgelerinde açılan dairesel deliklerin onarılmasında kullanılan CFRP uygulamasının etkinliğini araştırmışlardır. Deney kapsamında, 1 referans kiriş olmak üzere 4 adet 150 mm × 400 mm × 2200 mm boyutlarına sahip olan kirişler kullanılmıştır. Sırasıyla 10 mm, 15 mm ve 20 mm çapında üç kirişin kesme bölgesine dairesel delikler açılmış ve bu kirişlere eğilme yüklemesi altında hasar verildikten sonra deliklerin etrafı CFRP ile güçlendirilmiştir. Şekil 2.10'da kiriş numunesinde açılan delikler için yapılan CFRP güçlendirmesi görülmektedir. Güçlendirilen kirişler dört noktalı eğilme yüklemesi altında yük kapasiteleri, CFRP malzemesindeki gerilmeler ve kirişte meydana gelen çatlaklar incelenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonunda, CFRP güçlendirilmesi öncesinde meydana gelen gevrek hasarlar, güçlendirme yapıldıktan sonra sünek davranışa dönüşmüştür. 10 mm çaplı delik bulunduran kiriş davranışı, güçlendirme ile birlikte kesme kırılmasından eğilme kırılmasına dönüşürken, 15 ve 20 mm çaplı deliklere sahip kirişler kesme kırılmasından göçmüşlerdir.

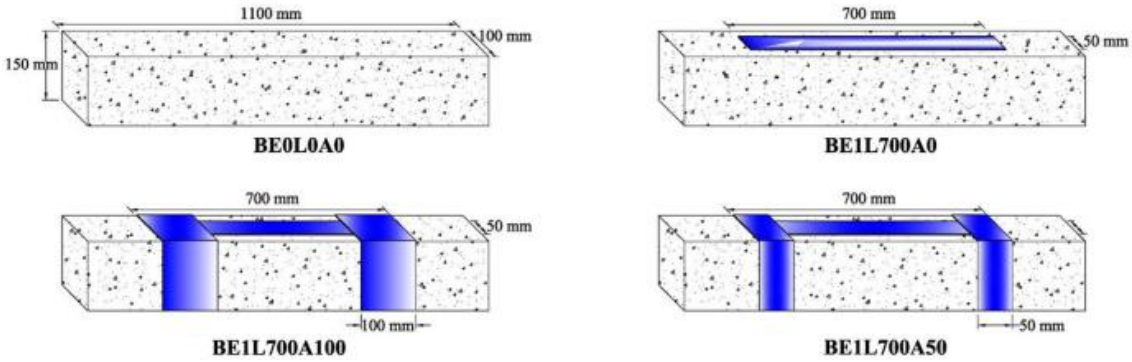


Şekil 2.10. Deney kirişlerinde açılan deliklerin etrafına yapılan CFRP uygulaması (Abed ve ark., 2021)

Al-Fakih ve ark. (2021) çalışmalarında, deniz kumu ile birlikte karbon fiber takviyeli plaka ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dayanım kapasitelerini, hasar tiplerini ve çatlakların kirişteki dağılımını incelemişlerdir. Bu çalışmada, 100 mm × 150 mm × 1600 mm boyutlarına sahip 3 adet kiriş numunesi dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney numuneleri, normal kum kullanılarak hazırlanmış referans kiriş, normal kum kullanılarak CFRP takviyeli plaka ile güçlendirilmiş kiriş ve deniz kumu kullanılarak CFRP takviyeli güçlendirme yapılmış kirişler olarak hazırlanmıştır. CFRP ile yapılan güçlendirmelerde, kiriş alt kısmına CFRP kumaşları epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonunda, CFRP takviyeli plaka ile güçlendirilmiş deniz kumu içeren kirişin eğilme kapasitesi referans kirişten %5.50 kadar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kiriş alt kısmına CFRP plaka yapıştırılan kirişlerde CFRP levhalarının ayrılmasından dolayı göçme oluşurken, referans kirişinde ise kesme hasarından dolayı göçmenin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu sayede, kullanılan CFRP plakasının kiriş hasar davranışını değiştirdiği belirtilmiştir.

Alhassan ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, eğilme kapasitesi yetersiz kirişlerde kiriş alt bölgesine bir adet ana CFRP kumaş malzemesi ve yükleme altında CFRP'nin ayrılmasını engellemek için ayrıca iki uç tarafını tutacak şekilde U biçiminde CFRP kumaş ile takviye sağlanmıştır. Şekil 2.11'de CFRP kumaşların uygulanma biçimleri gösterilmiştir. Kullanılan CFRP uygulama tekniğinin işe yaradığını göstermek için 35 adet kiriş üzerinde deneyler yapılmıştır. Numuneler 3 ana parametre bakımından çeşitlendirilmiştir. Bu parametreler, kullanılan ana CFRP kumaşının katman sayısı, U biçiminde kullanılan CFRP kumaş genişliği ve ana CFRP kumaşının uzunluğu şeklinde olmuştur. Yapılan deneyler sonunda, önerilen CFRP uygulama tekniğinin eğilme kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Kirişler üzerindeki çatlaklar incelendiğinde, ana CFRP uzunluğunun ve U biçimindeki CFRP şeritleri için genişliğin artmasıyla eğilme çatlaklarını daha çok engellediği tespit edilmiştir. Ayrıca

kullanılan CFRP güçlendirme uygulamasının eğilme kapasitesini yaklaşık %25 oranında iyileştirebileceği ortaya konmuştur.

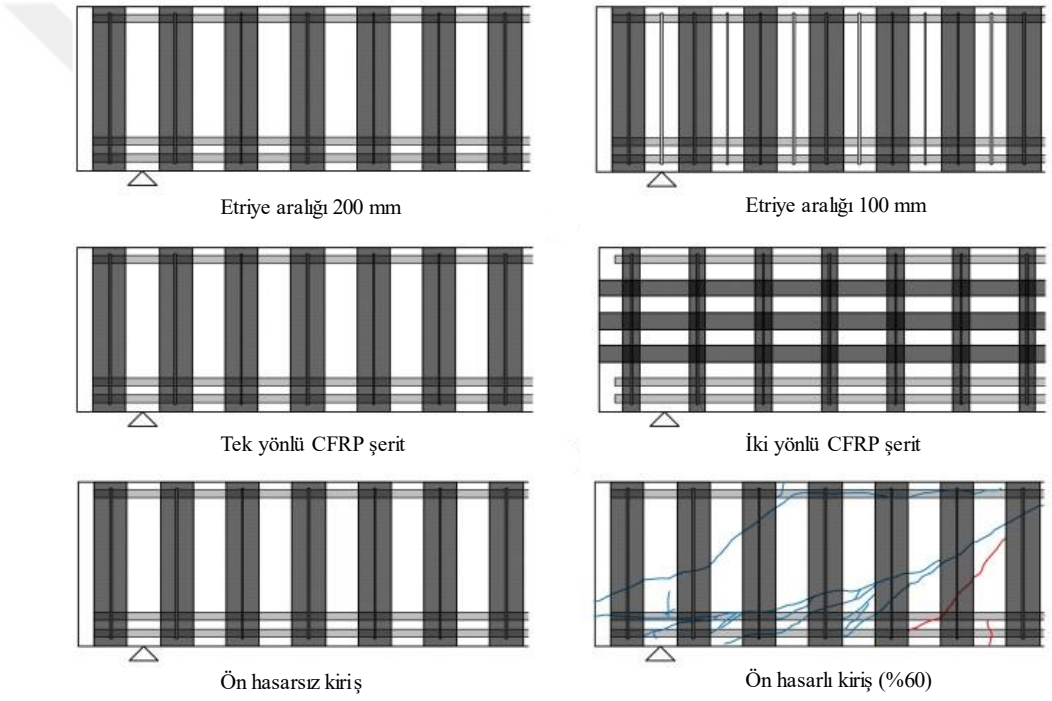


Şekil 2.11. Deney kirişlerinde uygulanan CFRP güçlendirme konfigürasyonları (Alhassan ve ark., 2021)

Al-Khafaji ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, sürekli yükleme altında CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin uzun vadeli davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında, farklı donatı oranlarına sahip kirişler U şeklinde şerit ve sadece kiriş alt kısmına uygulama şeklinde iki farklı CFRP konfigürasyonu kullanılarak güçlendirilmiştir. İkisi referans kiriş, 10 adet CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerden 5 tanesi uzun vadeli (332 gün) ve diğer 5 tanesi ise kısa vadeli sürekli eğilme yüklemesi altında deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonunda uzun vadeli yüklemeye tabi tutulan güçlendirilmiş kirişlerde dayanım, kısa vadeli yüklemeye tabi tutulan güçlendirilmiş kirişlerdeki dayanımdan %5-18 kadar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan her iki güçlendirme uygulamasının da kirişin genel performansı ve hasar modunu iyileştirmede önemli derecede katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Haroon ve ark. (2021) yaptıkları deneysel çalışmada kesme kapasitesi yetersiz kirişleri, 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) araştırılmıştır (Şekil 2.12). Bu amaçla, iki seri olmak üzere birinci seride 10 tane kiriş ve ikinci seride ise 8 tane kiriş numunesi üretilmiştir. Birinci seride kullanılan kiriş boyutları 300 mm × 500 mm × 2200 mm ve ikinci seride kullanılan kiriş boyutları 300 mm × 500 mm × 2600 mm şeklindedir. Deney kirişlerinde, a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı birinci seri için 3 ve ikinci seri için 2.1 olarak dikkate alınmıştır. Deney numuneleri dört noktalı yükleme düzeneğinde

test edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, iki yönlü CFRP kullanılan deney kirişlerinde kullanılan CFRP miktarının tek yönlü CFRP uygulanan kirişlerden daha fazla olmasına rağmen, kesme kapasitesine olan katkıları açısından kayda değer bir artış gözlenmemiştir. 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 şeritlerininin kullanımının uygun olmadığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.12. Deneysel çalışmada incelenen parametreler (Haroon ve ark., 2021)

Kotynia ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, Fiber Takviyeli Polimer (FRP) malzemesi olan CFRP ve GFRP kullanılarak yapılan lifli polimer güçlendirmesi ile ilgili oldukça kapsamlı bir bakış açısı ortaya koymuşlardır. Çalışma kapsamında, 81 deney programından toplam 555 kiriş numunesi üzerinde, a_v/d oranı, kesme donatısı oranı, beton basınç dayanımı, kiriş faydalı yüksekliği, boyuna donatı oranı, kullanılan fiber takviyeli polimer türü, kullanılan FRP malzeme kalınlığı ve kullanılan FRP malzeme tipi gibi oldukça çok sayıda parametrenin etkisi araştırılmıştır. Verileri ve davranışları incelenen kirişlerden 354 tanesi dikdörtgen kesitli iken geriye kalan 201 tanesi ise T kesitli olarak

dikkate alınmıştır. Çalışmada araştırmacılar, kirişlerdeki kesme hasarlarını engelleyecek güçlendirme konfigürasyonları hakkında kapsamlı bir bakış açısı oluşturmayı ve meydana gelen hasar tiplerini gözlemleyerek etkin güçlendirme parametrelerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Deney sonuçlarını grafik ortamına taşıyarak FRP güçlendirme alanında kapsamlı bir değerlendirme sunmuşlardır.

Miruthun ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, betonarme dikdörtgen kesitli kiriş numuneleri GFRP laminant malzemesi ile güçlendirilmiş ve uygulanan güçlendirmenin kiriş davranışına etkileri gözlemlenmiştir. Bu çalışma için 150 mm × 250 mm × 2000 mm boyutlarına sahip kiriş numuneleri üretilmiş ve aralıklı, çapraz ve eğimli olmak üzere 3 farklı laminant GFRP konfigürasyonu kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Güçlendirme yapıldıktan sonra belli bir seviyeye kadar deney numuneleri eğilme testine tabi tutulmuştur. Eğilme testinden sonra kirişler tekrardan güçlendirilmiş ve tekrardan eğilme testi yapılmıştır. Deney sonunda elde edilen veriler çeşitli güçlendirme tipleri arasında kıyas edilmiştir. Sonuç olarak aralıklı, çapraz ve eğimli laminant GFRP güçlendirme uygulamalarının hepsi hasarlı kiriş üzerinde kesme kapasitesi açısından olumlu etki gösterse de en fazla kesme kapasitesini artıran güçlendirme yöntemi aralıklı laminant GFRP sarma yöntemi olmuştur.

Shen ve ark. (2021), korozyona maruz bırakılmış kolon-kiriş birleşimlerini BFRP levhası ile güçlendirmiş ve çevrimsel yükleme altında test etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında bir referans numune, farklı korozyon hızlarına sahip 3 tane numune ve BFRP ile güçlendirilmiş 3 tane numune olmak üzere toplamda 7 numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Kolon kesitleri 250 mm × 250 mm ve kiriş kesitleri 200 mm × 300 mm olarak seçilen deneysel çalışmada, yapılan yükleme altında kolon-kiriş birleşimlerinde oluşan hasar tipleri, göçme modu, enerji kaybı ve rijitliğin azalması parametreleri incelenmiştir. Şekil 2.13'te BFRP ile güçlendirilen deney numunesi gösterilmiştir. Yapılan deney sonunda korozyona uğramış numunelerin BFRP ile güçlendirilmesi önemli ölçüde işe yaradığı görülmüştür. BFRP malzemesi sayesinde paslanmaya uğramış numunelerde betonun dağılması ve ezilmesi ile birlikte beton içerisindeki etriyelerin burkulması da geciktirilmiştir. Korozyona uğramış numunelerde, BFRP ile güçlendirme yapıldıktan sonra numunenin rijitliği, paslanmaya maruz bırakılmayan numunenin rijitlik seviyesine kadar ulaşılmıştır. Ayrıca, BFRP ile güçlendirme sonucunda numunelerde yük taşıma kapasitesi, toplam deplasman değeri ve enerji yutma kapasitesinin önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 2.13. BFRP ile güçlendirilen kolon-kiriş birleşim elemanı (Shen ve ark., 2021)

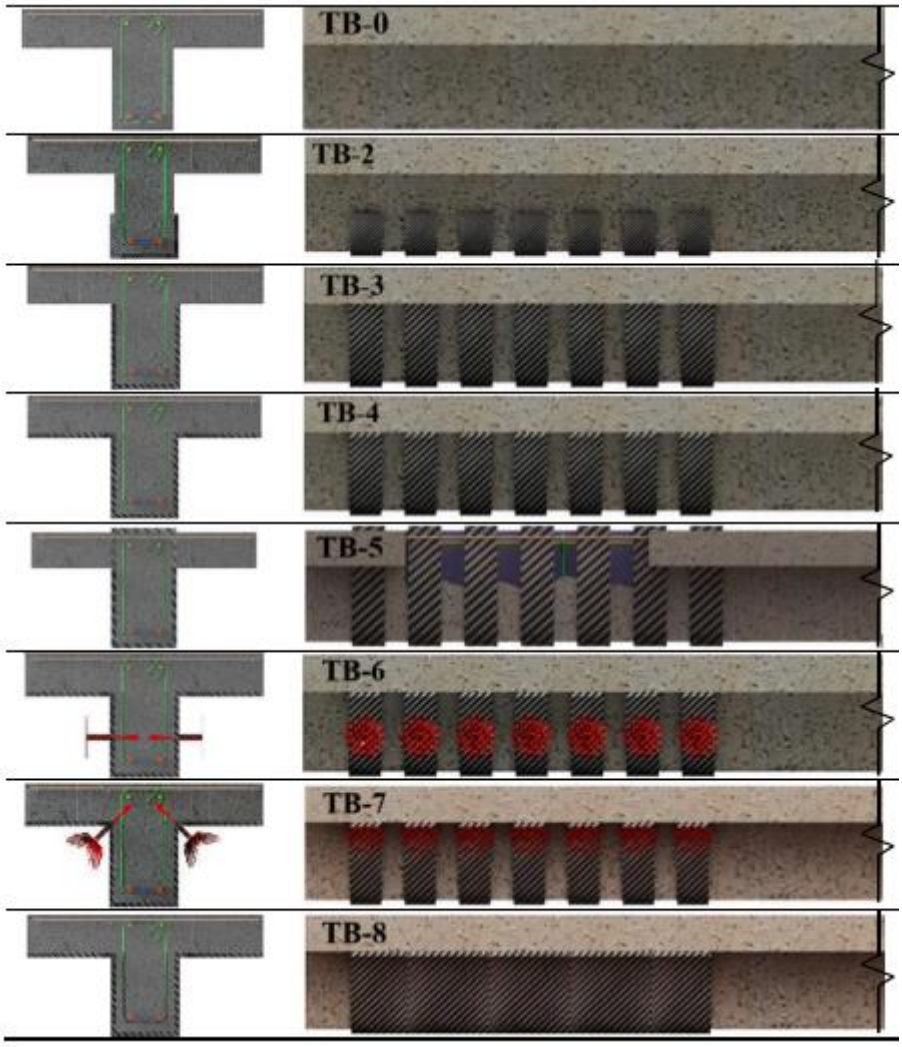
Abadel ve ark. (2022), yangından dolayı yapılarda oluşan hasarlar yapının kullanım ömrü boyunca betonarme yapılar için ciddi sorun teşkil ettiğinden dolayı yapının hizmet ömrünü arttırmaya yönelik alternatif güçlendirme yöntemleri üzerine çalışmışlardır. Bu doğrultuda normal dayanım (30 Mpa) ve yüksek dayanım (60 Mpa) olmak üzere iki farklı dayanıma sahip standart silindir numuneleri üzerinde GFRP güçlendirmesi incelenmiştir. Güçlendirmeler yapılmadan önce iki farklı sıcaklık değerleri olan 400 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış ve hava soğutma veya su içerisine atarak numuneler soğutulmuştur. Ayrıca, beton numuneleri çelik, polipropilen veya çelik ile polipropilen karışımı şeklinde fiber takviyeli malzemeler beton karışımı içerisinde kullanılmıştır. Numuneler basınç testine tabi tutularak elde edilen veriler kayıt altına alınmıştır. Elde edilen verilere göre 400 °C sıcaklığa maruz bırakılan normal ve fiber takviyeli betonlar için, GFRP ile güçlendirilmiş basınç dayanımları sırasıyla %39'dan %48'e ve %42'den %56'ya yükseldiği gözlemlenmiştir. Dahası, bu artışın 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, betonlarda meydana gelen hasarlar incelendiğinde farklı ısıtma sıcaklıkları, numune soğutma tipleri ve beton içerisinde kullanılan lifli polimer konfigürasyonları GFRP ile güçlendirilmiş betonlarda oluşan hasar tipini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

AL-Shalif ve ark. (2022) yaptıkları deneysel çalışmada, GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımına, göçme moduna ve deplasman miktarına olan etkileri

araştırmışlardır. Bunun için 9 adet T biçimindeki kiriş numuneleri üretilmiş ve bir tanesi referans olmak üzere geriye kalan 8 tanesi GFRP'nin farklı konfigürasyonları kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilme yapılan 8 kirişten 7 tanesi şerit halinde ve 1 tanesi ise kiriş kesme bölgesini kaplayacak şekilde sürekli olarak uygulanmıştır. Şerit halinde uygulama yapılan deney kirişlerinin 2 tanesinde, GFRP malzemesi kullanılarak 45° ve 90° açılı olmak üzere iki farklı ankraj tipi kullanılmıştır. Numuneler 10 kN'luk artan yükler altında dört noktalı eğilme yükleme düzeneğinde test edilmiş ve yük ve deplasman değerleri kaydedilmiştir. Deneyde elde edilen veriler her bir numune için ACI 440.2R-17, TBDY-2019 ve FIB-2001 yönetmeliklerinde verilen ampirik formüllerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonunda deneysel sonuçlar ile analitik hesapların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan deneylere göre GFRP ile yapılan güçlendirmenin kesme hasarlarını önemli ölçüde engellediği tespit edilmiştir. Ayrıca, yapılan güçlendirme uygulamaları sayesinde bazı numunelerde kiriş davranışının kesmeden eğilmeye döndüğü görülmüştür. Güçlendirme uygulaması yapılan TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinde kesme yük kapasitesinin aşılmasından dolayı kesmeden göçme oluşurken, TB-4, TB-5, TB-6, TB-7 ve TB-8 numuneleri sünek bir davranışa sergileyerek eğilmeden göçmüştür.

Arslan ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada, betonarme T kesitli kirişlerde CFRP güçlendirme uygulamasının ankrajlı uygulamasını farklı konfigürasyonlar kullanarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, ½ geometrik ölçekli 9 adet T kesitli betonarme kirişi dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney kirişlerinden 7 tanesi şerit halinde ve 1 tanesi bütün tam sargı halinde uygulanırken, geriye kalan 1 tanesi ise referans kiriş olarak kullanılmıştır. Şerit halinde uygulanan deney kirişlerinden 2 tanesinde, 90º ve 45º olmak üzere iki farklı tipte ankraj kullanılmıştır. Şekil 2.14'te GFRP güçlendirme detayları gösterilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara göre, güçlendirme konfigürasyonu ve ankraj açısının yapılan güçlendirme uygulamasının kesme dayanımına olan katkısını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. En etkili sonuçlar, tam sargı ve 45º açılı ankraj edilmiş şerit uygulamasında elde edilmiştir. Yapılan ankraj uygulamasının referans kiriş numunesine göre %42.6 - %53,8 aralığında kesme kapasitesi artırdığı gözlenmiştir. 45º açılı ankraj uygulamasında, güçlendirme uygulanmayan kiriş numunesine göre yaklaşık %37 kadar dayanım artışı görülmüştür. Süneklik artışı açısından en etkili sonuç, tam sargı (döşeme kırılarak yapılan uygulama (TB-5)) olarak yapılan güçlendirme uygulamasında elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17, TBDY-2019 ve FIB-2010 yönetmeliklerinde yer alan analitik hesaplar ile

karşılaştırıldığında, özellikle tam sargı uygulamasında ACI 440.2R-17 yönetmeliği, %96 oranla deney sonuçlarına en yakın sonucu vermiştir.



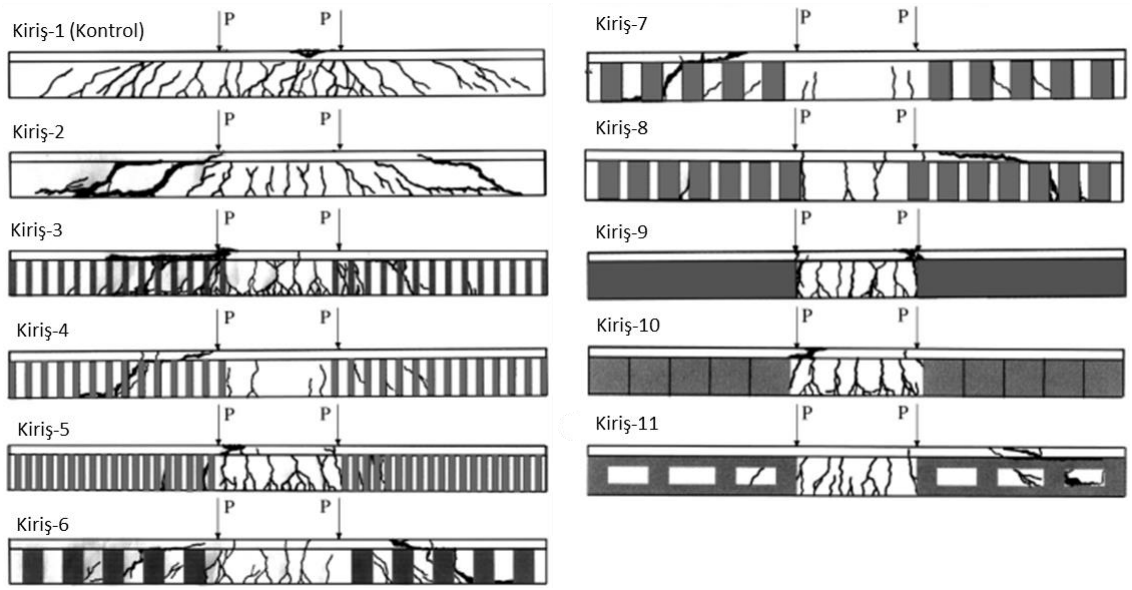
Şekil 2.14. T kesitli betonarme kirişlerinde kullanılan GFRP güçlendirme detayları (Arslan ve ark., 2022)

Fayyadh ve Abed (2022), hasarlı betonarme kirişlerde CFRP ve çelik plaka uygulamalarının kiriş yük taşıma kapasitesine ve göçme mekanizmasına (hasar tipi) olan etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda, kirişlerin kesme açıklığında 150 mm çapında delik açılarak hasar verilmiş ve açılan deliğin çevresinde güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışmada 5 tane 150 mm × 400 mm × 2300 mm geometrik boyutlara sahip deney kirişleri üretilmiştir. Bu kirişlerden 1 tanesi referans, 2 tanesi CFRP plakalar ile (delik çevresinde eğik ve dikey olmak üzere) ve diğer 2 tanesi de çelik plakalar ile (delik çevresinde eğik ve dikey olmak üzere) güçlendirilmiştir. Deney kirişleri 3 noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiş ve deney aşamasında kirişte oluşan hasarlar incelenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, delik çevresine yapılan CFRP

ve çelik plaka uygulamalarının her ikisinin de referans kiriş numunesine kıyasla kiriş yük taşıma kapasitesini artırdığı ve hasar oluşumunu azalttığı belirtilmiştir. Her iki güçlendirme yönteminde de delik çevresinde eğik olarak yapılan uygulamanın dikey olarak yapılan uygulamadan daha etkili olduğu elde edilen veriler ile gösterilmiştir. Eğik olarak yapılan uygulamada, kiriş davranışının gevrek kırılmadan sünek kırılmaya döndüğü gözlenmiştir. Ayrıca, CFRP plakalarının çelik plakalara göre hasar davranışını daha iyi bir şekilde iyileştirdiği ve yük taşıma kapasitesini daha çok arttırdığı görülmüştür.

2.1.2. Çelik plaka ve levha ile sargılama

Altin ve ark. (2005), yaptıkları deneysel çalışmada T kesitli betonarme kirişlerde çelik plaka ile güçlendirme uygulamasının etkinliğini araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında 4000 mm uzunluğa sahip 11 adet T kesitli betonarme kirişi üretilmiştir. Kesme açısından yetersiz olarak tasarlanan kiriş numuneleri (kontrol kirişi hariç), epoksi malzemesi kullanılarak dıştan çelik plakalar ile güçlendirildikten sonra monotonik yükleme altında test edilmiştir. Güçlendirme uygulamasında temel olarak 3 farklı tipte çelik plaka uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilere göre, güçlendirme yapılan tüm deney kirişlerinde dayanım ve süneklik açısından artış sağlandığı görülmüştür. Eğilme kirişi olarak üretilen kontrol kirişi ile kesme kapasitesi yetersiz olan kirişlerin güçlendirildikten sonraki durumu karşılaştırıldığında, birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yani, yapılan güçlendirme uygulaması sayesinde kesme kapasitesi yetersiz olan T kesitli kirişlerin, sünek davranış göstererek eğilme kırılmasından göçmesi sağlanmıştır. Şekil 2.15'te deney kirişlerine ait deney sonu göçme mekanizmaları sunulmuştur.



Şekil 2.15. Çelik plaka ile güçlendirilen deney kirişlerinin deney sonu göçme mekanizmaları (Altin ve ark., 2005)

Choi ve ark. (2011) çalışmalarında, betonarme çerçeveler ve çelik dolgu plaklardan oluşan duvarların çevrimsel yükleme altında sergiledikleri davranışların araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 3 katlı çelik levha dolgulu duvarlar bulunduran betonarme çerçeveler oluşturulmuştur. Kolonlardaki donatı oranı ve çelik dolgu plakaların arasındaki açıklık parametre olarak dikkate alınmıştır. Çelik plaka bulunduran 3 katlı çerçeve modelini verileri karşılaştırmak amacıyla, bir tane dolgu duvar olan 3 katlı betonarme çerçeve ve bir tane dolgu duvar bulundurmayan 3 katlı betonarme çerçeve oluşturulmuştur. Çelik plaka bulunduran çerçeve modeli ile betonarme dolgu duvar bulunduran çerçeve modelinin aynı yük kapasitesine sahip olmalarına rağmen, çelik plaka bulunduran çerçevenin deformasyon miktarı betonarme dolgu bulunduran çerçeve modelinden oldukça fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, çelik plakaların betonarme çerçevede kullanılması kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kesme çatlaklarını ve gevrek kırılmaları önemli ölçüde engellemiştir. Yapılan deneyler sonunda, şerit model kullanılarak çelik plaka bulunduran çerçeve modellerin dayanım ve rijitlikleri tahmin edilmiş ve elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Aykaç ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, süneklik açısından etkili olan CFRP ve hem süneklik hem de dayanım açısından etkili olan çelik plakaların kullanılmasına ilişkin incelemeler yapılmıştır. Çalışmanın amacı, süneklik ve dayanım ihtiyacının birlikte gerektiği durumlar için bu iki uygulamanın birbirlerinin eksiklerini tamamlayabilecek şekilde davranış sergileyebileceğini göstermektir. Bu doğrultuda, 1

tanesi referans, 2 tanesi sadece CFRP kumaşlarla ve geriye kalanlar ise hem CFRP kumaş hem de çelik plakalarla güçlendirilmek üzere toplam 11 tane deney yapılmıştır. 150 mm × 300 mm × 3200 mm boyutlarındaki kirişler, güçlendirme işlemleri tamamlandıktan sonra dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, güçlendirme parametreleri olarak karbon kumaş ve çelik levha katman sayısı ile yapıştırma sırası ve çelik levha kalınlığı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, güçlendirmede CFRP ve çelik plakaların bir arada kullanımı kirişlerin dayanımında önemli artışlar sağladığı ve kiriş davranışını oldukça iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, parametreler arasında olan yapıştırma sırasının kiriş davranışını değiştiren en önemli değişken olduğu belirtilmiştir.

Abdul-Razzaq ve ark. (2017), çelik plakalar ile güçlendirme yönteminin gövde açıklığı olan derin kirişler üzerindeki etkinliği araştırmışlardır. Kiriş açıklıklarında dairesel, yatay ve dikey dikdörtgensel boşluk açılan numuneler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Bir tanesi referans olmak üzere, toplam 13 tane 100 mm × 400 mm × 1000 mm boyutlarındaki kirişlerden 12 tanesinde sağ ve sol olmak simetrik olarak iki boşluk açılmıştır. Çalışma kapsamında açılan boşluk şekli, kullanılan çelik plakalar ve güçlendirme ankraj bağlantıları parametre olarak dikkate alınmıştır. Yapılan deneyler sonunda, öncelikli olarak kirişlerde oluşan hasarın, yüksek oranda oluşacak kesme çatlağının yaptığı açıya bağlı olduğu görülmüştür. Kirişlerde açılan boşluklar, referans numuneye göre yük kapasitesinde %20.5, %18.3, %24.7 ve %31.7 oranlarında azalmaya sebep olmuştur. Bu boşlukları çelik plaka ile güçlendirilmesi, önemli ölçüde yük kapasitesinin artışını sağlamıştır. Kare, dairesel ve yatay ve dikey dikdörtgensel delikler açılmış olan kiriş güçlendirmeleri, güçlendirme yapılmamış boşluklu numunelere göre, sırasıyla yaklaşık %9.3, %13.2, %8.8 ve %11.88 oranlarında yük kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, güçlendirme plakalarına ankrajların eklenmesiyle yük kapasitesi güçlendirilmemiş boşluklu kiriş numunelerine kıyasla sırasıyla %16.9, %17.8, %14.3 ve %26.9 oranlarında arttırdığı tespit edilmiştir. Deney çalışmasından sonra ANSYS 11 kullanılarak yapılan sayısal parametrik çalışma sonucunda, güçlendirme levhasının kalınlığının 4 mm'den 6mm ve 8mm'ye çıkarılması durumlarında, sırasıyla yük kapasitesinin %4 ve %10 oranında artmasını sağlamıştır. Ayrıca, her bir güçlendirme levhasında 4 yerine 8 tane ankraj kullanılması durumunda yük kapasitesinin yaklaşık olarak %11 kadar arttığı tespit edilmiştir.

Alshlash ve ark. (2019), eğilme yönünden yetersiz olan kirişleri çelik plakalar yardımıyla güçlendirmişlerdir. Bu deneysel çalışmada, 125 mm × 250 mm × 2500 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli dört adet kiriş üretilmiştir. Kesme kapasitesinin eğilme

kapasitesinden fazla olması için etriye aralıkları Ø5/100 mm olarak belirlenmiş ve yapılacak güçlendirme ile birlikte sünek bir davranış sağlanabilmesi için boyuna donatı oranı denge altı olacak şekilde 0.0117 olarak seçilmiştir. Kiriş numunelerinde eğilme hasarlarının görülebilmesi için a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı 3.11 olarak seçilmiş ve ayrıca kirişlere deney kapsamında %1, %2 ve %3 düşey deplasman oranlarına kadar farklı düzeylerde ön hasarlar verilmiştir. Dört kiriş numunesinden bir tanesi taşıma gücüne ulaşana kadar yüklenirken, geriye kalan üç tane kiriş ise belirtilen (%1, %2 ve %3) ön hasar düzeyinden sonra çelik plakalar ile güçlendirilmiş ve sonrasında eğilme deneyine tabi tutularak taşıma kapasitelerine ulaşmaları sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın sonunda, farklı hasar seviyelerinde güçlendirilmiş kirişlerin yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, çelik plakalar ile güçlendirme uygulamasının kirişin rijitlik, süneklik ve enerji yutma kapasitelerini arttırdığı sonucu elde edilmiştir.

Erkan ve ark. (2019) yaptıkları deneysel çalışmada, kesme yönünden yetersiz olan kirişlerin çelik plakalar ile güçlendirilmesi üzerine birtakım deneyler yapmışlardır. 125 mm × 250 mm × 2500 mm boyutlarındaki kiriş numunelerinin kesme yönünden yetersiz olabilmesi için etriyeler Ø5/350 mm aralıklarla atılmıştır. Çalışma kapsamında, 1 adet referans kiriş ve 3 adet ön hasar verilmiş kiriş numunesi bulunmaktadır. Ön hasar verilen kirişler, çelik plakalar yardımıyla şerit halinde kesme bölgeleri güçlendirilmiştir. Ön hasar verilen kirişlerde, referans numune deneyi sonucunda elde edilen taşıma kapasitesinin %50, %63 ve %83 düzeylerine kadar yüklemeye tabi tutulmuştur. Sonrasında 3 farklı ön hasar seviyesine sahip kirişler, çelik plakalar ile güçlendirilmiş ve referans numune ile birlikte taşıma kapasitesi aşılana kadar yükleme yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucu olarak güçlendirilmiş kirişler, referans kirişe göre %30, %30 ve %46 kadar kesme kapasitelerinde artış olduğu görülmüştür. Elde edilen verilere dayanarak çelik plakalar ile güçlendirilmiş kirişler, güçlendirme sonunda mevcut kapasiteye eriştiği belirtilmiştir. Şekil 2.16'da %63 ön hasar verilen deney kirişinin deney sonu göçme mekanizması sunulmuştur.

Şekil 2.16. Çelik plaka ile güçlendirilen kiriş numunesinin (%63 ön hasar) deney sonrası göçme durumu (Erkan ve ark., 2019)

2.1.3. Betonarme mantolama

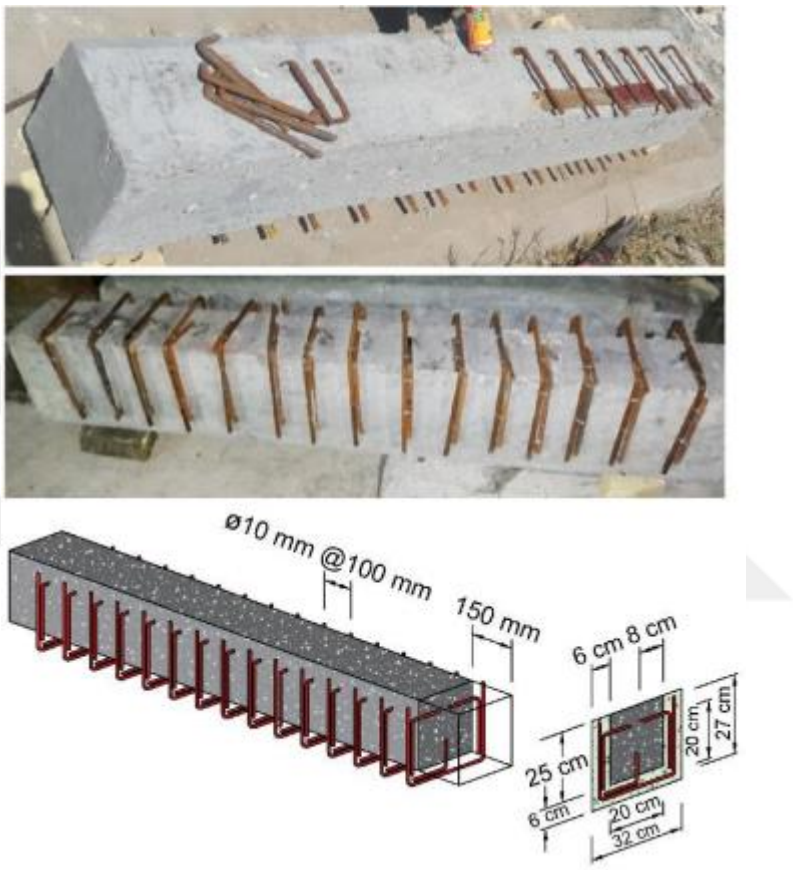
Altun ve ark. (2002) yaptıkları deneysel çalışmada, betonarme kiriş elemanlarına mantolama ile güçlendirme uygulamasını kullanarak, hasar görmüş yapı elemanlarının taşıma gücünü iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, 2000 mm uzunluğa sahip ve 150 mm × 150 mm, 200 mm × 150 mm ve 200 mm × 200 mm kesit boyutlarına sahip 9 adet kiriş numunesini üretmişlerdir. Sonrasında, bu kiriş numunelerine 4 noktalı yükleme altında hasar verilmiştir. Hasar verilen kiriş numunelerinde, paspayı alındıktan sonra hasarlı kiriş için eğilme davranışı sergileyecek bir tasarım yapılarak, mantolama ile güçlendirme yapılmıştır. Şekil 2.17'de deneysel çalışmada yapılan mantolama yöntemi ile güçlendirme uygulaması gösterilmiştir. Güçlendirme uygulamasında, 100 mm manto betonu eklenerek 350 mm × 350 mm, 400 mm × 350 mm ve 400 mm × 400 mm kesit boyutlarına sahip 9 adet mantolu kiriş numunesi elde edilmiştir. Bu kiriş numuneleri tekrardan 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Yapılan testler sonunda elde edilen sonuçlara göre, 350 mm × 350 mm ve 400 mm × 350 mm kesit boyutlarına sahip olan mantolu kiriş numunelerinde sünek kırılmalar görülmüştür. Bu durum, sonradan eklenen mantolu betonun farklı zamanlarda dökülen kiriş betonu ile birlikte uyumlu bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Ancak, 400 mm × 400 mm kesit boyutlarına sahip olan mantolu kirişte olduğu gibi, mantolu kiriş kesitinin artmasıyla kiriş sünekliliğinde azalma olduğu görülmüştür.

Şekil 2.17. Mantolama uygulaması (Altun ve ark., 2002)

Chalioris ve Pourzitidis (2012) yaptıkları çalışmada, kesme hasarına uğramış betonarme kirişleri, kendiliğinden yerleşen beton ile mantolama uygulayarak yapılan güçlendirme uygulamasının, kesme hasarlı kiriş numunesinin dayanıma olan etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda, kesme hasarı verilmesi için 5 adet kiriş numunesi üretilmiş ve 4 noktalı yükleme altında kesme hasarı verilmiştir. Hasarlı kiriş numuneleri, mantolama yöntemi ile güçlendirildikten sonra tekrardan 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney sonu elde edilen sonuçlar ve deney sırasında kiriş davranışları incelendiğinde, mantolama uygulaması yapılan kiriş numuneleri eski dayanımına ulaştığı veya daha yüksek dayanımlara ulaştığı görülmüştür. Deney kirişlerinde, %35 - %200 aralığında yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca, bazı kiriş numunelerinde yapılan güçlendirme sayesinde kesme davranışının eğilme davranışına döndüğü tespit edilmiştir.

Ojaimi (2021) yaptığı çalışmada, kesme açısından yetersiz olan kirişler için 4 farklı mantolama tekniği uygulanmıştır. Bu amaçla, 200 mm × 250 mm × 1700 mm geometrik boyutlara sahip olan 5 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Deney kirişleri kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 2 alınarak 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. 1 tanesi referans kiriş olmak üzere diğer 4 tanesi farklı mantolama teknikleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme uygulamasında etriye bulundurması, kendiliğinden yerleşen beton kullanılması, beton içerisinde çelik fiber malzeme kullanılması, mantolama yapılmadan önce kiriş numunesine dışarıdan donatı eklenmesi, ferrocement (hasır) donatıların kullanılması durumları değişken parametre olarak seçilmiştir.

Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, mantolama teknikleri ile güçlendirilen kiriş numuneleri referans kiriş ile kıyaslandığında %6 - %59 aralığında kapasite artışı olduğu görülmüştür. Rijitlik ve yük taşıma kapasitesi açısından en etkili olan güçlendirme uygulaması, etriyeli ve kendiliğinden yerleşen beton kullanılan mantolama tekniği olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.18'de en etkili olan bu mantolama tekniği gösterilmiştir.

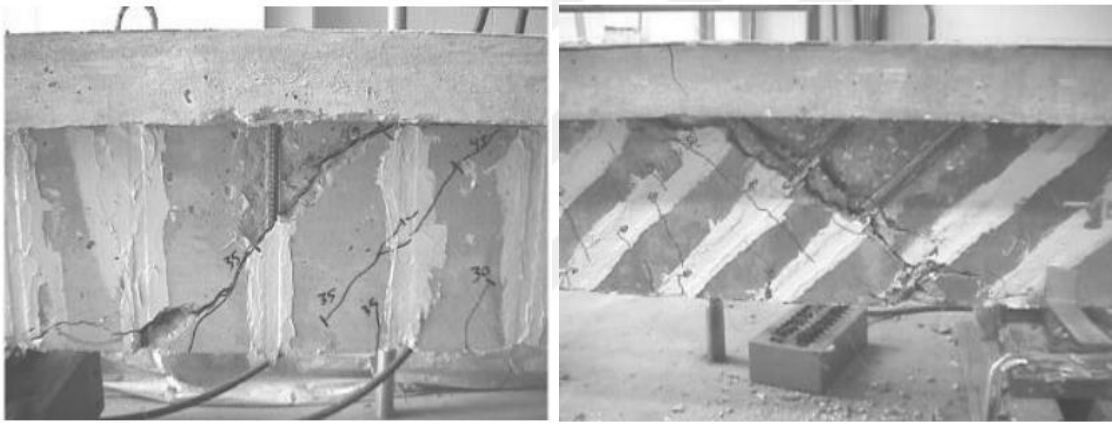


Şekil 2.18. Ojaimi (2021) çalışmasında kullandığı mantolama tekniği

2.1.4. NSM (Near Surface Mounted) yöntemi

Literatürde Near Surface Mounted (NSM) olarak bilinen, beton yüzeyinde oluklar açılmak suretiyle ilgili malzemeyi (donatı vb.) bu olukların içerisine yerleştirmeyi öngören bir metod bulunmaktadır (De Lorenzis ve Teng, 2007; Triantafyllou ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2017). Bu alanda De Lorenzis ve Nanni (2001) yaptıkları deneysel çalışmada, betonarme T kesitli kirişlerde NSM (Near Surface Mounted) yöntemini kullanarak kesme kapasitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, kesme kapasitesi yetersiz olan 8 tane T kesitli kiriş numunesi üretilmiştir. Bunlardan 2 tanesi

kontrol kirişi olmak üzere, geriye kalan 6 tanesi NSM yöntemiyle güçlendirilmiştir. NSM güçlendirme uygulamasında nervürlü CFRP çubuk donatıları kullanılmıştır. Deneysel çalışmada CFRP çubuk aralığı, uygulama açısı, enine donatı ve ankraj durumu değişken parametre olarak incelenmiştir. Deney numuneleri 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlara göre, NSM yöntemi referans kiriş numunesine göre %106'ya kadar kesme kapasitesine katkı sağladığı ve kesme kapasitesini arttırılması için etkili bir güçlendirme metodu olduğu belirtilmiştir. Ankrajsız olarak uygulanan bir tane güçlendirilmiş kirişte sıyrılma olduğu gözlenmiştir. Bu sıyrılmanın önlenmesi için NSM çubuklarının 45º açıyla ve ankrajlı bir şekilde uygulanması tavsiye edilmiştir. Şekil 2.19'da yapılan deneylerin sonunda kirişlerde görülen hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 2.19. NSM yöntemi uygulanan kirişlerin deney sonu hasar modları (De Lorenzis ve Nanni, 2001)

Barros ve Dias (2006) çalışmasında, NSM yöntemi ile CFRP şerit sargılama yöntemini karşılaştırmak üzere deneysel çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda, betonarme kiriş numuneleri üretilerek, 4 grup halinde 4 noktalı eğilme yüklemesi altında test edilmiştir. Her grupta 5 tane kiriş numunesi olmak üzere, toplamda 20 tane kiriş numunesi için deneyler yapılmıştır. Deney gruplarında enine donatı bulundurma durumu, CFRP şerit sargılama, NSM yöntemi ile güçlendirme ve NSM ve CFRP güçlendirmelerinde uygulama açısı araştırılmıştır. Yapılan güçlendirme uygulamaları arasında kesme kapasitesi artışı açısından en etkili sonucu, 45º açıyla uygulanan NSM yöntemi göstermiştir. Deneysel çalışmada ele alınan referans kiriş numunesine göre, CFRP şerit sargılama yönteminde maksimum kesme kapasitesi artışı %54 iken, NSM yönteminde ise maksimum kesme kapasitesi artışı %83 olarak gözlemlenmiştir.

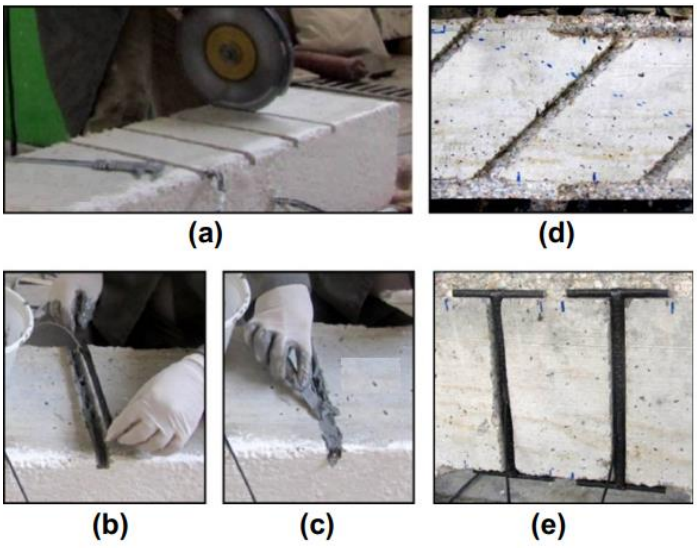
Dias ve Barros (2008) çalışmasında, kesme kapasitesi yetersiz olan T kesitli kirişlerde farklı oranlarda ve farklı açılarda CFRP laminatlar kullanılarak NSM (Near Surface Mounted) metodu uygulanmıştır. Bu kapsamda 3 farklı miktarda CFRP kullanılan her bir kiriş numunesi için NSM metodu 3 farklı açı (90º, 60º ve 45º) ile uygulanmıştır. Ayrıca, farklı etriye oranlarının da çalışıldığı deneysel çalışmada, 12 adet T kesitli betonarme kirişi 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 60º açıyla uygulanan NSM yönteminin %33 kapasite artışı ile en etkili konfigürasyon olduğu belirtilmiştir. Deney kirişlerinde kullanılan güçlendirme uygulamasının yük taşıma kapasitesine olan katkısı, kiriş eğilme kapasitesi tarafından sınırlandığı görülmüştür. Bu nedenle bazı kirişlerde, yapılan güçlendirme uygulaması ile birlikte eğilme davranışı sergilediği gözlenmiştir. Ayrıca, aynı araştırmacılar Dias ve Barros (2010) çalışmasında, NSM yöntemi ile dışarıda U şeklinde yapılan CFRP şerit uygulamasını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada yapılan sınırlı sayıdaki deney sonuçlarına göre, NSM yönteminin dışarıdan U şeklinde yapılan CFRP şerit uygulamasından daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Rizzo ve De Lorenzis (2009) yaptıkları deneysel çalışmada, NSM yönteminin kesme davranışına olan etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, 1 tanesi referans kiriş ve 8 tanesi güçlendirilmek üzere, 9 tane 200 mm × 210 mm × 2000 mm geometrik boyutlara sahip kiriş numuneleri üretilmiştir. Bu deney kirişlerinde, CFRP ile U biçiminde şerit sargılama, NSM yöntemiyle CFRP çubuklar kullanılarak yapılan güçlendirme, NSM yönteminde yüzeyin doldurulması için kullanılan epoksi tipi, NSM yönteminde kullanılan CFRP çubukların uygulama açısı ve NSM yönteminde kullanılan CFRP çubuk aralığı test edilmiştir. Deney kirişleri 4 noktalı eğilme yüklemesine maruz bırakılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, referans kiriş numunesine göre CFRP ile U biçiminde yapılan şerit sargılama uygulamasında %16 kesme kapasitesi artışı görülürken, NSM yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde %22 - %44 arasında kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Deney kirişlerinde bölgesel olarak çatlaklar oluştuğu için kullanılan CFRP çubuk açısı için karşılaştırma yapılamamıştır.

Rahal ve Rumaih (2011) çalışmasında, kiriş numunelerinde kullanılan NSM metodunu kullanarak kapsamlı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında NSM yönteminde kullanılan çubuk açısı (45º ve 90º), çubuk türü (CFRP ve çelik) ve ankraj durumu incelenmiştir. Deneysel çalışma için üretilen 4 tane T kesitli betonarme kirişten 1 tanesi kontrol kirişi olarak kullanılırken, diğer 3 tanesi NSM yöntemi ile farklı güçlendirme konfigürasyon ile güçlendirilmiştir. 3250 mm uzunluğa sahip kirişler için

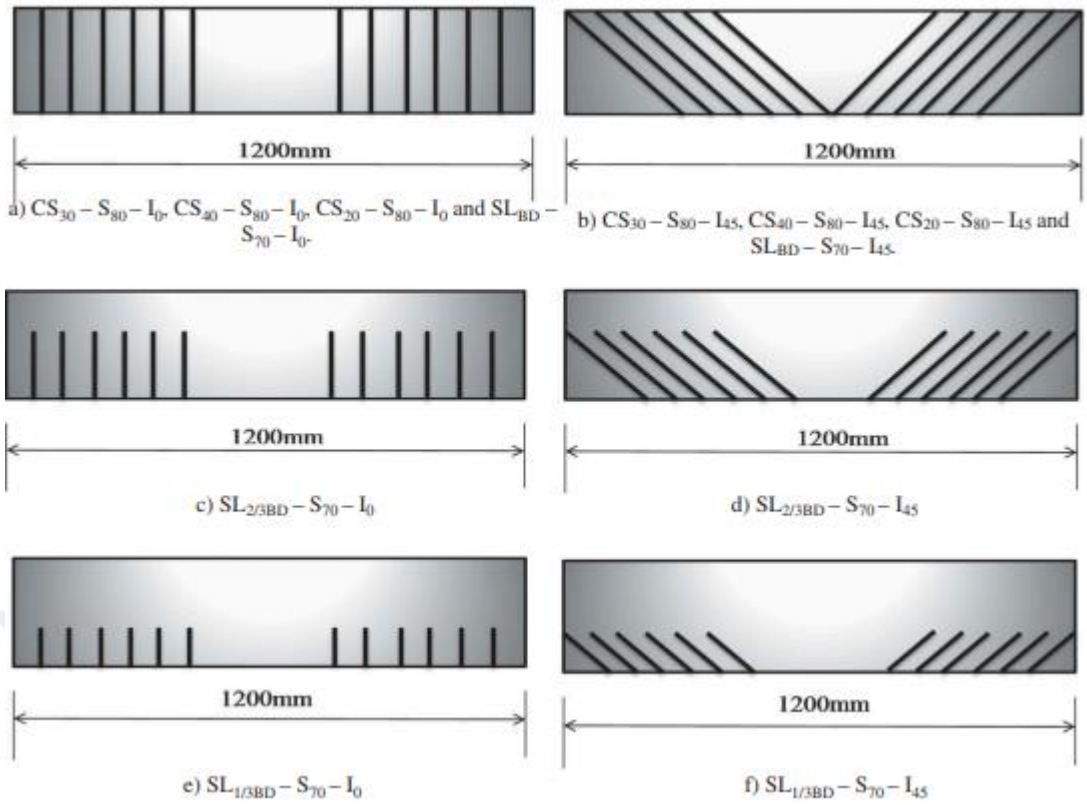
kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d), 3 seçilerek 4 noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Yapılan NSM güçlendirme uygulaması, kontrol kiriş numunesine kıyasla %37 - %92 aralığında kesme kapasitesi artışı sağlamıştır. Ayrıca, güçlendirme uygulamasının diyagonal çatlakları önleme ve sünekliliği arttırmada oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan ankraj uygulaması ve NSM çubuklarının 45º açıyla uygulanması, güçlendirme yönteminin etkinliğini arttırdığı gözlenmiştir. NSM çubuk türü olarak CFRP kullanılan numunelerin, çelik kullanılan numunelere göre %7 - %10 aralığında daha fazla kesme kapasitesi artışı sağladığı görülmüştür.

Jalali ve ark. (2012) çalışmasında, elle hazırlanan FRP (Fiber Takviyeli Polimer) çubukları kullanılarak NSM yönteminin etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca, çalışma kapsamında yenilikçi bir ankraj yöntemi denenmiştir. Bu kapsamda, 200 mm × 250 mm × 1650 mm boyutlarına sahip 6 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Deney kirişlerinden 1 tanesi referans olmak üzere, diğer 5 tanesi NSM yöntemiyle FRP çubuklar kullanılarak güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmada değişken parametre olarak ankraj olması, FRP çubukların uygulama açısı ve FRP çubukların aralığı incelenmiştir. Şekil 2.20'de NSM yönteminin uygulama aşamaları gösterilmiştir. Kirişler 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucunda güçlendirme yapılan kirişlerde referans numuneye göre %25 - %48 aralığında kesme kapasitesi artışı sağlanmıştır. Ayrıca kullanılan ankraj yönteminin kiriş sünekliliğine önemli katkı sağladığı görülmüştür.



Şekil 2.20. Ankrajlı NSM uygulama aşamaları (Jalali ve ark., 2012)

Al Rjoub ve ark. (2019), kirişlerde NSM yönteminin farklı konfigürasyonlarını test etmek amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, 150 mm × 200 mm × 1200 mm geometrik boyutlara sahip 14 adet betonarme kiriş numunesi, 4 noktalı eğilme düzeneğinde test edilmiştir. NSM yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde, NSM uygulama açısı (0º ve 45º), NSM çubuk uzunluğu (kiriş faydalı yüksekliğine bağlı olarak 1/1, 2/3 ve 1/3) ve NSM çubuklarının yüzeyinin kaplanması için kullanılan beton kalınlığı (20, 30 ve 40 mm) değişken parametre olarak dikkate alınmıştır. Şekil 2.21'de deneysel çalışmada ele alınan deney kirişlerine ait güçlendirme detayları verilmiştir. Kesme açısından yetersiz olarak tasarlanan kiriş numunelerinde NSM yöntemi uygulanırken CFRP çubuklar kullanılmıştır. NSM - CFRP çubuk aralığı, güçlendirme uygulanan tüm deney kirişlerinde 80 mm olarak seçilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen verilere göre, NSM - CFRP yönteminin kiriş kesme kapasitesini %176'ya kadar arttırdığı ve bazı kiriş numunelerinde kesme davranışını eğilme davranışına döndürdüğü gözlenmiştir. Yazarlar, NSM yüzeylerini kapatan örtünün kalınlığının kirişlerin yük kapasitesini değiştirmediği, fakat NSM çubuklarının yük altında mevcut konumlarından çıkmasını engellediğini belirtmişlerdir. Deney kirişlerinde kullanılan güçlendirme varyasyonlarına bakılmaksızın 45º açı ile yapılan NSM uygulaması, 0º açı ile yapılan NSM uygulamasına göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada değişken parametre olarak ele alınan NSM çubuk uzunluğunun artmasıyla kesme kapasitesinin arttığı görülmüştür.



Şekil 2.21. NSM yöntemi ile güçlendirilen kiriş numuneleri (Al Rjoub ve ark., 2019)

Al-Zu'bi ve ark. (2021) yaptıkları deneysel çalışmada, NSM (Near Surface Mounted) güçlendirme uygulamasının kiriş kesme kapasitesine olan katkısını araştırmışlardır. Bu kapsamda, kullanılan NSM - FRP çubuk uzunluğu ve açısı değişken parametre seçilerek 7 adet kiriş numunesi test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, yük taşıma kapasitesinde %8 - %41 ve süneklilikte %9 - %78 artış sağlanmıştır. Ayrıca, 45º ile yapılan NSM uygulaması, 90º ile yapılan NSM uygulamasına göre daha etkili olduğu doğrulanmıştır.

Hany ve ark. (2022) çalışmasında, kesme donatısı olmayan kiriş numunelerinde farklı güçlendirme tekniklerini kullanarak kesme davranışının iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Bu kapsamda, Cam Fiber Takviyeli Beton (GFRC) kullanılan 18 adet 120 mm × 300 mm × 2200 mm geometrik boyutlarına sahip deney kirişleri üretilmiştir. Şekil 2.22'de güçlendirme uygulamasına ait detay görüntüler gösterilmiştir. Deney numuneleri 4 noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Çalışmada değişken parametreler; beton içerisinde kullanılan cam fiber oranı (%0.0, %0.6 ve %1.2), boyuna donatı türü (çelik ve GFRP), güçlendirme konfigürasyonu (dıştan etriye ekleme, NSM (Near Surface Mounted) yöntemi ve ikisi birlikte), şerit uygulama aralığı ve uygulama açısı olarak dikkate alınmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonunda elde edilen verilere

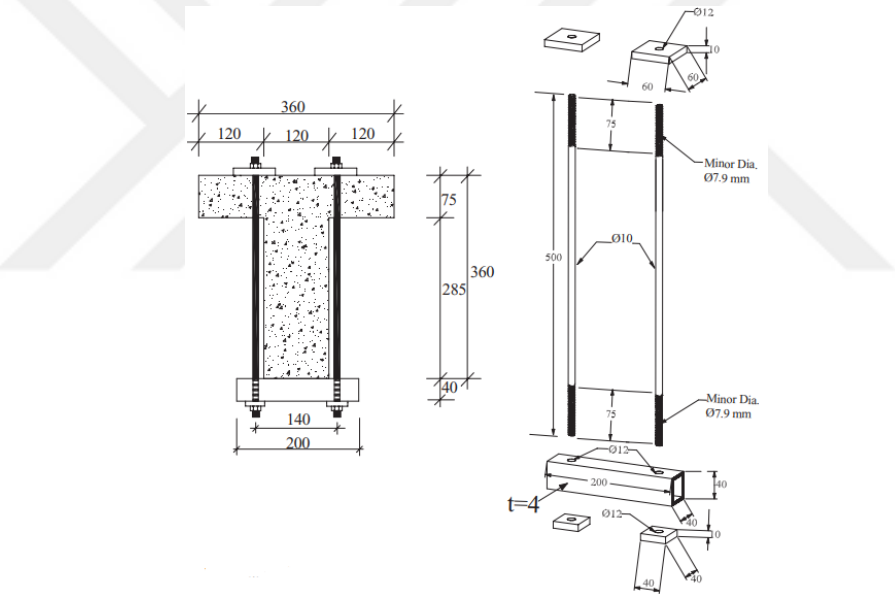
göre, %0.6 cam fiber oranı olan kirişlerde %18.5 ve %1.2 cam fiber oranı olan kirişlerde ise %28 kadar kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Yapılan güçlendirme uygulamalarında ise %28.4 - %120 aralığında kesme kapasitesi artışları görülmüştür. Güçlendirme uygulamasında kullanılan NSM yöntemi ile dıştan etriye ekleme yöntemleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Şekil 2.22. Güçlendirme uygulamaları (Hany ve ark., 2022)

Abdo ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, kiriş numunelerinde önceki çalışmalarda test edilen NSM yöntemini kullanarak GFRP çubuk ve çelik çubuk etkinliğini karşılaştırmış ve kesme kapasitesine olan katkıları açısından incelemişlerdir. Ayrıca, deney kirişlerinde boyuna donatı olarak GFRP donatısı ve çelik donatının da etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda, 6 tane referans ve 11 tane güçlendirilmiş kiriş numunesi 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Kirişlerin geometrik boyutları 120 mm × 280 mm × 1800 mm olarak seçilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, GFRP boyuna donatı kullanılan kirişler çelik boyuna donatı kullanılan kirişlere göre kesme kapasitesi daha düşük olduğu görülmüştür. NSM yönteminde kullanılan çubuk türü olarak GFRP ile çelik arasında kayda değer bir fark (%6.4) görülmemiştir.

2.1.5. Mekanik bağlantılar

Altin ve ark. (2003) yaptıkları deneysel çalışmada, enine donatı gibi davranış sergileyeceğini düşündükleri dıştan etriye ekleme yöntemini (Şekil 2.23) kullanarak T kesitli betonarme kiriş numunelerinin kesme kapasitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, kesme kapasitesi yetersiz olan 13 tane kiriş numunesinde farklı oranda enine donatısı oranı kullanılarak, 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney kirişleri, kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 4.5 ve 3.3 olmak üzere iki grupta incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, yapılan güçlendirme uygulaması sayesinde deney kirişlerinde, %20 - %30 aralığında kesme kapasitesi artışı gözlemlenmiştir. Güçlendirme uygulaması yapılan tüm deney kirişlerinde, (1 kiriş numunesinde kesme-eğilme göçmesi görülmüştür) eğilme göçmesi görülmüştür.



Şekil 2.23. Dıştan etriye ekleme yöntemine ait detaylar (Altin ve ark., 2003)

Barros ve Dalfré (2013) yaptıkları deneysel çalışmada, ETS (Embedded Through-Section, Kesit Boyunca Çubuk Gömme Yöntemi) yöntemi ile kiriş güçlendirmesi yaparak, bu yöntemin kesme kapasitesine olan katkısını araştırmışlardır. ETS güçlendirme uygulaması, kiriş kesiti boyunca deliklerin açılması, deliklerin basınçlı hava ile temizlenmesi, deliklerin yapıştırıcı malzeme ile doldurulması ve çubukların kiriş kesiti boyunca yerleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. ETS yöntemine ait uygulama adımları Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Çalışma kapsamında, ETS yönteminin etkinliğini incelemek için 14 tane kiriş numunesi 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Bu deney

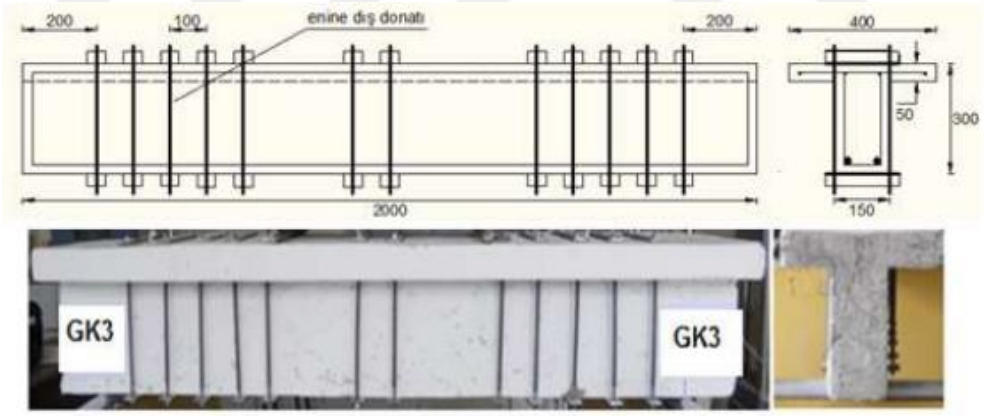
kirişlerinde 2 tanesi referans olmak üzere, geriye kalan 12 tane kiriş numunesinde ETS çubuk aralığı ve ETS çubuk açısının etkinliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen verilere göre, ETS yönteminde çubuk açısı 45º olarak kullanılmasının daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Deney kirişlerinde %14 - %51 aralığında kesme kapasitesi artışı görülmüştür.

Şekil 2.24. ETS yöntemi uygulama adımları (Barros ve Dalfré, 2013)

Breveglieri ve ark. (2014), ETS güçlendirme yönteminin T kesitli betonarme kirişlerdeki etkinliğini incelemek amacıyla bir dizi deney yapmışlardır. Bu deneysel çalışmada, ETS çubuk aralığı ve ETS çubuk açısı değişken parametre seçilerek, 2 seri olmak üzere toplamda 10 tane kiriş numunesi üretilerek 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney kirişlerinin birinci serisinde enine donatı kullanılmazken, ikinci serisinde 90 mm aralıklarla enine donatı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, ETS yöntemi enine donatı bulundurmayan deney kirişlerinde %39.5 - %136.3 ve enine donatı bulunduran deney kirişlerinde ise %30.4 - %108.5 aralığında kesme kapasitesi artışı sağladığı görülmüştür. Yapılan çatlak analizine göre, yükleme altında oluşan çatlaklar 39º - 45º aralığında meydana geldiğinden dolayı 45º açıyla ETS uygulaması yapılan kirişler, 90º açıyla ETS uygulaması yapılan kirişlere göre daha etkili olmuştur.

Ergün (2014) yaptığı tez çalışmasında kesme kapasitesi yetersiz betonarme T kesitli kirişlerin dış donatı eklenmesiyle güçlendirerek uygulamanın etkinliği araştırmıştır. Kesme kapasitesi yetersiz olarak üretilen kirişlerde, Ø6/400 mm aralıklarla enine donatı kullanırken, çekme bölgesinde 2Ø12 ve basınç bölgesinde ise 4Ø8 donatılar kullanılmıştır. Deney kirişlerinde 6 farklı güçlendirme konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu kapsamda, 3 tane referans kiriş ve 18 tane güçlendirilmiş kiriş olmak üzere, toplamda 21 tane kiriş numunesi dört noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Kirişlerde uzunluk 2000 mm, tabla yüksekliği 50 mm, alt genişlik 150 mm, tabla genişliği 400 mm ve

paspayı 25 mm olarak alınmıştır. Deneysel çalışmada, kullanılan dış donatı ekleme yönteminde eklenen dış donatı aralığı (100 mm ve 200 mm) ve kullanılan plaka kalınlığı (3 mm ve 6 mm) parametreleri incelenmiştir (Şekil 2.25). Ayrıca, 6 tane kiriş numunesinde eğilme bölgesine dıştan boyuna donatı (1Ø12 ve 2Ø12) eklenerek deney yapılmıştır. Şekil 3.25'te dıştan etriye ekleme yöntemiyle güçlendirilmiş T kesitli kiriş numunesi verilmiştir. Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar programı olan ABAQUS aracılığıyla doğrulanmıştır. Deneysel çalışma sonunda elde edilen verilere göre, kullanılan güçlendirme yönteminin referans kiriş numunesine göre akma yükünü %16, kirişin taşıdığı en büyük yükü %30 ve göçme yükünü ise %45'e kadar arttırdığı belirtilmiştir. Dış donatı ekleme uygulaması ile kirişlerin göçme deplasman miktarlarında, ortalama 4.13 kat ve süneklik oranında ise ortalama 3.83 kat artış sağlanmıştır. Ayrıca, boyuna donatı kullanılan kirişlerde ise akma yükünde %38, kirişin taşıdığı en büyük yükte %50 ve göçme yükünde ise %73'e kadar artış gözlenmiştir. Dış donatı ekleme ile birlikte boyuna donatının da eklendiği güçlendirme uygulaması ile kirişlerin göçme deplasman miktarlarında ve süneklik oranında ortalama 1.7 kat artış sağlanmıştır.



Şekil 2.25. T kesitli kiriş numunesinde dıştan etriye ekleme yöntemi (Ergün, 2014)

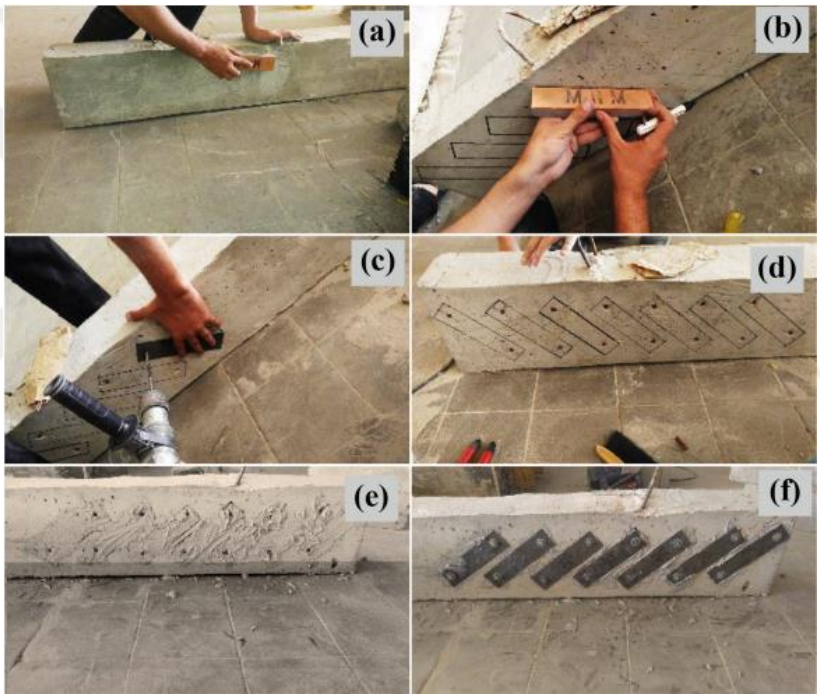
Demir ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numunelerini kullanarak dıştan etriye ekleme yöntemini test etmişlerdir. Çalışmada kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanan kiriş numunelerinin kesme ve eğilme kapasitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, 2 tanesi referans ve 5 tanesi dıştan etriye ekleme yöntemi ile güçlendirilmek üzere, toplamda 7 tane kiriş numunesi üretilmiştir. Güçlendirme uygulamasında dıştan etriye aralığı için farklı değerler seçilerek güçlendirme konfigürasyonları oluşturulmuştur. Ayrıca, güçlendirme yapılan 3 tane

deney kirişinde dışarıdan boyuna donatı takviyesi yapılmıştır. Tüm kirişler için 150 mm × 300 mm × 2000 mm geometrik boyutları kullanılmıştır. Deney kirişleri 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, tek başına dıştan etriye ekleme yöntemi kullanılan kirişlerde yük kapasitesi artış gözlenmezken, süneklilik açısından önemli düzeyde artış sağlamıştır. Referans kiriş numunesinde kesme hasarı görülürken, dıştan etriye yöntemi ile güçlendirildikten sonra test edilen kirişlerin eğilme hasarından göçtüğü görülmüştür. Dıştan etriye ekleme yöntemi ile birlikte boyuna donatı takviyesi yapılan deney kirişlerinde, süneklik açısından önemli miktarda artış görülmemesine rağmen yük taşıma kapasitesinde referans kiriş numunesine göre 2 kat artış görülmüştür.

Monicka ve John (2018) çalışmasında, dikdörtgen kesitli betonarme derin kirişlerde ETS yönteminin etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla, ETS çubuk aralığı (L/4 ve L/6 aralıklarla) ve ETS çubuk çapı (8 mm ve 12 mm) değişken parametre seçilerek deneysel çalışma yapılmıştır. 1 tanesi referans ve 6 tanesi ETS yöntemi ile güçlendirilmek üzere, toplamda 7 tane kiriş numunesi 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Tüm kirişler için 800 mm × 200 mm × 400 mm geometrik boyutları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada, referans kiriş numunesine göre güçlendirme yapılan kirişlerde %23,84 - %67,69 aralığında kapasite artışı sağlanmıştır. ETS çubuk çapı 8 mm'den 12 mm'ye artırıldığında %17,69'a kadar kesme kapasitesinde artış gözlenmiştir. ETS çubuk aralığı L/4'den L/6'ya çıkarıldığında %30.77 kadar kesme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Sonuç olarak, kullanılan ETS çubuk çapı arttıkça yük kapasitesi artmıştır ve kullanılan ETS çubuk aralığı azaldıkça da yük kapasitesi artmıştır.

Hadhood ve ark. (2019), kesme yönünden yetersiz olan kirişlerin CFRP levhaları ile güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan bu deneysel çalışmada, CFRP levhalarının mekanik elemanlar yardımıyla ankrajının yapılmasını incelemişlerdir. Bu doğrultuda, CFRP şerit uzunluğu, sayısı, aralığı, mekanik bağlantı elemanlarının çapı, sayısı ve mekanik bağlantıların kullanımı olan parametreler üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, 150 mm × 250 mm × 2400 mm boyutlarına sahip 8 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Bu kirişlerden bir tanesi referans kirişi, diğer bir tanesi mekanik bağlantı olmaksızın CFRP levhası ile güçlendirilmiştir. Geriye kalan 6 kiriş numunesi, A grubu 6 mm çapında 3 tane numune B grubu ise 4mm çapında 3 tane numune olarak iki gruba ayrılmıştır. Bu iki gruptaki 3 tane kiriş kendi arasında farklı sayıda mekanik bağlantılar içermektedir. Mekanik bağlantıların sayısı kullanılan CFRP şerit uzunluğunun değişmesine bağlı olarak 2,3 ve 4 adet olarak değiştirilmiştir. Şekil 2.26'da

CFRP şerit levhalar ile yapılan güçlendirme yönteminin uygulama aşamaları gösterilmiştir. Kiriş numuneleri a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı 2.5 alınarak üç noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonunda elde edilen sonuçlara göre, CFRP levhası ile birlikte mekanik bağlantıların kullanıldığı güçlendirme referans kirişe göre %65' e kadar yük kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında, güçlendirmede mekanik bağlantıların yeterli sayıda kullanılması koşuluyla kesme çatlaklarının yayılmasını, CFRP levhasının ayrılmasını engellediği ve mekanik referans kirişe göre çatlak genişliklerini %44'e kadar azalttığı görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada yük kapasiteleri için Kuzey Amerika yönetmeliklerine göre analitik hesaplar yapılarak deneysel veriler ile yakınlığı ortaya konmuştur.



Şekil 2.26. CFRP levhalar ile kiriş dışından yapılan güçlendirme aşamaları (Hadhood ve ark., 2019)

Bhat (2022), yaptığı çalışmada kirişlerin dışarıdan CFS (Cold-Formed Steel) ve donatı ile sarılarak geliştirilen güçlendirme yönteminin etkinliğini araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, 150 mm × 200 mm × 1600 mm boyutlarındaki kesme yönünden yetersiz olarak tasarlanan kiriş numuneleri, önce dıştan CFS ile güçlendirilmiş ve daha sonra farklı bağlanma tipleri kullanılarak donatı ile kirişler sarılmıştır. Kirişleri saran 6mm çapındaki donatılar, 30°,45° ve 60° olmak üzere 3 farklı açı tasarımı yapılarak uygulanmıştır. Şekil 2.27'de güçlendirme uygulaması gösterilmiştir. Yapılan güçlendirmeler sonunda, dört noktalı yükleme yapılarak yük ve deplasman değerleri kayıt

altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, tüm güçlendirilmiş numunelerin göçme modlarında yük kapasitesi ve yük-deplasman açısından sergiledikleri davranışlar önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. Yapılan deneylerde, 60° olarak uygulanan donatı sargılama yönteminin, 30° ve 45°'ye göre daha iyi davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Sargılamada 60° olarak yapılan uygulama ile kesme yönünden yetersiz olan kiriş numunesi, güçlendirme yapıldıktan sonra sünek davranış sergilemiş ve ayrıca referans numuneye göre %105.92 kadar yük artışını sağlamıştır. Ayrıca, deney sonunda yapılan incelemelere göre, 60° olarak yapılan güçlendirme uygulamasında dayanım-ağırlık oranı güçlendirme yapılmayan numuneye göre %87.2 kadar arttığı tespit edilmiştir. Bu oran artışı, güçlendirmede kullanılan malzemelerin avantajlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.27. (Bhat, 2022) çalışmasında uygulanan güçlendirme uygulaması

Rashid ve ark. (2022) yaptıkları deneysel çalışmada, eğilme yönünden yetersiz olan 150 mm × 200 mm × 1600 mm boyutlarına sahip kirişlerin köşe kısımları farklı ankraj tipleri kullanılarak CFS ile güçlendirilmiş ve yapılan güçlendirme uygulamalarının kiriş davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan güçlendirme uygulaması Şekil 2.28'de sunulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan 4 adet kirişten bir tanesi referans kiriş olarak 3 tanesi ise CFS ile güçlendirilmiş ve a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı 2.77 olacak şekilde deney düzeneği kurularak dört noktalı eğilme yüklemesi yapılmıştır. Güçlendirilen kirişlerde ankraj tipi olarak vida, epoksi ve vida ile epoksinin birlikte kullanımı şeklinde olmuştur. Yapılan deneyler sonunda, CFS güçlendirme yönteminin referans numuneye göre eğilme kapasitesinde iyileştirme sağladığı görülmüştür. Ayrıca, yapılan alternatif ankraj tipi olarak vida ve epoksinin birlikte kullanıldığı güçlendirmede maksimum iyileşmenin olduğu tespit edilmiştir. Bununla

birlikte, sadece epoksi kullanımında meydana gelen ayrılmayı, vida ve epoksi birlikte kullanıldığında engellendiği görülmüştür. Deneysel verilerde, referans kirişe göre vida ve epoksinin birlikte kullanıldığı güçlendirmenin %91.7 kadar, sadece vidanın kullanıldığı güçlendirmenin ise %66 kadar yük kapasitesinde artış sağladığı görülmüştür. Dahası, yapılan incelemeler sonunda güçlendirme yapılan kirişlerde kuvvet-ağırlık oranlarının referans kirişe göre oldukça yüksek olması, güçlendirmenin iyi performans gösterdiğini belirtmektedir.

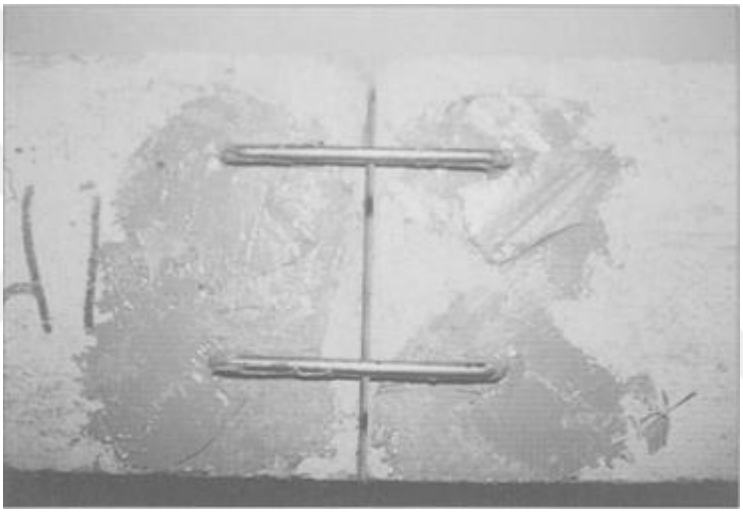
Şekil 2.28. Kiriş numunesinde CFS levhalar ile yapılan güçlendirme uygulaması (Rashid ve ark., 2022)

2.1.6. Mekanik çelik dikiş yöntemi (MÇD)

Bu bölümde, literatür açısından oldukça yeni bir güçlendirme yöntemi olan MÇD'nin (Mekanik Çelik Dikiş) tarihsel gelişimi kısaca anlatılmıştır. Johnson (1965) çalışmasında, betonarme yapı elemanlarında görülen çatlak tiplerine göre çatlak onarım teknikleri önermiştir. Bu çalışmada, ilk kez betonarme yapı elemanlarında görülen çatlakların onarılmasında dikiş mantığında bir onarım tekniğinin kullanılabileceği öne sürülmüştür. Yapılan bu onarım tekniği sayesinde, betonarme yapı elemanlarında oluşan çatlaklardaki gerilmeleri dikişler aracılığıyla daha geniş yüzeylere dağıtıldığı belirtilmiştir. Bu çalışma deneysel bir çalışma olmamakla birlikte, çatlak türüne bağlı olarak uygulanması gereken onarım teknikleri ile ilgili rehber niteliği taşımaktadır.

Hamoush ve Ahmad (1997), ilk kez dikiş mantığında bir *onarım tekniği* kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, 150 mm × 150 mm × 600 mm geometrik boyutlarına sahip 3 tane donatısız kiriş numunesi 3 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Bu kirişlerden 1 tanesi referans, 1 tanesine 50 mm derinlikte kiriş

orta bölgesinde dikey çentik açılmış ve diğer kiriş numunesine ise 75 mm derinlikte kiriş orta bölgesinde dikey çentik açılmıştır. Bu kiriş numunelerinde, çentikler kesit boyunca açıldıktan sonra demir dikişler ile onarılmıştır. Şekil 2.29'da demir dikişler ile onarım yapılan deney kirişi verilmiştir. Yapılan sınırlı deney sonuçlarına göre, 50 mm ve 75 mm çentik açılan kirişler, demir dikişler ile güçlendirildikten sonra referans kiriş numunesi ile yakın yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Deneysel çalışmayı desteklemek amacıyla, 50 mm, 75 mm ve 100 mm çentikler için yapılan analitik çalışmada elde edilen veriler, deneysel veriler ile yakın sonuçlar vermiştir. Bu deneysel çalışma, genel anlamda çatlakların onarılması amacıyla kullanılan dikiş yönteminin etkinliğini belirlemek için yapılan analitik bir yöntemi sunmaktadır.



Şekil 2.29. Kirişteki çentiklerin demir dikişler ile onarılması (Hamoush ve Ahmad, 1997)

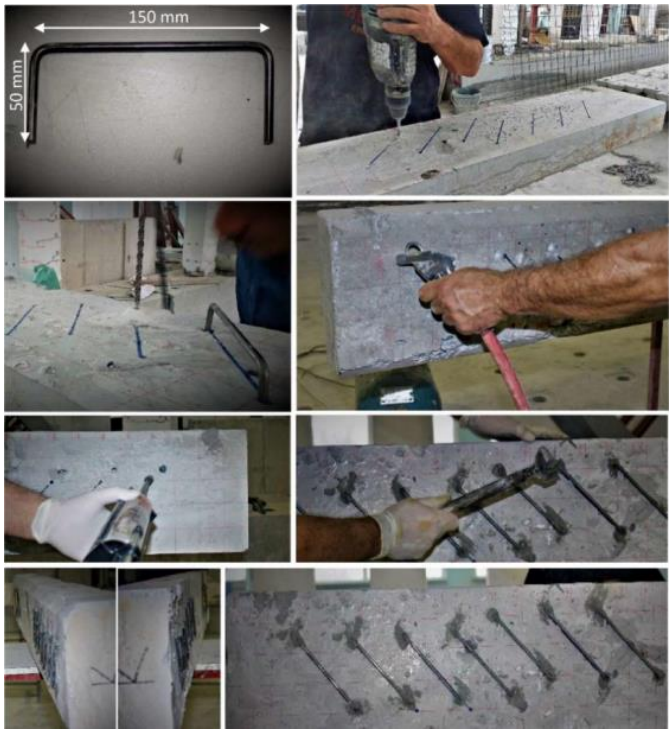
Alshlash ve ark. (2019) yaptıkları çalışma ile ilk kez ön hasarlı kesme ve eğilme kirişleri üzerinde yeni bir yöntem olan "dikiş demirleri" veya "çatlak kilit sistemleri" üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Bu doğrultuda, kesme yönünden yetersiz ve belirli oranlarda hasar verilmiş kirişler üzerinde oluşan çatlakları dik bir şekilde karşılayacak dikiş demirlerinin yerleşimi için bir grup deney numunesi hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada, bir tanesi referans numune olmak üzere farklı hasar seviyelerinde güçlendirilen 3 tane kiriş numunesi ile birlikte toplamda 4 tane deney numunesi üretilmiştir. ½ olarak ölçeklendirilmiş 125 mm × 250 mm × 2500 mm boyutlarındaki kiriş numunelerinde, kesme hasarının oluşabilmesi için etriyeler Ø5/350 mm aralıklarla atılmıştır. Boyuna donatı oranı, 0.0117 olarak kullanılmış ve deneylerde kesme kırılmalarını gözlemleyebilmek için kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a_v/d) oranı, 3.11

olarak dikkate alınmıştır. Dört noktalı yükleme deneyinde referans kiriş yük kapasitesini aşana kadar yüklemeye tabi tutulmuştur. Diğer 3 tane kiriş numunesi ise sırasıyla referans kirişin yük kapasitesinin %50, %65 ve % 85 seviyelerine kadar yüklemeye maruz bırakılarak kirişlerde ön hasarlar oluşması sağlanmıştır. Ön hasar verilen kirişlerde meydana gelen çatlakları engelleyecek bir şekilde dikiş demirleri yerleştirilmiştir. Literatürde yeni bir teknik olan bu uygulamada, öncelikli olarak dikiş demirlerinin yerleşmesi gereken delikler matkap yardımıyla açıldıktan sonra delik içerisindeki istenmeyen toz veya benzeri parçacıklar basınçlı hava ile uzaklaştırmaktadır. U biçiminde, kancaları 90° açıyla bükülen dikiş demirleri deliklere epoksi sıkıldıktan sonra yerleştirilmektedir. Bu uygulamada 3 kiriş için hasar seviyesinin artmasıyla birlikte kullanılması gereken dikiş demiri sayısı artmıştır. Şekil 2.30'da ön hasarlı kirişler için yapılan güçlendirme uygulaması sonrasında göçme durumları verilmiştir. Bu deneylerin sonucunda, %50, %65 ve %85 ön hasarlı kesme kirişlerinin, literatürde yeni bir teknik olan dikiş demirleri ile güçlendirilmesi sonucunda referans kiriş numunesine kıyasla taşıdıkları yük kapasitelerinde sırasıyla %17, %43 ve %50 oranında artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu güçlendirme yönteminin %85 ön hasarlı kirişte kesme davranışını sünek bir davranış olan eğilmeye çevirmesi ve bununla birlikte pratik, uygulanabilir ve diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha ekonomik olması alternatif bir güçlendirme olabileceğini göstermektedir.

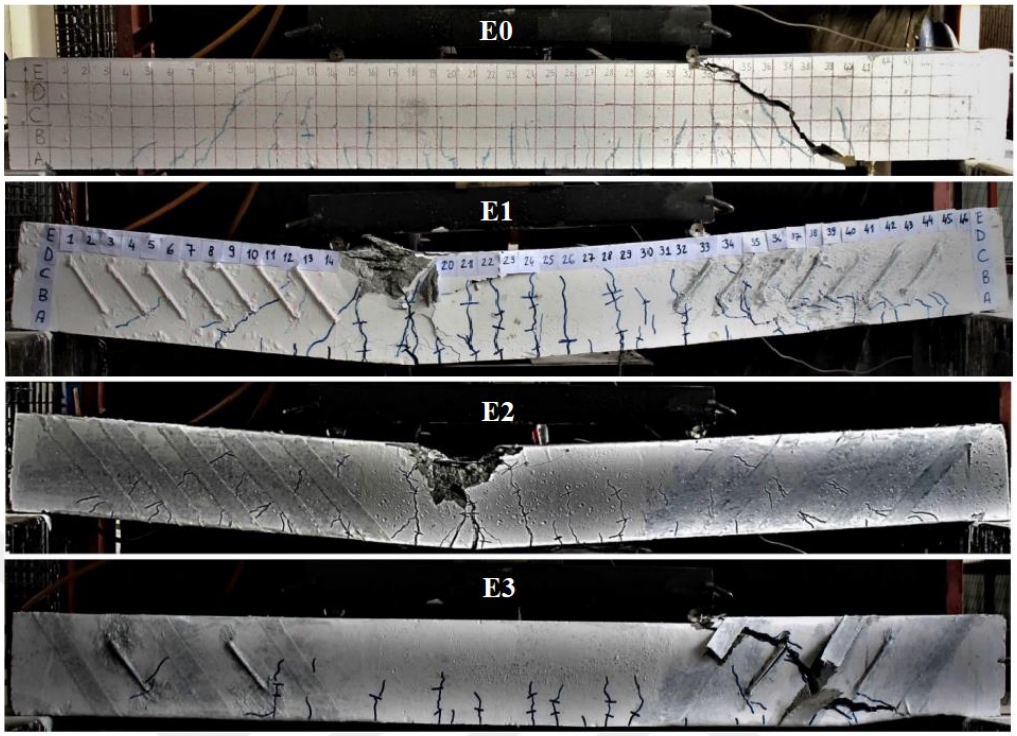
Şekil 2.30. Ön hasarlı kirişlerin dikiş demirleri ile güçlendirilmesi (Alshlash ve ark., 2019)

Alshlash ve ark. (2019) çalışmasından sonra Aksoylu (2021) çalışmasıyla MÇD (Mekanik Çelik Dikiş) yönteminin yaygınlaşması için önemli bir adım atmıştır. Özellikle ön hasarsız kesme kirişlerinin MÇD ile güçlendirilebileceğini belirttiği çalışması literatür açısından ilktir. Yaptığı deneysel çalışma ile ön hasarsız kesme kapasitesi düşük kirişlerin MÇD ile güçlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bu sayede, literatüre diğer güçlendirme yöntemlerine alternatif olabilecek yenilikçi, pratik ve ekonomik bir güçlendirme yöntemini kazandırmıştır. Çalışmada, ön hasarsız ve kesme yönünden yetersiz olan kiriş numunelerine, MÇD olarak adlandırdığı güçlendirme yöntemini uygulamıştır. Belirtilen güçlendirme uygulamasında, MÇD'lerin kiriş davranışına olan etkisini araştırmak üzere bir grup deneyler yapmıştır. Bu çalışma için ½ ölçekli 125 mm × 250 mm × 2500 mm boyutlarında 4 adet kiriş numunelerinde denge altı sünek davranışa uygun olacak şekilde çekme bölgesine 3Ø12 ($\rho = 0.0117$) ve basınç bölgesine ise 2Ø8 ($\rho = 0.00347$) çapında B420c tipi nervürlü donatı kullanılmıştır. Kiriş numuneleri TBDY-2019'a uygun olarak üretilmiş ve yönetmelikte belirtilen minimum donatı oranından daha fazla donatı kullanılmıştır. C35 beton sınıfı kullanılan kirişlerde etriyeler 5 mm çapında ve 350 mm aralıkla atılmıştır. Etriye kancaları mevcut binalarda yaygın olarak görülen ve yönetmelik açısından istenmeyen ve elverişsiz duruma karşılık gelen 90° olarak uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, MÇD etkinliğini araştırmak için referans olarak belirlenen kirişin deneyi yapıldıktan sonra kirişte oluşan çatlaklar detaylı olarak incelenmiş ve bu çatlakları engellemek amacıyla çatlakları dik bir açıyla karşılayacak şekilde sistematik MÇD yerleşimleri tasarlanmıştır. Şekil 2.31'de MÇD güçlendirme yönteminin uygulama adımları sunulmuştur. Çalışma kapsamında üretilen kirişlerden bir tanesi referans olmak üzere, geriye kalan kiriş numuneleri üzerine üç farklı güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. Kesme kapasitesi yetersiz olan betonarme kirişlerde, sırasıyla MÇD, GFRP ve bu iki malzeme hibrit olarak uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, güçlendirme amaçlı kullanılan lifli polimerler arasında en ekonomik olan GFRP ile araştırmacının alternatif olarak sunduğu yeni bir teknik olan MÇD'lerin, performans/maliyet açısından karşılaştırılmasının yapılmasıdır. Hasarsız kirişlerin MÇD ile güçlendirilmesi ve MÇD ile GFRP elemanlarının hibrit olarak kullanımı literatürde ilk çalışma olması bakımından önemlidir. Yapılan çalışmada kontrol kiriş numunesi (E0), GFRP şerit sargı ile güçlendirilen kiriş numunesi (E1) ve GFRP ile MÇD'nin birlikte kullanıldığı hibrit olarak güçlendirilen kiriş numunesi (E3) 10 kN yük artışlarıyla dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney esnasında elde edilen yük-deplasman verileri kayıt altına alınmış ve deney sonrasında her bir kiriş numunesi için nihai yük

kapasitesi, rijitlik, süneklik ve enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada, kesme yönünden yetersiz olarak tasarlanan referans numunede beklenildiği gibi kesme hasarından göçmüştür. E1 ve E2 kiriş numunelerinde yapılan güçlendirme sayesinde, kiriş davranışı kesme kırılmasından eğilme kırılmasına dönmüştür. Şekil 2.32'de güçlendirme yapılan kirişlerin deney sonu göçme durumları verilmiştir. Güçlendirme uygulanan E1 ve E2 numunelerinde E0'a (referans kiriş) göre yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %16.8-%18.1 kadar artış olduğu görülmüştür. E3 kiriş numunesinde yük taşıma kapasitesinin %19.2 kadar artış göstermesine rağmen, E1 ve E2 numunelerinde görülen eğilme davranışının aksine gevrek bir şekilde kesme kırılması gözlemlenmiştir. Böylece elde edilen sonuçlar, GFRP ve MÇD elemanlarının ayrı ayrı bir şekilde kullanılması hem yük kapasitesini arttırmış hem de sünekliğe (sırasıyla süneklik katsayısı 6.03 ve 5.02) önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Bu durum, GFRP ve MÇD uygulamalarının güçlendirme alanı için güçlü alternatifler olduğunu göstermiştir. Diğer güçlendirme yöntemlerine kıyasla maliyet açısından oldukça uygun olan MÇD uygulamasının, ileriki çalışmalarda kesme yönünden yetersiz olan kirişlerde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmalar sonunda kesme açısından yetersiz olan kirişlerin güçlendirmesinde en iyi güçlendirme uygulamasının performans/maliyet açısından E1 (MÇD) > E2 (GFRP) > E3 (MÇD+GFRP) şeklinde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.31. MÇD güçlendirme yönteminin uygulama aşamaları (Aksoylu, 2021)



Şekil 2.32. Deney kirişlerinin deney sonrası göçme durumları (Aksoylu, 2021)

Aksoylu ve ark. (2022)'de yaptıkları çalışma ile TÜBİTAK 3501 (122M091 no'lu proje) projesi ile Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) üzerine literatürdeki en kapsamlı çalışmalara başlamıştır. Daha önce MÇD'lerin çatlakları dik kesecek şekilde 45° uygulaması araştırılmış ve etkili olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada ise MÇD güçlendirme yönteminde 90º açılı MÇD yerleşimi etriye mantığında düşünülerek kirişlere uygulanmıştır. Bu deneysel çalışmada MÇD çapı (Ø6), MÇD ankraj derinliği (60 mm), MÇD uzunluğu (150 mm) ve MÇD açısı (90º) sabit tutulmuştur. Şekil 2.33'te 90º açılı MÇD uygulamasının aşamaları verilmiştir. Çalışmada değişken parametre olarak ele alınan MÇD aralığı için %0.2 - %1 aralığında farklı MÇD oranları kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamasının kiriş kesme kapasitesine olan katkısı araştırılmıştır. Bu kapsamda, 1 tanesi referans kiriş numunesi ve 5 tanesi farklı MÇD aralıklarıyla güçlendirilmek üzere toplamda 6 tane ½ geometrik ölçekli 125 mm × 250 mm × 2500 mm boyutlara sahip kiriş numuneleri üretilmiştir. Deney kirişlerinde çekme donatısı olarak 3Ø12 ve basınç donatısı olarak 2Ø8 donatıları kullanılmıştır. Kesme açısından yetersiz olması için Ø5/350 mm aralıklarla etriyeler kullanılmıştır. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 3.11 olarak seçilen deneysel çalışmada, kiriş numuneleri 4 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma

sonuçlarına göre, MÇD güçlendirme uygulaması yapılan deney kirişlerinde %2 - % 31 aralığında kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. En büyük artış, MÇD aralığı en sık (MÇD oranı %1) olan kiriş numunesinde görülmüştür. Ancak, bu kiriş numunesinde MÇD aralığının sık olmasından dolayı çok sık aralıklarla delikler açıldığı için %43 oranında rijitlikte azalma meydana gelmiştir. Sonuç olarak, MÇD'lerin sık aralıklı kullanımı tavsiye edilmiş ancak MÇD'lerin etriye mantığında uygulanmasının eksiklikleri beraberinde getirdiği ve kirişlerin kesme hasarına uğradığı belirtilerek, 45° açılı MÇD'lerin önemi vurgulanmıştır.

Şekil 2.33. 90º açılı MÇD uygulaması (Aksoylu ve ark., 2022)

Bunun üzerine Uysal ve ark. (2022), yenilikçi bir güçlendirme yöntemi olan Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) uygulamasını kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada, 45º ve 90º açılı MÇD yerleşimi kullanılarak MÇD uygulama açısının kiriş kesme davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ½ geometrik ölçekli olan 3 adet ön hasarsız betonarme kiriş, dört noktalı yükleme düzeneğinde test edilmiştir. Bu kirişlerden biri referans kirişi olarak belirlenmiş olup, diğer iki kirişten birine 45º açılı MÇD'ler,

diğerine ise 90º açılı MÇD'ler 45 mm (*d*/5) aralıklarla uygulanarak güçlendirilmiştir. Geometrik boyutları 125 mm × 250 mm × 2500 mm olarak seçilen deney kirişlerinde, mevcut yapı stoğunu temsil etmesi amacıyla 16,65 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılmıştır. Kirişlerde yapılan güçlendirme yönteminin kesme dayanımına katkısını gözlemleyebilmek amacıyla kiriş eğilme donatısı (3Ø16) olabildiğince yüksek ve kesme kapasitesi düşük (Bu amaçla Ø6/350 mm aralıklarla etriye atılmıştır) olarak tasarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, referans kiriş numunesine göre 45º açı ile güçlendirilen kirişte (S-45) %53.74 ve 90º açı ile güçlendirilen kirişte (S-90) ise %14.76 kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Bu durum, Aksoylu ve ark. (2022)'deki önerileri doğrulamış olup MÇD'lerin 45° açı ile uygulanmasının daha etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Ayrıca, toplam enerji tüketme kapasiteleri karşılaştırıldığında, referans numuneye göre 45º açı ile güçlendirilen kirişte %261,6 artış ve 90º açı ile güçlendirilen kirişte ise %93,73 artış görülmüştür. Elde edilen verilere göre, MÇD ile güçlendirme uygulamasında MÇD'lerin 45º açı ile uygulanmasının daha etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde henüz yer almayan ve patent olarak tescillenmiş (Erkan ve ark., 2022) olan bu güçlendirme yönteminin geliştirilmesi için optimum MÇD sayısının araştırılmasına yönelik yapılacak çalışmaların önemli olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla, bu tez çalışması bu problemi çözmek için gerçekleştirilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin yenilikçi güçlendirme yöntemi olan Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) ile güçlendirmesinde optimum MÇD aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma için üretilen betonarme kirişlerde, beton basınç dayanımı, etriye aralığı, boyuna donatılar, kiriş geometrisi, yükleme tipi (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) ve güçlendirme parametreleri (MÇD uygulama açısı, ankraj derinliği, MÇD çapı, MÇD çelik türü ve MÇD uzunluğu) sabit tutularak, sadece güçlendirme uygulamasında kullanılan MÇD aralığı değiştirilmiştir. Bu kapsamda, değişen MÇD aralığına bağlı olarak kiriş kesme dayanımının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, 1 tanesi referans kiriş ve 7 tanesi farklı MÇD aralıkları ile güçlendirilmek üzere, toplam 8 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bu çalışmada üretilen betonarme kirişler için yapılan kabuller aşağıda sunulmuştur:

1. Beton basınç dayanımı: TBDY-2019 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında yapılacak betonarme binalarda, en düşük beton basınç dayanımı olarak C25 (karakteristik beton basınç dayanımı 25 MPa) beton sınıfının kullanılmasına izin verilmektedir. Fakat bu çalışmada, kesme açısından güçlendirilme ihtiyacı duyulan mevcut yapı stoğunu (Kaplan ve ark., 2004; Öcal ve İnce, 2012; Ozturk ve ark., 2023) temsil etmesi istendiğinden dolayı beton basınç dayanımı 16,65 MPa (C15-20 aralığı) olan beton kullanılmıştır.
2. Enine donatı (etriye): Çalışma kapsamında MÇD ile güçlendirme uygulaması kullanılarak kesme dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Bu nedenle, kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin imal edilmesi için kiriş numuneleri donatılırken Ø6/350 mm aralıklarla nervürlü B420c tipi donatı özelliğine sahip etriyeler kullanılmıştır. Etriye aralıkları tüm deney kirişlerinde sabit tutulmuştur. Ayrıca, tüm deney kirişlerinde etriye kancaları, mevcut yapılarda sıkça görülen ve güncel yönetmeliklere (TBDY-2019) aykırı olarak 90º açıyla uygulanmıştır (TBDY-2019'a göre etriye uçlarının 135º açıyla kıvrılarak beton içerisinde gömülmesi gerekmektedir).
3. Boyuna donatı: Deney kirişlerinde kullanılan MÇD uygulamasının kiriş kesme dayanımına olan katkısını gözlemleyebilmek için kesme kapasitesinin düşük olmasının yanı sıra eğilme kapasitesinin de olabildiğince yüksek seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kiriş alt bölgesinde 3Ø16 ($\rho = 0.0224$) çekme donatısı ve kiriş üst bölgesinde 2Ø12 ($\rho = 0.0084$) basınç donatısı kullanılmıştır. Deney

numunelerinde kullanılan boyuna donatı oranı farkı (ρ-ρ' = 0.014) dengeli donatı oranına (ρ-ρ'<ρ_b = 0.0138) yaklaşık eşit olup minimum donatı (ρ_{min} = 0.004) oranından daha büyüktür. Donatı tipi olarak mevcut yapı stoğunda sıkça görülen düz donatıların artık piyasada tedarik edilememesinden dolayı nervürlü B420c tipi donatı kullanılmıştır. Bu durum istenildiği gibi eğilme dayanımını yüksek düzeyde ve kesme dayanımını düşük seviyede tutarak kullanılan MÇD güçlendirmesinin kesme dayanımına katkısının net olarak görülmesini sağlamıştır.

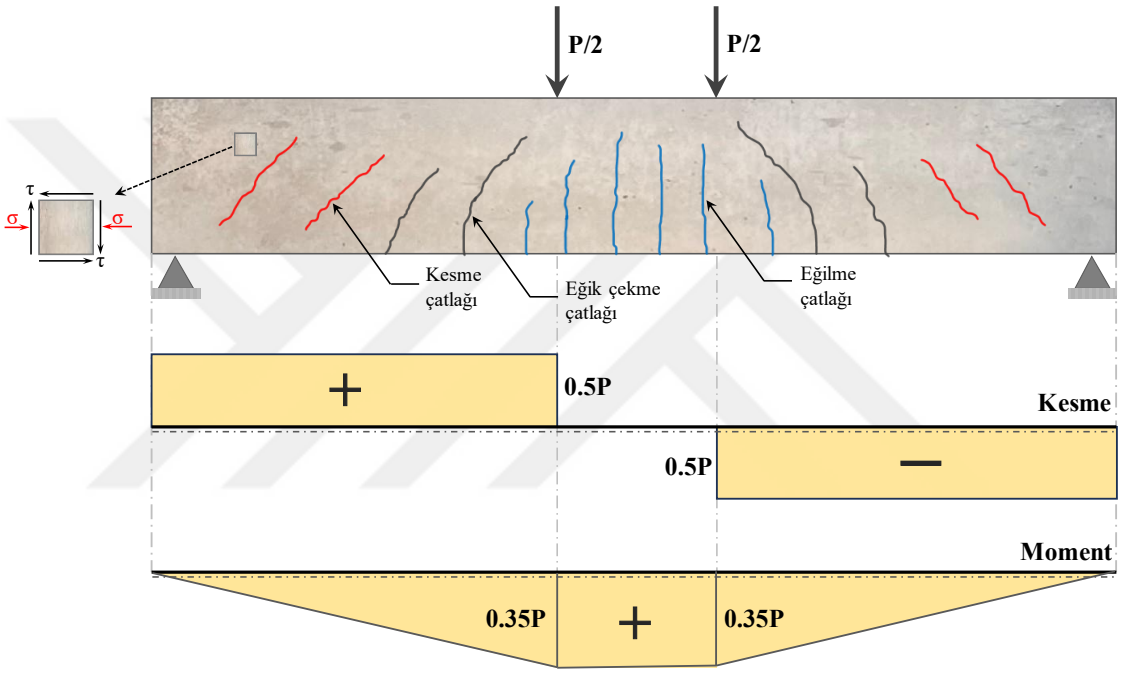
4. Boyutlar: Kirişler, 1/2 geometrik ölçekli olarak tasarlanmış olup 125 × 250 × 2500 mm boyutlarına sahiptir. Kiriş boyutları belirlenirken mevcut laboratuvar koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Bu deneysel çalışmada, MÇD güçlendirme uygulamasının kiriş kesme kapasitesine olan katkısı incelendiğinden dolayı deney kirişleri kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanmıştır. Bu yüzden tüm deney kirişlerinde MÇD uygulamasının kiriş kesme kapasitesini arttırdığı fakat kirişlerin eğilme kapasitesi çok yüksek olduğundan dolayı deney sonunda yine de kesmeden göçmesi beklenmektedir. Deneysel çalışmaya geçmeden önce, deney kirişlerinde meydana gelebilecek olası kesme hasarı modları açıklanmıştır.

3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Hasarı Davranışı

Betonarme kiriş elemanlarının, genel olarak eğilme kuvvetlerini taşımasının yanı sıra kesme kuvvetlerini de güvenli bir şekilde taşıması gerekmektedir. Kesme hasarları ani ve gevrek bir şekilde meydana gelmektedir. Bu nedenle, betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının tasarım aşamasında, kesme dayanımının aşılması sonucu meydana gelen hasar türüne karşı ayrıca önlemler alınması gerekmektedir. 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). Betonun kesme dayanımın çok büyük olmasından dolayı betonarme kirişlerde direkt olarak kesme kırılmasının oluşması beklenen bir durum değildir. Ancak, yükleme altında oluşan kesme ve normal gerilmeler, asal çekme gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu asal çekme gerilmeleri, beton çekme

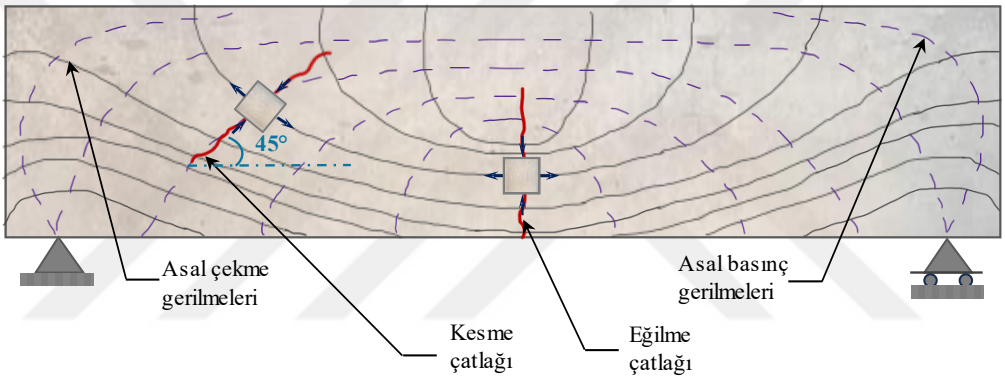
dayanımının çok küçük olmasından dolayı (beton çekme dayanımı basınç dayanımından yaklaşık 10 kat daha küçüktür) ani ve gevrek olan kesme kırılmalarına yol açmaktadır. Yani literatürde kesme kırılması ya da kesme sorunu olarak tanımlanan durum aslında asal çekme kırılması ya da asal çekme gerilmeleri sorunudur (Ersoy ve ark., 2019). Şekil 3.1'de 4 noktalı yükleme altındaki bir kirişin kesme ve moment dağılımı ve meydana gelebilecek olası çatlak türleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, tekil yük ile mesnetler arasında kesme kuvveti ve eğilme momenti birlikte meydana gelirken, iki tekil yük arasında sadece eğilme momenti oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Kirişlerde görülen çatlakların şematik görünümü

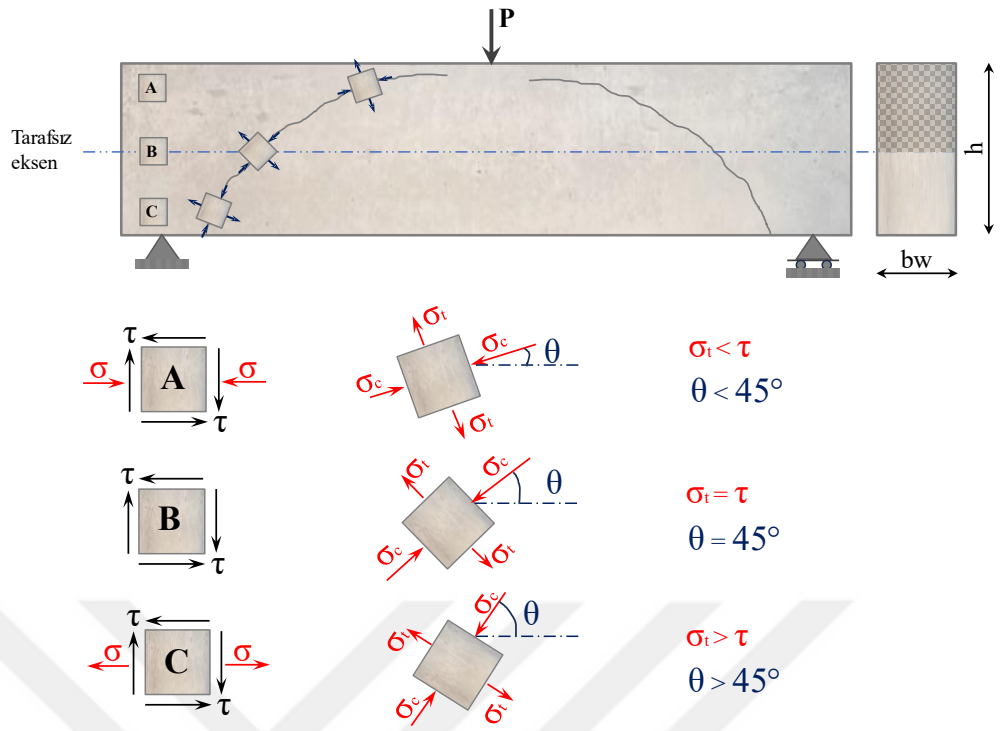
Kesme gerilmesinden dolayı kirişlerde oluşan asal çekme gerilmeleri, kesme gerilmesinin etkidiği yüzey ile 45º açı yapacak şekilde aktarılmaktadır (Vecchio, 2000; Naughton ve Sheplak, 2002). Bu gerilme aktarımı sonucu olarak beton çekme dayanımı aşıldığında asal çekme gerilmelerine dik olacak şekilde 'eğik çekme çatlakları' oluşmaktadır. Şekil 3.2'de düzgün yayılı yük altında kirişte oluşan asal çekme ve basınç gerilmeleri şematik olarak gösterilmiştir. Eş gerilme eğrilerinde sürekli çizgiler asal çekme, kesik çizgiler ise asal basınç gerilmelerini temsil etmektedir. Bu gerilme eğrileri yükleme altında oluşan asal gerilmelerin kiriş içerisinde izlediği yolu temsil etmektedir. Kiriş yüklerinin bu eğrilerdeki yolları izleyerek mesnet noktalarına aktarıldığı düşünülür. Eş gerilme eğrilerinde görüldüğü üzere, kiriş alt bölgesine yakın yerlerde yataya yakın doğrultuda asal çekme gerilmeleri bulunmaktadır. Çatlaklar, asal çekme gerilmelerine dik

bir şekilde oluşacağından dolayı kiriş orta bölgesinde yaklaşık 90º açıya sahip eğilme çatlakları oluşmaktadır. Kiriş orta bölgesinden mesnetlere doğru ilerledikçe, kiriş kesitinin orta bölgesini aşmamak kaydıyla asal çekme gerilmelerinin eğiminin yaklaşık 45º açıya kadar azaldığı görülmektedir. Kirişlerde oluşan bu eğik asal çekme gerilmeleri, eğik çekme çatlaklarına sebep olmaktadır. Bu çatlak türü kirişlerde herhangi bir belirti göstermeksizin ani bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu davranış taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketme felsefesinden uzak ve sünek olmayan bir kırılma türüdür. Bu nedenle kirişlerde eğik çekme çatlaklarının oluşmasını engelleyecek yeterli ve uygun donatıların kullanılması önemlidir. Bu kapsamda, TS500-2000'de olduğu gibi güncel yönetmeliklerde de eğik çekme çatlaklarını önlemek amacıyla kirişlerde minimum enine donatısı (kesme donatısı) bulundurması zorunlu kılınmıştır (Orbay, 2005).



Şekil 3.2. Kirişlerde meydana gelen eş gerilme eğrileri

Kirişlerde meydana gelen eğik çekme çatlağının eğimi, kayma (kesme) gerilmesi ile normal gerilmelerin bir arada olduğu durumlarda asal çekme gerilmelerinin açısına bağlı olarak değişmektedir (Marí ve ark., 2015). Yalnızca kayma gerilmelerinin olduğu tarafsız eksen bölgesinde asal gerilmeler eşit değerde olduğundan, buradaki çatlaklar 45° açıyla oluşmaktadır. Ancak, tarafsız eksen üstü ve altındaki bölgelerde, kayma gerilmelerine ek olarak çekme ve basınç normal gerilmelerinin de olması nedeniyle oluşan çatlak eğimi ve büyüklüğü değişmektedir. Çatlaklar, asal çekme gerilmelerine dik açı yapacak şekilde meydana geldiğinden, tarafsız eksen üstündeki bölgelerde 45°'den büyük, tarafsız eksen altındaki bölgelerde ise 45°'den daha küçük açıyla oluşurlar (Fu ve ark., 2023). Şekil 3.3'te asal gerilmelerin kirişin farklı kesit bölgelerindeki yönleri gösterilmiştir. Burada, τ kayma gerilmelerini, σ_c asal basınç gerilmelerini ve σ_t asal çekme gerilmelerini temsil etmektedir.



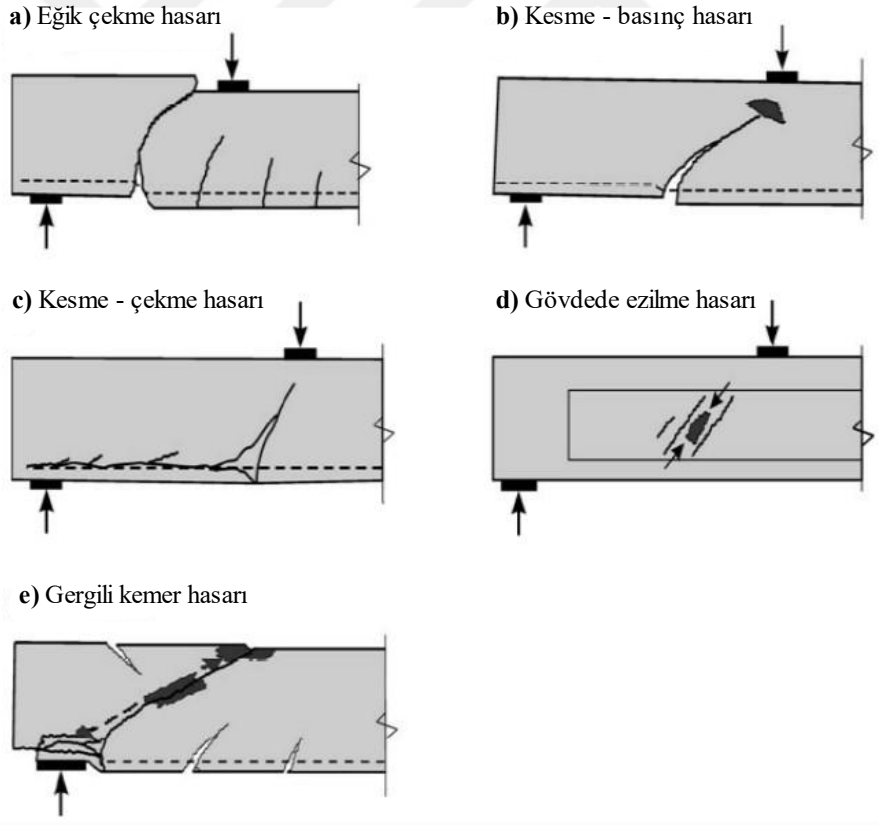
Şekil 3.3. Kiriş asal gerilmelerinin yönü

Betonarme elemanlarda oluşan eğik çatlakların kesme gerilmelerinden ziyade, bu gerilmelerin katkısıyla oluşan asal çekme gerilmelerinden dolayı meydana geldiği fikri, ilk kez Ritter (1899) tarafından ortaya atılmıştır. Mörsch (1909) ise yaptığı eğilme ve kesme deneylerinde, eğik çatlakları ve kırılmaları inceleyerek, kirişlerde meydana gelen kesme hasarlarının asal çekme gerilmelerinden dolayı oluştuğunu kanıtlamış ve Ritter'in ortaya attığı bu davranış fikrini doğrulamıştır (Üstün, 2020). Ayrıca, bu eğik çekme çatlaklarına karşı nasıl önlem alınabileceğiyle ilgili detaylı analizler yaparak kesme güvenliği için bir davranış modeli oluşturmuştur. Bu davranış modelinde kesme gerilmelerini dikkate alarak, kesme gerilmelerinin asal gerilmeler için bir ölçü olduğunu savunmuştur. Mörsch, öne sürdüğü bu davranış modelinde, bir kirişte bir kez çatlak oluştuğunda, sonrasındaki yüklemeler altında betonun kesme dayanımına artık katkı sağlamayacağını belirtmiştir. Aynı yıllarda birbirinden bağımsız olarak çalışmalar yürüten Ritter ve Mörsch, yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde Ritter-Mörsch Kafes Kiriş Analojisi olarak bilinen yaklaşımı öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşım ile kesme donatısının hesaplanabileceğini ve kesme sorununa karşı nasıl önlem alınacağını göstermişlerdir. 1950 yılına kadar klasik kafes analoji kullanılsa da yapılan araştırmalar ile bu modelde dikkate alınmayan farklı parametrelerin de olduğu tespit edilmiştir. Yapılan yeni çalışmalarla birlikte klasik kafes kiriş modeli geliştirilmiş ve farklı

yaklaşımlar da öne sürülmüştür. Ancak, klasik kafes kiriş modelinde yer alan çubuk kuvvetleri esaslı yaklaşım, kesme dayanımına karşı önlem alınmasında oldukça faydalı olmuştur.

3.1.1. Kirişlerde görülen kesme hasarı türleri

Betonarme kirişlerde yapılan düşey yüklemeler sonucu geometrik boyutlar, yükleme tipi, boyuna donatı oranı ve beton basınç dayanımına bağlı olarak 5 olası eğik hasar tipi oluşabilmektedir (Ferguson ve ark., 1988; Raju, 2014). Bu hasar tipleri oluşan eğik çatlağın oluşumuna göre eğik çekme hasarı (Diagonal tension failure, kesme-basınç hasarı (Shear compression failure), kesme-çekme hasarı (Shear tension failure), gövdede ezilme hasarı (Web crushing failure) ve gergili kemer hasarı (Arch rib failure) şeklindedir. Şekil 3.4'te bu hasar türleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Betonarme kirişlerde görülen hasar tipleri (Raju, 2014)

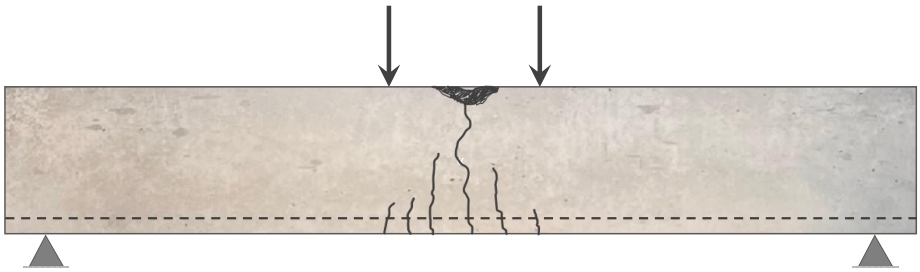
Eğik çekme hasarı, düşük oranda boyuna donatı ve enine donatı bulunduran kiriş numunelerinde sıklıkla gözlemlenmektedir. (Şekil 3.4(a)). Eğik çekme çatlakları, kirişe

yapılan yüklemeden dolayı oluşan eğilme çatlaklarının hızla tüm kiriş kesitine yayılmasından ötürü oluşmaktadır. Kirişlerde ani göçmelere sebep olan eğik çekme çatlakları, yükleme altında daha öncesinde oluşan eğilme çatlaklarından kolaylıkla ortaya çıkabilir (Bazant ve Planas, 1998; Bentz ve ark., 2006). Fakat kirişler, düşük enine donatı oranına sahip olsa bile eğer basınç bölgesinde yeterli miktarda basınç donatısı bulunuyorsa, yukarı doğru ilerlemeye çalışan bu çatlaklar karşılatıkları direnç sebebiyle basınç bölgesini aşamazlar. Basınç bölgesini geçemeyen bu çatlaklar, yukarıya doğru çıkmaya çalışırken çatlakların uç kısmında bir ezilme oluşur ve çatlak, kiriş üst bölgesine ulaşamaz. Şekil 3.4(b)'de gösterilen bu hasar tipi kesme-basınç (shear compression) kırılması olarak adlandırılmaktadır. Boyuna çekme donatısının yetersiz olduğu veya kiriş alt bölgesindeki beton örtüsünün beton-boyuna donatı aderansı için yetersiz olduğu durumlarda, önceden oluşan eğilme çatlakları ve dolaylı olarak oluşan eğik çekme çatlakları, kiriş alt bölgesinde yer alan boyuna donatı boyunca birleşerek kirişin göçmesine neden olabilirler. Bu hasar durumunda, yükleme noktası altında başlayan eğik çatlaklar kiriş alt bölgesinde yer alan boyuna donatılara ulaştığında, boyuna donatı boyunca aderans kırılması oluşmaktadır. Aderans kırılmasını engellemenin yollarından biri de nervürlü donatının konumunun doğru belirlenmesi yani pas payının artırılması denebilir. Çünkü pas payı arttıkça aderans gerilmesi artacak ve aderans kırılmasının gerçekleşmesi geciktirilecektir (Teng ve ark., 2003). Kesme-çekme (shear tension) kırılması olarak bilinen bu hasar tipi Şekil 3.4(c)'de gösterilmiştir. Kiriş kesit genişliğinin az olduğu durumlarda, eğik çekme çatlakları kirişin alt ve üst bölgelerine ulaşmadan önce kiriş gövdesinin ortasında betonun ezilmesine sebep olabilirler. Gövdede ezilme hasarı (web-crushing) olarak bilinen bu hasar tipi Şekil 3.4(d)'de gösterilmiştir. Kiriş kesit yüksekliğinin çok olduğu ve yükleme noktası ile mesnet noktalarının birbirine yakın olduğu durumlarda, yükleme noktasından mesnetlere doğrudan bir kuvvet aktarımı oluşmaktadır. Bu kiriş davranışında, yükleme noktası kemerin tepe noktası ve mesnetler ise kemerin uç noktaları olmak üzere bir gergili kemer şeklinde yük aktarımı oluşmaktadır. Yükleme noktası ile mesnet noktası arasında doğrudan kuvvet aktarımının daha çok olduğu derin kirişlerde, (ACI 318'de $L/H<4$; Eurocode 2 ve TS EN 1992'de $L/H<3$, TS500'de basit kirişlerde $L/H<2$, sürekli kirişlerde $L/H<2.5$) gergili kemer hasarı adı verilen göçme tipi sıklıkla görülmektedir (Şekil 3.4(e)) (Ismail, 2016; Türk, 2020). Bu bölümde belirtilen kesme hasarı türleri, çoğu zaman önceki hasar tipinin sonucu veya karışımı şeklinde gözlenmektedir (Nghiep, 2011).

3.1.2. Kiriş kesme davranışı üzerine a_v/d oranının etkisi

Kesme hasar modlarını etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi de kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranıdır (a_v/d) (Bazant ve Kim, 1984). Deneysel çalışmalarda (4 noktalı veya 3 noktalı eğilme deneyi), yükleme noktası ile mesnet arasındaki mesafe kesme açıklığını ifade etmektedir. Faydalı yükseklik ise kiriş yüksekliğinden paspayının çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Pas payı (d') ise en dış beton örtüsü (c_c), etriye çapı ($Ø_{etr.}$) ve boyuna donatı çapının yarısının ($Ø_l/2$) toplanması ile elde edilmektedir. Kirişlerde a_v/d oranına bağlı olarak farklı hasar modları meydana gelmektedir. Literatürde, a_v/d oranının kiriş kesme davranışını nasıl değiştirdiği konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır (Kotsovos, 1986; Li ve Leung, 2016; AL-Ridha ve ark., 2018; Sahoo ve ark., 2016; Vegera ve ark., 2018). Bu çalışmalarda birbirine yakın sonuçlar sunulmasıyla birlikte farklı bilgiler de yer almaktadır. Fakat, bu tez çalışmasında literatür açısından daha çok kabul gören a_v/d oranları sunulmuştur.

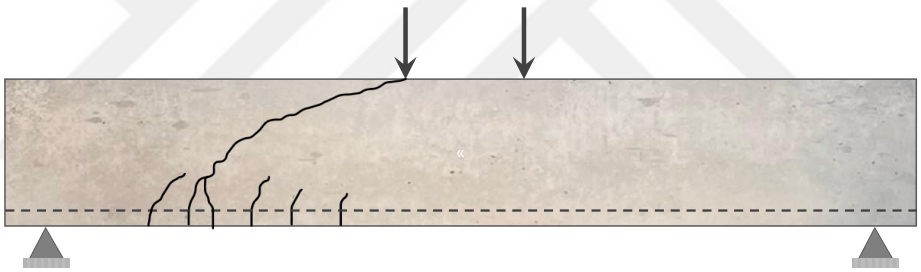
a_v/d oranın çok büyük olduğu kirişlerde ($a_v/d > 7$), kiriş taşıma gücüne eğilme momentinin etkisinden dolayı ulaşmaktadır. Bu tip kirişlerde kesme kuvveti çok düşük miktarda olduğundan dolayı kayda değer düzeyde eğik çekme çatlakları oluşmaz. Yükleme altında kirişte oluşan eğilme çatlakları ile birlikte çekme donatısı akmaya başlar ve kirişte yeterli etriye varsa göçme sünek bir şekilde gerçekleşir. Şekil 3.5'te gösterilen bu kırılma tipi, eğilme göçmesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.5. Eğilme göçmesi

a_v/d oranının 2'den büyük olduğu durumlarda, eğik çekme kırılması (Diagonal tension failure) olarak bilinen hasar modu meydana gelmektedir. Kirişlerde meydana gelen eğilme çatlakları, genellikle kiriş mesneti ile yükleme noktası arasındaki mesafe çok olduğu durumlarda eğik çekme çatlaklarını oluştururlar. Yükleme altındaki bir kiriş elemanında eğilme çatlakları oluştuktan sonra, kiriş boyunca çatlaklar yayılırken eğilme çatlakları aşamalı olarak eğik çekme çatlaklarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

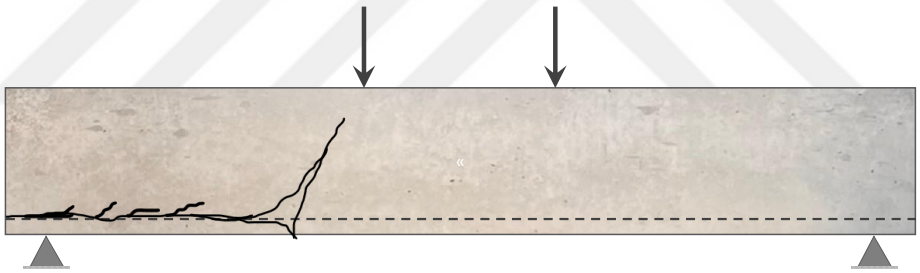
Eğilme çatlaklarından dolayı oluşan eğik çekme çatlakları, basınç bölgesini aşmak üzere kiriş kesitinin yukarısına doğru ilerlerken basınç bölgesinde bir direnç (yerel basınç gerilmeleri) ile karşılaşırlar. Noktasal yüklemeden dolayı meydana gelen yerel basınç gerilmeleri ile karşılaştığında, kirişin alt bölgelerinde (kesme açıklığında) dikey olarak meydana gelen eğilme çatlakları, yüklemeye devam edildikçe kirişin üst bölgelerine doğru çatlak eğimi azalarak ilerlemektedir. Bu esnada kiriş alt bölgesinde eğilme çatlakları yayılmaya devam etmektedir. Yükleme devam etmesi halinde, eğik çekme çatlağı daha zayıf olan kirişin alt bölgesinde ilerleyerek kirişin ani bir şekilde göçmesine sebep olmaktadır. Bu gevrek kırılma türü literatürde eğik çekme kırılması (Diagonal tension failure) olarak adlandırılmaktadır (Jaber, 2021). Bu kırılma türünde, eğik çekme çatlağının oluştuğu yük ile kırılma yükü aynıdır. Yapılan deneysel çalışmalara göre, eğik çekme kırılmasının, kesme açıklığın yarısı kadar bir mesafede ($a_v/2$) gerçekleştiği gözlenmiştir (Ferguson ve ark., 1988). Şekil 3.6'da eğik çekme kırılmasında meydana gelen çatlaklar 4 noktalı yükleme altındaki kiriş üzerinde gösterilmiştir.



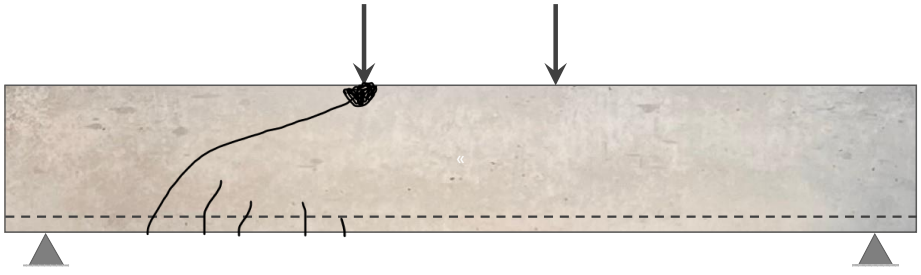
Şekil 3.6. Eğik çekme kırılması (Diagonal tension failure)

a_v/d oranın 1 ile 2.5 arasında olduğu durumlarda ($1 < a_v/d < 2.5$), kesme-çekme kırılması (shear-tension failure) veya kesme-basınç kırılması (shear-compression failure) olarak bilinen hasar modları oluşabilmektedir (Sharizal ve ark., 2016). Noktasal yükleme altındaki yerel basınç gerilmeleri, eğik çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlayarak, bu çatlakların kiriş üst bölgesine ulaşıp göçmeye sebep olmasını engeller. Mesnet bölgesindeki yerel basınç gerilmeleri ise, bu eğik çatlakların büyümesine ve ilerlemesine karşı direnç oluşturarak, kiriş alt bölgesine ulaşmasını önler. Buna göre, kirişteki kırılma durumu, noktasal yükleme altında ve mesnet bölgesinde meydana gelen yerel basınç gerilmeleri tarafından belirlenmektedir. Yerel basınç gerilmelerinin aşılmadığı durumlarda, yaklaşık 45º'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 sergilemektedir. Burada, 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 aşılırsa, artan gerilmeler çekme donatısı boyunca yarılma oluşturarak kesme-çekme kırılmasına neden olurlar (Şekil 3.8). Bunun yerine, eğer yükleme noktası altındaki yerel basınç gerilmeleri aşılırsa (beton basınç dayanımına ulaşılırsa), artan gerilmeler yükleme noktasına ulaştığında veya yükleme noktasına ulaşmadan önce betonun ezilmesine sebep olurlar. Bu kırılma tipi kesme-basınç kırılması olarak adlandırılır (Şekil 3.8). Her iki kırılma türünde de kiriş yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve göçme gerçekleşmiştir. Bu tür kırılmalar, eğik çekme kırılmaları kadar ani ve gevrek değildir. Yükleme altında eğik çatlaklar oluştuktan 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). Şekil 3.7'de kesme-çekme kırılması ve Şekil 3.8'de ise kesme-basınç kırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kesme-çekme kırılması (Shear-tension failure)



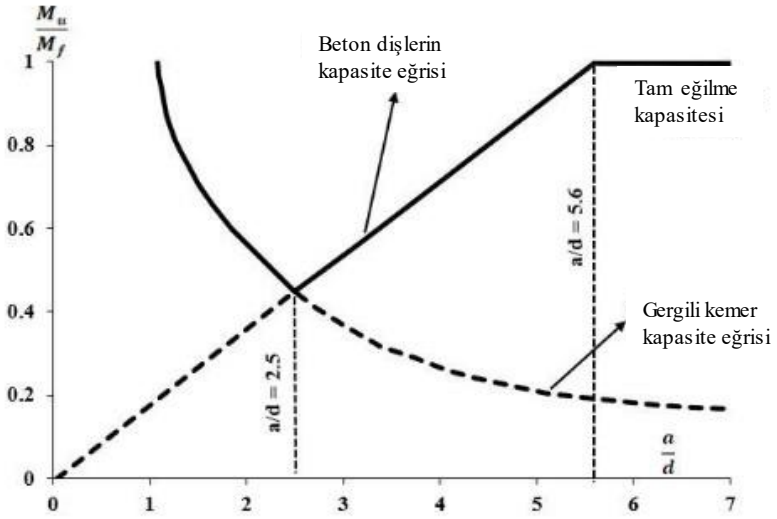
Şekil 3.8. Kesme-basınç kırılması (Shear-compression failure)

a_v/d oranın 1'den küçük veya eşit olduğu durumlarda ($a_v/d \leq 1$), genellikle gergili kemer kırılması (Arch rib failure) olarak adlandırılan hasar modu gerçekleşir. Yükleme altında eğilmeye zorlanan bu tür kirişlerde, eğik çatlaklar oluştuktan sonra artık eğilme

önemini kaybeder ve kiriş tamamen gergili kemer gibi davranmaya başlar. Artık kiriş tamamen kesme kuvvetine maruzdur. Bu davranışta, kiriş alt bölgesinde yer alan çekme donatıları gergi görevini üstlenirken, asal basınç gerilmeleri ile aynı düzlemdeki beton ise kemer görevi görmektedir. Bu aşamada kiriş üst bölgesinde etki ettirilen noktasal yükler, kemer gibi davranan basınç çubuğu aracılığıyla mesnetlere aktarılmaktadır. Eğik çatlakların oluşmasından önce yükler çekme donatıları aracılığıyla, yani eğilmeye zorlanarak aktarılırken, eğik çekme çatlakları oluştuktan sonra yani artık kirişin gergili bir kemer gibi davranmaya başladığı aşamada, çekme donatısında kesme açıklığı boyunca gerilmeler yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Başka bir deyişle, artık bu aşamada eğilme davranışı söz konusu değildir. Ancak, bu kırılma türünde kiriş göçmeden önce boyuna donatı akma noktasına ulaşacağından dolayı, kirişin eğilme kapasitesine erişeceği söylenebilir (Ersoy ve ark., 2019). Şekil 3.9'da gergili kemer kırılması gösterilmiştir.

Şekil 3.9. Gergili kemer kırılması (Arch rib failure)

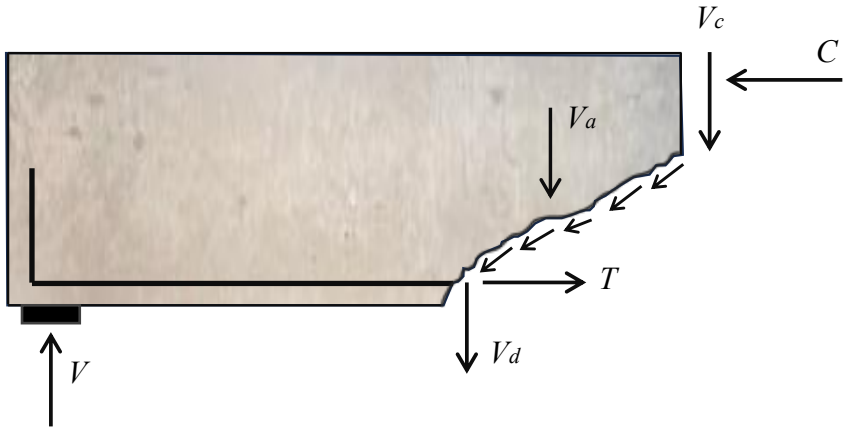
Kiriş deneylerinde eğilme veya eğik çekme kırılması fark etmeksizin a_v/d oranın 2.5'ten büyük olduğu durumlarda eğilme davranışı hâkim iken, a_v/d oranının 2.5'ten küçük olduğu durumlarda ise kiriş gergili kemer gibi davranmaya başlamaktadır. Gergili kemer davranışının etkili olduğu kirişlerde (genellikle derin kirişler), kırılmanın gerçekleşmesinde kesme gerilmeleri etkili olmaktadır. Kani yaptığı çalışmalarda (Kani, 1964, 1966, 1967), kirişlerin eğilme kapasitesine ulaşmadan kesme gerilmelerinden dolayı güç tükenmesine eriştiği bir aralık olduğunu göstermiştir. Kani, bu bölgeyi 'Kesme Vadisi' olarak adlandırmıştır. Bu bölgede kesme kırılması oluşurken dışındaki bölgelerde ise, eğilme davranışı etkili olmaktadır. Şekil 3.10'da Kani'nin yaptığı çalışma sonuçlarına göre kiriş davranışının a_v/d oranına bağlı olarak değiştiğini gösteren grafik sunulmuştur. Ayrıca, Kani'nin 1966 ve 1977 yıllarında yaptığı çalışmalarda kesme vadisinin derinliğinin çekme donatısının oranı ve kiriş faydalı yüksekliğine göre değiştiği de ifade edilmiştir.



Şekil 3.10. Kesme vadisinin a_v/d oranına göre değişimi (Kani, 1964; Sogut, 2022)

3.1.3. Kesme kuvvetini dengeleyen mekanizmalar

Kesme donatısı bulundurmayan betonarme kiriş elemanlarda, kesme kuvvetini dengeleyen çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Yükleme altındaki betonarme bir kirişte eğilme çatlakları oluştuğunda, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi kesme aktarım mekanizmaları devreye girerek kesme kuvvetlerine karşı direnç oluştururlar. Bu kesme transferinde görev alan mekanizmalar; basınç bölgesindeki çatlamamış betonun kesme dayanımı, çekme donatısı (kaldıraç etkisi), çatlak iç yüzündeki sürtünme kuvvetlerinin sağladığı kesme dayanımı ve bu etkilerin birleşimi olarak ortaya çıkan kemerlenme etkisidir. Şekil 3.11'de V_c, çatlamamış beton tarafından taşınan kesme kuvvetini, V_a, çatlak iç yüzeyindeki sürtünme kuvveti tarafından taşınan kesme kuvvetini ve V_d ise çekme donatısı tarafından taşınan kesme kuvvetini temsil etmektedir. Bu durumda, toplam kesme kuvveti $V = V_c + V_a + V_d$ şeklinde ifade edilir. Ayrıca, şekilde gösterilen *C* ve *T* kuvvet çifti olarak bilinmektedir. Yani, bu dengeleme mekanizmasında, beton basınç kuvveti donatı çekme kuvveti tarafından dengelenmektedir.



Şekil 3.11. Kesme kuvvetini dengeleyen mekanizmalar

Kim ve ark. (1996), bu mekanizmaların kiriş kesme dayanımına ne kadar katkı sağladıklarını araştırmak üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, kiriş tarafından taşınan toplam kesme kuvvetinin yaklaşık %20-40'ı basınç bölgesindeki çatlamamış beton tarafından, yaklaşık %15-20'si çekme donatısı (kaldıraç etkisi) tarafından ve yaklaşık %33-50'si ise çatlak iç yüzeyindeki sürtünme kuvveti tarafından karşılandığı belirtilmiştir.

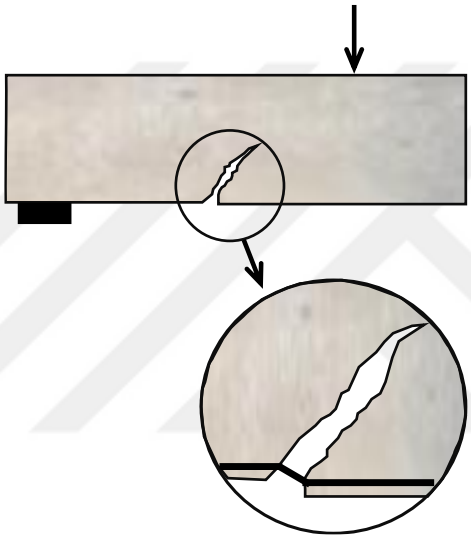
3.1.3.1. Çatlamamış beton tarafından taşınan kesme kuvveti

Yükleme altındaki kiriş numunesinde eğilme çatlakları oluştuktan sonra, betonun basınç bölgesi bir miktar kayma gerilmesi almaya başlar. Yükleme devam ettikçe kiriş kesitine etkiyen basınç kuvveti artmakta ve basınç etkisinde kalan beton alanı da büyümektedir. Bu sayede, yük arttıkça betonun basınç bölgesi tarafından taşınan kesme kuvveti artacaktır. Fakat aşırı yükleme yapıldığında (basınç dayanımı aşıldığında), göçme modunun ani ve gevrek olmasına sebep olabilmektedir (Doğangün, 2020).

3.1.3.2. Kaldıraç etkisi

Betonarme kirişlerde eğik çatlak oluştuktan sonra, çatlağın sağ tarafında kalan kiriş parçası düşey yükleme altında aşağıya doğru hareket etmek isterken, kirişin alt bölgesinde yer alan çekme donatısı ise bunu engellemeye çalışır. Bu mekanizmanın oluşmasından dolayı, bir miktar kayma gerilmeleri çekme donatısı tarafından taşınmaya başlar. Çekme donatısı kayma gerilmelerini aldıkça zorlanacak ve solda kalan kiriş parçası donatı ile beton arasındaki aderans kuvvetlerini zayıflatarak donatı boyunca kirişi

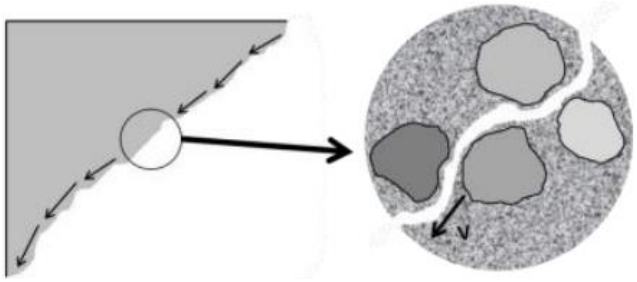
yırtmaya çalışacaktır. ‘Kaldıraç etkisi’ olarak adlandırılan çekme donatısının kesme dayanımına katkısı sayesinde, kiriş numunesi bir süre daha yük taşımaya devam edecektir (Ersoy ve ark., 2019). Şekil 3.12’de kirişlerde oluşan kaldıraç etkisi gösterilmiştir. Kayma gerilmeleri artmaya devam ederken, beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetleri aşıldığında, eğik olarak başlayan çatlak çekme donatısı boyunca yırtılarak göçme durumuna ulaşabilir. Bu kırılma türü literatürde aderans hatası (Splitting) olarak adlandırılmaktadır. Beton ile donatı arasındaki aderans dayanımının iyi olmadığı ve kiriş alt bölgesinde çok sayıda boyuna donatı olduğu durumlarda aderans hatası (kırılması) oluşabilmektedir (Park ve Paulay, 1991).



Şekil 3.12. Kirişlerde kaldıraç etkisi

3.1.3.3. Çatlak içi kesme gerilmeleri

Betonarme elemanlarda çatlaklar oluştuğunda, ortaya çıkan çatlak yüzeyleri düz ve homojen değildir. Betondaki agregaların farklı boyutlarda olmasından dolayı bu çatlak yüzeyleri pürüzlü ve düzensiz şekillere sahiptirler. Kayma gerilmeleri, betonu boyuna donatı boyunca yırtmaya zorlarken, boyuna donatı çevresinde oluşan çatlak yüzeyleri arasında temas oluşacaktır. Bu yüzey teması sonucu oluşan sürtünme kuvvetleri, betonun kayma direncine katkı sağlayarak betonun yırtılmasını engelleyecektir. Böylece, iki çatlak yüzeyinin sürtünme halinde yer değiştirmesi, kesme kuvvetinin taşınmasında katkı sağlayacaktır (Collins ve ark., 1996; Huber ve ark., 2019). Şekil 3.13’te çatlak içi agrega yüzeyleri ve kuvvet aktarım mekanizması gösterilmiştir.

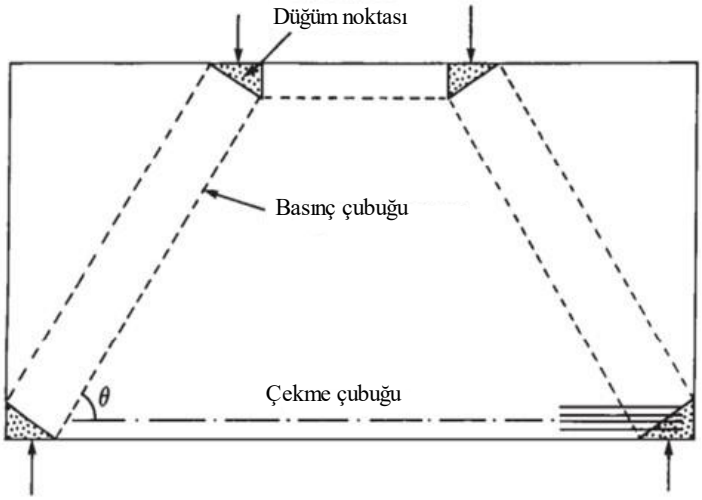


Şekil 3.13. Çatlak içi agrega ve beton yüzeyleri (Uysal, 2019)

3.1.3.4. Kemerlenme etkisi

Kemerlenme etkisi, derin kirişlerde ve a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranının 2.5'ten daha küçük (yani yükleme noktası ile mesnet noktası arasındaki mesafenin az olduğu durumlarda) olduğu elemanlarda meydana gelebilmektedir. Daha öncesinde de belirtildiği gibi, a_v/d oranının belli bir sınır değerinden büyük olduğu durumda kiriş davranışı, küçük olduğu durumda ise gergili kemer davranışının etkili olduğu literatürde uzun bir süre araştırılmıştır. Bu sınır değeri ile ilgili çok sayıda çalışma olmasıyla birlikte bu sınır değerin yaklaşık olarak 2-2.5 civarında olduğu söylenebilir (Kani, 1964; Kwak ve ark., 2002; Matamoros ve Wong, 2003; Fathifazl ve ark., 2009).

Kemerlenme olayı, çekme ve basınç dayanımları arasındaki farkın fazla olduğu durumlarda çok daha sık gözlenmektedir. Yükleme altındaki betonarme bir kiriş elemanında, eğilme çatlakları oluşmaya başladıktan sonra kemer hareketi de oluşmaya başlar. Bu aşamada çatlamamış beton kemer gövdesini çekme donatıları ise bir gergiyi temsil eder. Kemerlenme olayı başladıktan sonra yükleme etkisiyle oluşan iç kuvvetler bu olayın etkisiyle yeniden dağıtılır. Kesme kuvvetinin büyük bir kısmı, kemerlenme etkisi sonucu oluşan basınç çubukları aracılığıyla yükleme noktasından mesnetlere aktarılır. Genellikle bu olayın gerçekleşmesi için kiriş elemanının alt kısmında yatay bir reaksiyon kuvvetinin olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da betonarme kirişlerde boyuna donatıların gergi şeklinde davranmasıyla sağlanmaktadır. Şekil 3.14'te de gösterilen bu kemerlenme olayı, genellikle bir kiriş elemanının taşıma gücünü artırmaktadır (Park ve Paulay, 1991; Abdulsalam, 2014).



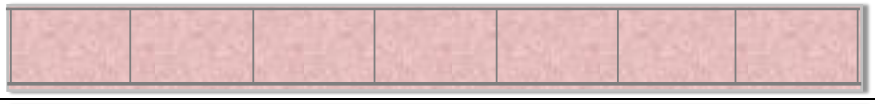
Şekil 3.14. Kemerlenme etkisinde yük aktarımı (Lafta ve Ye, 2016)

3.2. Deney Numuneleri

Çalışma kapsamında ele alınan deney kirişlerinin geometrik boyutları ve donatı özellikleri, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'ndaki mevcut imkânlar (yük hücresi kapasitesi, basınç pompası, yükleme düzeneği ve diğer laboratuvar koşulları) çerçevesinde tasarlanmıştır. Bu kapsamda, ½ geometrik ölçekli ve kesme kapasitesi yetersiz 8 tane kiriş numunesi imal edilmiştir. Tüm deney kirişlerinde geometrik boyutlar ve donatı özellikleri aynıdır. Çalışmada kullanılan Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) güçlendirme uygulamasında, MÇD aralığı değişken parametre seçilerek, MÇD aralığının kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kiriş numunelerinden 7 tanesi farklı MÇD aralığı dikkate alınarak güçlendirilmiş ve geriye kalan 1 tanesi ise referans kiriş olarak kullanılmıştır. Deney kirişlerinde, kiriş faydalı yüksekliğine (d = 215 mm) bağlı olarak belirlenen aralıklarla kiriş kesme açıklığına MÇD güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. MÇD aralıkları için yaklaşık olarak d (220 mm), d/1.4 (165 mm), d/1.7 (130 mm), d/2 (110 mm), d/2.5 (90 mm), d/3 (75 mm) ve d/5 (45 mm) oranları dikkate alınmıştır. Örneğin; MÇD aralığı d/2 = 215/2 = 107,5 mm ise uygulama kolaylığı ve kesme açıklığına (700 mm) sığması durumları gözetilerek 110 mm aralıklarla MÇD'ler uygulanmıştır. Mesnet bölgesinde tekil yükten dolayı oluşabilecek ani göçmeyi engellemek amacıyla, tüm deney kirişlerinde 3 adet MÇD, sık aralıklarla (45 mm) kiriş yüzeyinden 150 mm uzaklıktaki mesafe olarak kabul edilen mesnet bölgesine yerleştirilmiştir. Bu durum aynı zamanda mevcut yapılarda bulunan kolon-kiriş birleşim

bölgelerinde, kirişin kolon içerisinde kalan kısmını temsil etmektedir. Çalışma kapsamında ele alınan deney kirişlerinin özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

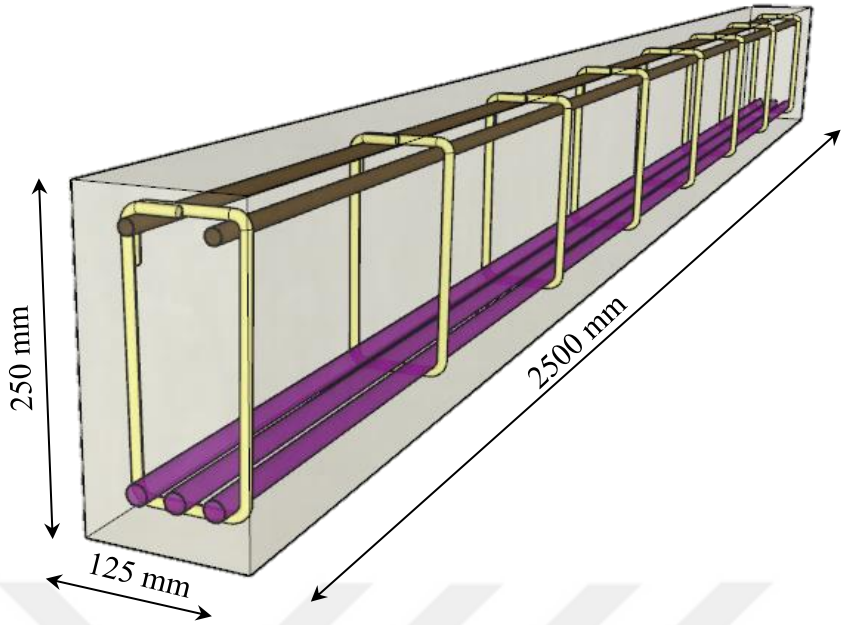
Çizelge 3.1. Deney kirişlerinin özellikleri

Kiriş No	Kiriş Numunesi Detayı	MÇD aralığı (mm)	MÇD sayısı
Ref		-	-
S1-220		220 (*d*)	4
S2-165		165 (*d*/1.4)	5
S3-130		130 (*d*/1.7)	6
S4-110		110 (*d*/2)	7
S5-90		90 (*d*/2.5)	8
S6-75		75 (*d*/3)	9
S7-45		45 (*d*/5)	15

***** Mesnet bölgelerine yerleştirilen MÇD'ler kırmızı renk ile gösterilmiştir.

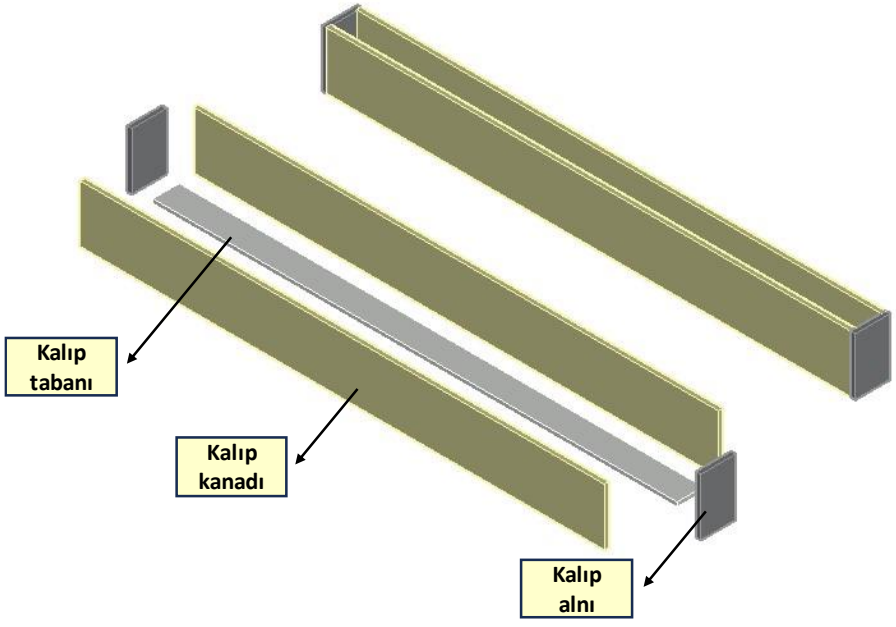
3.2.1. Deney numunelerinin boyutları

Deney numuneleri boyutlandırılırken, mevcut laboratuvar koşulları gözetilerek kesme kapasitesi yetersiz ve eğilme kapasitesi yüksek olan kirişlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ½ geometrik ölçeğe sahip dikdörtgen kesitli deney kirişlerinde, kiriş uzunluğu 2500 mm ve kesit boyutları 125 mm × 250 mm olarak seçilmiştir. Bütün deney kirişleri için aynı boyutlar kullanılmıştır. Şekil 3.15'te deney kirişlerinin boyutları gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Deney kirişlerinin boyutları

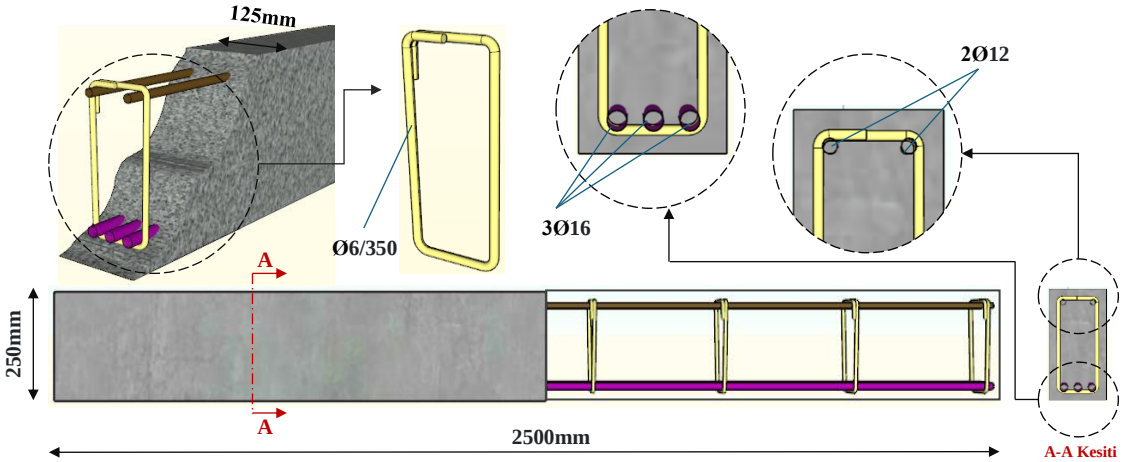
Deney kirişlerinin üretilmesinde plywood malzemesinden yapılmış dikdörtgen kesitli kalıplar kullanılmıştır. Her kiriş numunesi için ayrı kalıplar hazırlandığı için, kalıplar sadece bir kez kullanılmıştır. Deney numuneleri için toplamda 8 adet plywood kalıpları hazırlanmıştır. Ahşap kesme makinesi yardımıyla kesilen kalıplar, kalıp kanatları (270 mm × 2540 mm), kalıp alınları (270 mm × 165 mm) ve kalıp tabanı (125 mm × 2500 mm) olmak üzere 3 çeşit parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.16). Bu kalıp parçalarının montajı, şarjlı matkap yardımıyla vida kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.16. Deney kirişlerinin kalıp montaj biçimi

3.2.2. Deney numunelerinin donatı detayları

Deney kirişlerinde kullanılan donatılar seçilirken, yapılan düşey yükleme deneylerinde kirişte kesme hasarının oluşması durumu gözetilmiştir. Şekil 3.17'de deney kirişlerine ait detaylar verilmiştir. Bu numunelerin kesme dayanımı açısından yetersiz olması için Ø6/350 mm aralıklarla enine donatılar (etriye) kullanılmıştır. Etriye kancaları, mevcut yönetmeliklere (TBDY-2019 ve TS 500) aykırı olarak 90º açı ile uygulanmıştır. Bu kapsamda, mevcut yapı stoğunda kesme açısından güçlendirme ihtiyacı duyulan taşıyıcı sistem elemanları esas alınmıştır (Kaplan ve ark., 2004; Öcal ve İnce, 2012; Ozturk ve ark., 2023). Deney numunelerinin eğilme kapasitesine ulaşılması istenmediğinden dolayı (kesme kapasitesine ulaşılması istenmektedir) kirişlerde kullanılan eğilme donatısı olabildiğince yüksek seçilmiştir. Kiriş numunelerinde çekme bölgesine (kiriş alt bölgesi) 3Ø16 (ρ = 0.0224) ve basınç bölgesine (kiriş üst bölgesi) 2Ø12 (ρ' = 0.0084) boyuna donatılar yerleştirilmiştir. Deney numunelerinde kullanılan boyuna donatı oranı farkı (ρ-ρ' = 0.014) dengeli donatı oranına (ρ-ρ' < ρ_b = 0.0138) yaklaşık eşittir. Ayrıca minimum donatı oranından (ρ_{min} = 0.004) da daha büyük seçilmiştir. Yapılan bu donatı yerleşimi sayesinde, kesme dayanımı düşük ve eğilme dayanımı yüksek kirişler tasarlanmıştır. Böylece, kesme kapasitesi yetersiz kirişler MÇD uygulaması ile güçlendirilerek yapılan güçlendirme uygulamasının kesme dayanımına olan katkısı incelenebilmiştir.



Şekil 3.17. Deney kirişlerinin donatı detayları

3.2.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri

Yapılan deneysel çalışmada MÇD aralığının kiriş kesme dayanımına olan etkisini incelemek ve deney kirişleri arasında karşılaştırma yapabilmek için deney kirişlerinin mekanik ve fiziksel özellikleri ve deney koşulları sabit tutulmuştur.

3.2.3.1. Beton

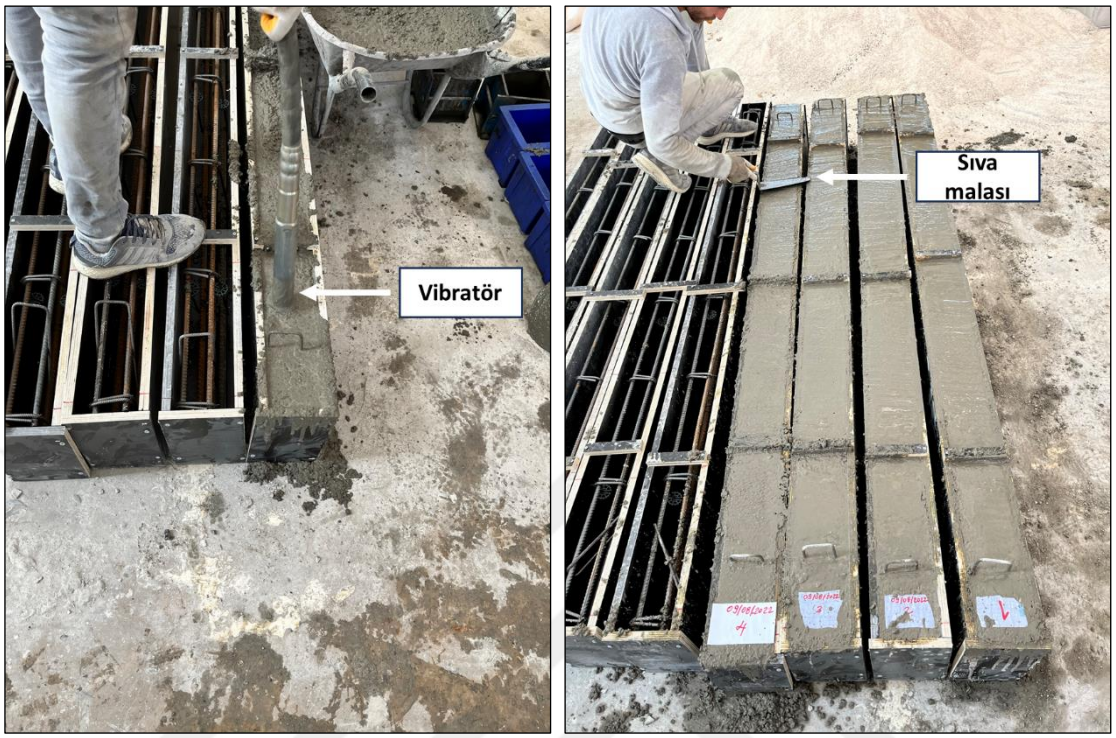
Çalışma kapsamında ele alınan deney kirişlerinin beton dökümü, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Beton dökümü yapılmadan önce, kiriş yüzeylerinin pürüzsüz ve düzgün geometriye sahip olması için kalıpların iç kısımlarına kalıp yağı sürülmüştür. Betonun karıştırılması işlemi için 0.35 m^3 kapasiteye sahip betoniyer (harç karma makinesi) kullanılmıştır (Şekil 3.18). Betoniyer hacminin kısıtlı olması ve karıştırma işlemindeki hassasiyet, her bir kiriş numunesi için ayrı döküm yapılmasını gerektirmiştir. Şekil 3.18'de beton karıştırılmasında kullanılan betoniyer harç makinesi ve Şekil 3.19'da betonun kalıplara yerleşim aşamaları gösterilmiştir.

Şekil 3.18. Betonun karıştırılması için kullanılan betoniyer

Şekil 3.19. Betonun kalıplara yerleştirilmesi

Beton yerleşimi sırasında donatının kalıp içerisindeki konumunun bozulmamasına özen gösterilmiştir. Donatılar kirişe yerleştirildikten sonra beton dökümü sırasında kalıpta açılma olmasını önlemek amacıyla, kalıpların üst kısımları küçük plywood kalıp parçaları ile sabitlenmiştir. Kirişlerin içine dökülen betonun boşluksuz bir şekilde yerleşebilmesi ve homojen bir şekilde yayılması için vibratör yardımıyla sıkıştırma işlemi

uygulanmıştır (Şekil 3.20). Sıkıştırma işlemi yapıldıktan sonra kiriş yüzeyleri mala yardımıyla düzeltilmiştir.



Şekil 3.20. Betonun yerleştirilmesi için vibratör kullanımı ve kiriş yüzeylerinin düzeltilmesi

Çizelge 3.2'de deney kirişleri için kullanılan betonun 1 m^3 hacim için karışım miktarları verilmiştir. Karışıma kimyasal akışkanlaştırıcı eklenmemiştir. Düşük dayanımlı beton üretilmesi istendiğinden dolayı su/çimento oranı 0.58 olarak seçilmiş ve beton karışımında dayanım sınıfı 32.5 MPa olan çimento kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan en büyük agrega çapı 12 mm'dir.

Çizelge 3.2. Deney kirişlerinin beton karışım miktarları (1 m^3 beton için)

Beton Karışım Malzemeleri	**Ağırlık (kg)**	**Hacimsel oranı (%)**
Çimento (kg)	431.79	18.77
Su (kg)	251.28	10.93
İnce Agrega (0-4mm) (kg)	753.85	32.77
Orta Agrega (5-12mm) (kg)	863.08	37.53
Toplam	2300	-

Beton dökümü yapılırken, basınç testleri için 6 adet küp numune ve yarma deneyleri için 3 adet silindir numune alınmıştır. Küp numuneler için 150 mm × 150 mm × 150 mm geometrik boyutlara sahip hazır kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.21). Silindir

numuneler için ise yüksekliği 300 mm ve çapı ise 150 mm olan hazır kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.22). Test edilmek üzere alınan numuneler deney kirişleri ile aynı şartlarda kür edilmiştir.

Şekil 3.21. Basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılan küp numuneler

Şekil 3.22. Yarmada çekme dayanımının belirlenmesi için kullanılan silindir numuneler

Çalışma kapsamında, eksenel basınç ve yarmada çekme testleri Konya Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda 1000 kN kapasiteli dijital pres makinesinde yapılmıştır. Beton dökümünden alınan 6 adet küp numuneden 3 tanesi hedef basınç dayanımına ulaşmadan önce ulaşılan dayanımı kontrol etmek için kullanılmıştır. Geriye kalan 3 tanesi için elde edilen ortalama küp numune basınç dayanımı, 0.8 katsayısı

ile çarpılarak ortalama silindir numune basınç dayanımına dönüştürülmüştür. Çizelge 3.3'te görüldüğü üzere, eşdeğer ortalama silindir basınç dayanımı, ortalama küp basınç dayanımın 0.8 katsayısı ile çarpılmasıyla 16,65 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 3.23'te dijital pres makinesinde test edilen küp numuneler gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Deney numunelerinde ortalama beton basınç dayanımları

Küp Numuneler	Küp Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Küp Basınç Dayanımları (MPa)	Eşdeğer Ortalama Silindir Basınç Dayanımları (MPa)
A	23.34		
B	18.28	20.81	16.65
C	20.81		

Şekil 3.23. Beton basınç dayanımının belirlenmesi

Beton dökümünden alınan 3 adet silindir numunesi için yarmada çekme testleri yapılarak ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir. Çizelge 3.4'te yarmada çekme test sonuçları ve Şekil 3.24'te yarmada çekme testine ait görüntüler sunulmuştur.

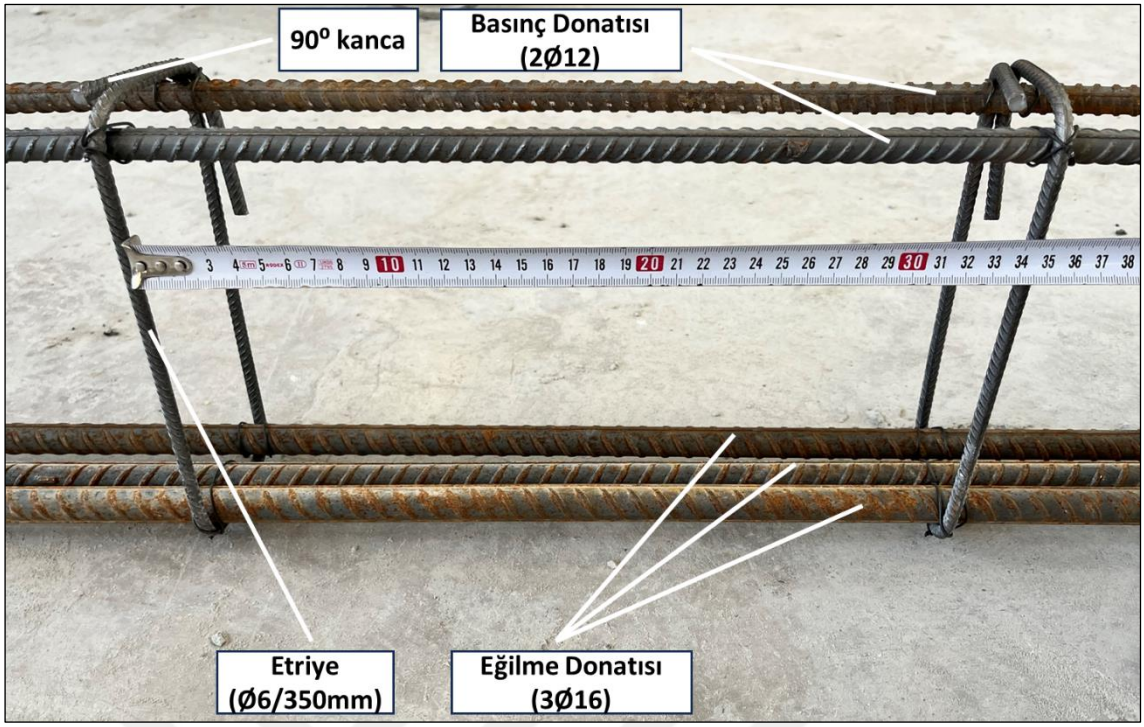
Çizelge 3.4. Deney numunelerinde ortalama yarmada çekme dayanımları

Küp Numuneler	Yarmada çekme Dayanımları (MPa)	Ortalama Yarmada çekme Dayanımları (MPa)
1	1.83	
2	2.02	1.92
3	1.90	

Şekil 3.24. Betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

3.2.3.2. Donatı

Deney kirişlerinin üretilmesinde 6 mm, 12 mm ve 16 mm olmak üzere üç farklı çapta donatılar kullanılmıştır. Kiriş çekme bölgesinde 3Ø16 ve basınç bölgesinde 2Ø12 boyuna donatılar kullanılmıştır. Boyuna donatıların uç kısımlarında gönye yapılmamıştır. Kesme kapasitesi yetersiz olması istendiğinden dolayı Ø6/350 mm aralıklarla etriyeler yerleştirilmiştir (Şekil 3.25). Deney numunelerini vinç ile taşıyabilmek için Ø8 çapında taşıma kancaları yapılmıştır. Kirişlerin donatı hazırlama işi laboratuvar (Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma laboratuvarı) ortamında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26).

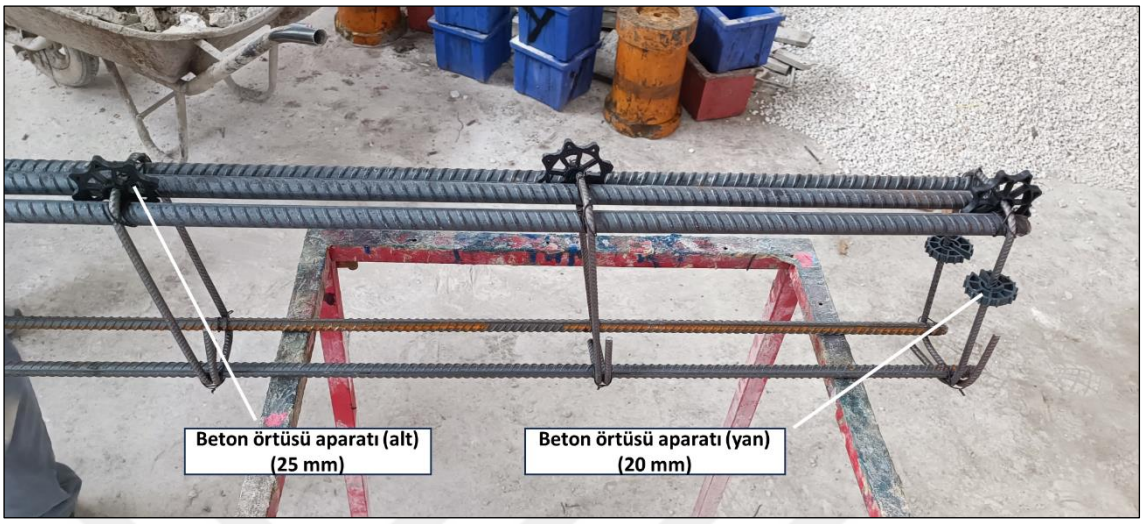


Şekil 3.25. Kirişlerin donatı detayları

Şekil 3.26. Kirişlerin donatılarının hazırlanması

Kiriş numunelerinde istenilen beton örtüsünü (kiriş alt bölgesinde 35 mm ve kiriş yan bölgelerinde 25 mm) sağlamak için kiriş alt bölgesinde 25 mm ve yanlarda ise 20 mm boyutlarında plastik beton örtüsü aparatları kullanılmıştır. Şekil 3.27'de deney

kirişlerinde kullanılan plastik beton örtüsü aparatları kiriş donatılarıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Deney kirişlerinde kullanılan beton örtüsü aparatları

Çalışma kapsamında kullanılan B420c tipi donatıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla her bir çaptan (6 mm, 12 mm ve 16 mm) 3'er adet donatı numunesi alınarak çekme testine tabi tutulmuştur. Çizelge 3.5'te çekme test sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Donatı çekme testlerinden elde edilen sonuçlar

Donatı Çapı (mm)	**Akma Dayanımı, f_y (MPa)**		**Maksimum Çekme Dayanımı, f_{su} (MPa)**	
	Ölçülen	**Ortalama**	**Ölçülen**	**Ortalama**
6	559	557	669	667
	562		667	
	549		664	
12	500	501	600	601
	503		598	
	499		604	
16	486	493	605	597
	493		594	
	499		592	

3.2.3.3. Transmisyon çelik

Çalışma kapsamında yapılan MÇD ile güçlendirme uygulamasında, soğuk çekme yöntemiyle üretilen transmisyon çelikler kullanılmıştır. 6 mm çapındaki transmisyon çeliklerin mekanik özelliklerini tespit edebilmek için 3 adet test yapılmış ve test sonuçlarının ortalamaları alınmıştır. Çizelge 3.6'da kiriş güçlendirmesinde kullanılan transmisyon çeliklerin çekme test sonuçları verilmiştir. Şekil 3.28'de MÇD güçlendirme uygulamasında kullanılan transmisyon çelikler gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Transmisyon çelik çekme testlerinden elde edilen sonuçlar

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 3.28. MÇD güçlendirme uygulamasında kullanılan transmisyon çelikler

3.2.3.4. Epoksi

Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) uygulamasında, mekanik dikişlerin ankraj işleminin yapılmasında TS EN-1504-3 standardına uygun olan 'Kimyasal dübel F.1311' epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. Yüksek kaliteye sahip kimyasal enjeksiyon sistemi olarak bilinen epoksi malzemesi, iki bileşenli olup sarkma yapmayan macun kıvamına sahiptir.

Epoksi malzemesi, içerisinde bulunduğu tüpe uygun sıkma tabancası ve iki bileşeni tüpten dışarıya karışmış şekilde çıkmasını sağlayan tabanca uçları kullanılarak uygulanmıştır. Uygulama yapıldıktan sonra kısa sürede priz alır ve hızlı mukavemet kazanır. Bu nedenle uygulamanın kısa süre içerisinde bitirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu epoksi malzemesi deri ile temas edilmesi halinde deride tahriş ve kaşıntıya sebep olmaktadır. Bu yüzden uygulama sırasında kişisel koruyucu ekipmanlarının temin edilmesi ve kullanımın titizlikle yapılması gerekmektedir. Şekil 3.29'da epoksi tüpüne ait görsel ve Çizelge 3.7'de epoksinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Şekil 3.29. MÇD uygulamasında kullanılan epoksi malzemesi

Çizelge 3.7. MÇD uygulamasında kullanılan epoksi malzemesinin mekanik özellikleri

Görünüş	Tiksotropik harç
Renk	Gri
Kimyasal Bileşim	Geliştirilmiş polyester reçine ve anorganik dolgular
Vizkozite	Tiksotropik
Kuru madde içeriği	%100
Özgül ağırlığı	1.57 gr/m^3
Muhafaza süresi	18 ay (22 °C'de)
Hacim	345 ml
Basınç dayanımı	82MPa
Klörür iyonu içeriği	%0.0056

3.3. Güçlendirme Metodolojisi

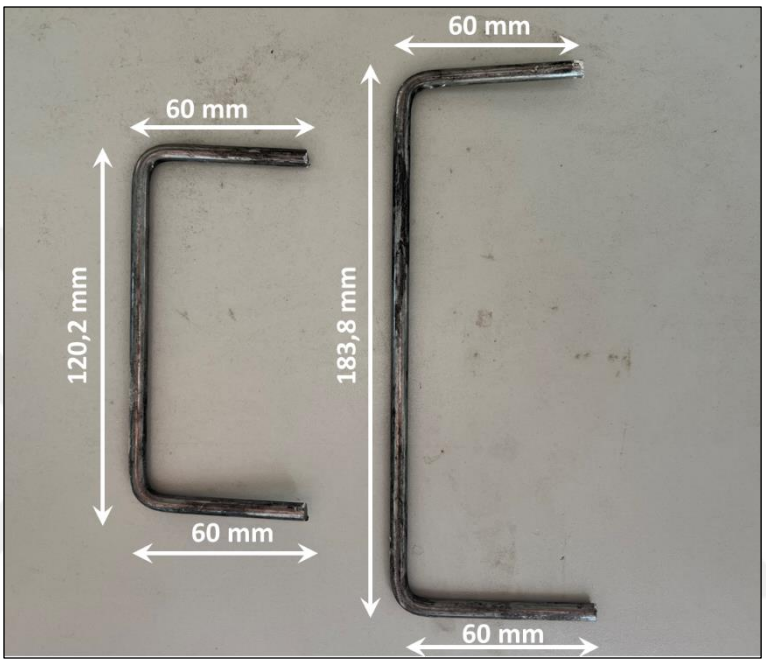
Mekanik çelik dikiş (MÇD) uygulaması, titizlikle yürütülmesi gereken ve her aşaması dikkat gerektiren sıralı adımlardan oluşmaktadır. Bu adımların doğru bir şekilde uygulanması halinde mekanik çelik dikiş yönteminden iyi sonuçlar alınabilir. Şekil 3.30'da MÇD güçlendirme uygulaması şematik olarak gösterilmiştir. Sonraki bölümde güçlendirme uygulamasına ait her bir aşama detaylı olarak açıklanmıştır.

Şekil 3.30. MÇD güçlendirme uygulaması adımları

3.3.1. Mekanik çelik dikişlerin (MÇD) hazırlanması

Deney kirişlerinde yapılan güçlendirme uygulamasında, Ø6 mm çapındaki soğuk çekme yöntemiyle üretilen 3m uzunluğunda transmisyon çelikler, Konya'da bulunan Hasçelik firmasından temin edilmiştir. Transmisyon çelikler spiral taşlama makinesi yardımıyla laboratuvar ortamında belirli uzunluklarda kesilmiştir. Belirli uzunluktaki transmisyon çelikler, demir bükme makinesi yardımıyla U biçiminde bükülerek mekanik

çelik dikişler (MÇD) oluşturulmuştur. Böylece kirişlerin güçlendirme uygulamasına geçilmek üzere MÇD'ler hazırlanmıştır. Şekil 3.31'de U şeklinde bükülmüş MÇD'ler gösterilmiştir. Deney kirişlerinde 45º açıyla uygulanan MÇD'lerin kirişe yerleştirildikten sonraki görünen uzunluğu 183.8 mm'dir. Bu durumdan farklı olarak, sadece mesnet bölgelerinde tekil yükten dolayı oluşabilecek ani kırılmaları engellemek amacıyla farklı uzunluktaki (120.2 mm) MÇD'ler kullanılmıştır.



Şekil 3.31. MÇD güçlendirme uygulamasından kullanılan Mekanik çelik dikişler (MÇD)

3.3.2. Ankraj deliklerinin açılması

Güçlendirme yapılacak olan kirişler için ilk olarak basınçlı hava yardımıyla yüzey temizliği yapılmıştır. Kiriş üzerinde MÇD delik noktaları, kirişin alt ve üst yüzeyinden 60 mm içeriye doğru olacak şekilde yani alt ve üst boyuna donatının arasında kalacak şekilde (Şekil 3.33) işaretlendikten sonra, matkap yardımıyla ankraj delikleri açılmıştır (Şekil 3.32). Ankraj delikleri 6 mm çapındaki mekanik dikişler için 8 mm olacak şekilde açılmıştır. MÇD'lerin kiriş içerisindeki ankraj boyu, sıyrılmanın önlenmesi için yeterli uzunluk (ankraj çapının 10 katı) olan 60 mm (10Ø) olarak uygulanmıştır (Odacioğlu ve ark., 2022; Kale ve Doğan, 2023).

Şekil 3.32. Ankraj deliklerinin matkap yardımıyla açılması

Şekil 3.33. Ankraj delikleri açılmış olan kiriş numunesi (S1-220 numunesi)

3.3.3. Ankraj deliklerinin temizlenmesi

Açılan deliklerde toz birikimi oluştuğundan 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 (Müsevitoğlu, 2019; Müsevitoğlu ve ark., 2020). Şekil 3.34'te kirişte açılan deliklerin temizlenme uygulaması gösterilmiştir.

Yükleme

Şekil 3.34. Basınçlı hava yardımıyla deliklerin temizlenmesi

3.3.4. Ankraj deliklerinin epoksi ile doldurulması

Matkap ile açılan delikler basınçlı hava yardımıyla temizlendikten sonra iki bileşenli polyester bazlı Dubell-F.1311 marka epoksi malzemesi ile delikler doldurulmuştur. Bu işlem için epoksi tabancası ve iki bileşenli epoksi malzemesinin karıştırılmasını sağlayan epoksi karıştırıcı uçlar kullanılmıştır. Şekil 3.35'te deliklerin doldurulması sırasında epoksi tabancasının kullanıldığı görülmektedir.

Şekil 3.35. Ankraj deliklerinin epoksi ile doldurulması

3.3.5. MÇD'lerin ankraj deliklerine yerleştirilmesi

Delikler epoksi ile doldurulduktan sonra epoksi hızlı priz aldığından dolayı kısa sürede mekanik dikişler çekiç yardımıyla deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3.36). Epoksi ürün kullanım kılavuzu dikkate alınarak kür alması için 1 gün boyunca oda sıcaklığında (22 °C) bekletilmiştir. Böylece mekanik çelik dikiş ile güçlendirme uygulaması

tamamlanmıştır. Şekil 3.37'de güçlendirme uygulaması tamamlanmış kirişlere ait görseller verilmiştir.

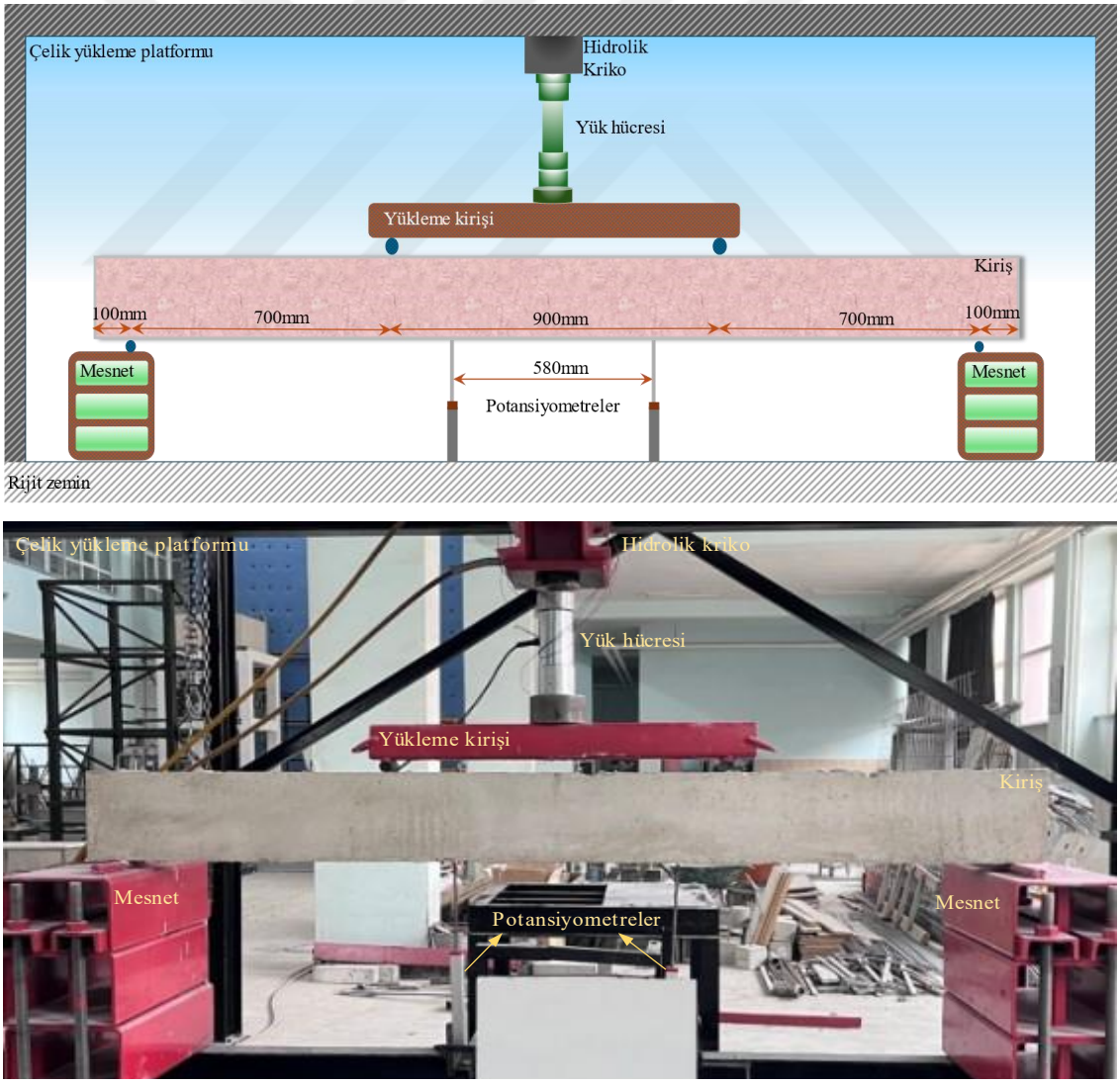
Şekil 3.36. Mekanik çelik dikişlerin deliklere yerleştirilmesi

Şekil 3.37. Mekanik çelik dikiş uygulaması tamamlanmış kiriş numuneleri

3.4. Deney Düzeneği

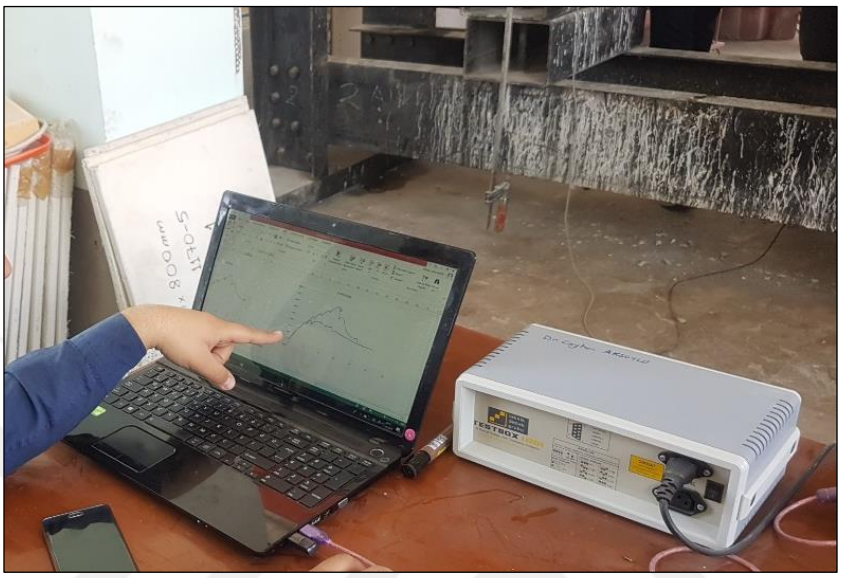
Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarında yapılmış olup, deney numunelerinin geometrik boyutları ve donatı özellikleri, laboratuvardaki mevcut imkânlar göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Çalışmada bütün deney numuneleri, 500 kN kapasiteli rijit çelik yükleme çerçevesi kullanılarak düşey yük etkisi altında test edilmiştir. Şekil 3.38'de görüldüğü üzere, mesnet bölgeleri standartlara uygun olan dört noktalı eğilme düzeneği kullanılarak deneyler yapılmıştır. Gerçek bir binada kiriş üzerindeki yükler yayılı yük olmasına rağmen, laboratuvar imkânları gereği bu şartın oluşturulamamasından dolayı moment diyagramı, yayılı yüke yakın olan iki noktadan yükleme yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Hidrolik kriko yardımıyla aktarılan P büyüklüğündeki yük, iki destek arası 900 mm olan yükleme kirişi aracılığıyla P/2 büyüklüğünde iki eşit tekil yük olarak

kiriş numunelerine simetrik bir şekilde iletilmiştir. Tüm deney numunelerinde a_v/d (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) oranı 3.26 olarak alınmıştır. 4 noktalı yükleme deneylerinde genel olarak deney elemanlarının yükleme protokolü için ilk aşamada 10 kN'luk artışlarla yük kontrollü yükleme yapılır ve kiriş elemanlarında sünekliğin gözlenmesine bağlı olarak 10 mm artışlarla deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek deney sonlandırılır. Ancak, bu çalışma kapsamındaki kirişlerde süneklik gözlenmediğinden, deneylere yük kontrollü olarak devam edilmiş ve kirişlerde kesme kırılması meydana gelmesi ile deney sonlandırılmıştır. Monotonik olarak yükleme yapılan her 10 kN'luk yük artışı sonunda kısa bir süreliğine kiriş üzerinde oluşan çatlakların işaretlenmesi için beklenilmiştir. Kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanan ve üretimi yapılan kiriş numunelerinde, ilk olarak aynı özelliklere sahip referans kirişinde kesme hasarı gözlemlendikten sonra güçlendirme uygulamalarına geçilmiştir.



Şekil 3.38. Deney düzeneği

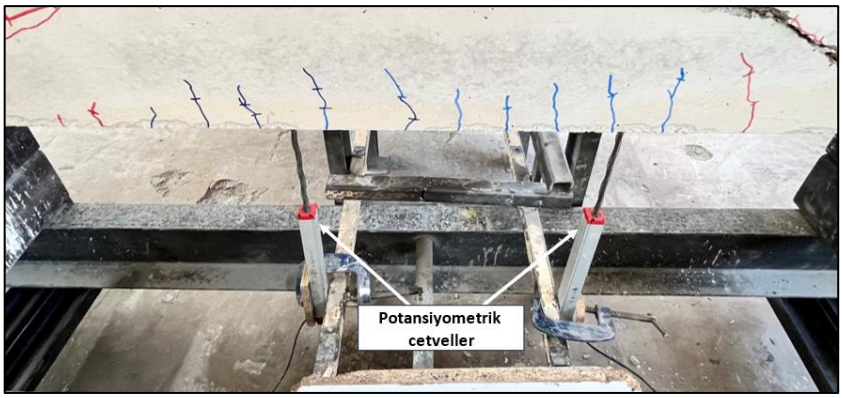
Deneyler sırasında bilgisayar destekli 8 kanallı veri okuma sistemi kullanılmış, gerekli yük ve yer değiştirme okumaları yapılmış ve bu veriler kayıt altına alınmıştır. Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi sayesinde deneyle eşzamanlı olarak yük ve deplasman grafiği çizilmiştir. Şekil 3.39'da kullanılan veri toplama sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi

Deneylerde düşey yük ölçümleri yükleme kirişin ortasına yerleştirilen 300 kN kapasiteli yük ölçer ile (Loadcell) yapılmıştır. Yer değiştirmeler ise, deney numunesinin orta noktasından 290 mm sağ ve soluna yerleştirilen 2 adet potansiyometrik lineer cetvel kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 3.40'ta deneylerde kullanılan yük hücresi ve Şekil 3.41'de potansiyometrik lineer cetveller gösterilmiştir.

Şekil 3.40. Deneylerde kullanılan 300 kN kapasiteli yük hücresi



Şekil 3.41. Deneylerde kullanılan potansiyometrik lineer cetveller

3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

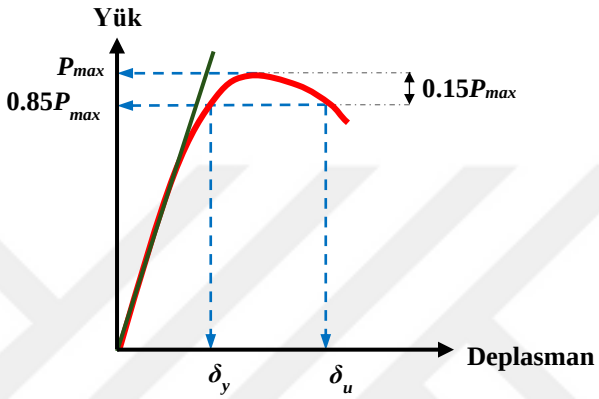
Her bir numunenin deney aşamasında, yük hücresinden alınan yük değerleri ile numune orta noktasına yerleştirilen iki adet potansiyometrik cetvellerden okunan deplasman değerleri veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Deney sonunda .txt dosyası olarak elde edilebilen veriler excele aktarılmıştır. Ayırca, deney esnasında elde edilen yük ve deplasman verileri arasındaki ilişkiyi gösteren yük-deplasman eğrileri, bilgisayar ekranında anlık olarak çizilmiş ve davranış değişimi gözlenmiştir. Bu grafikler esas alınarak, numunelerin süneklik, enerji tüketimi ve rijitlikleri çeşitli yaklaşımlar kullanılarak hesaplanmıştır.

3.5.1. Sünekliğin değerlendirilmesi

Süneklik, yük altındaki taşıyıcı sistem elemanının yük taşıma kapasitesinde belirgin düzeyde düşüş olmadan büyük deplasman/deformasyon yapabilme yeteneği olarak ifade edilmektedir. Yapı elemanının sünekliğinin sayısal olarak ifade edilmesi için süneklik katsayısı (μ) kullanılmaktadır. Betonarme bir kiriş numunesinin sünek davranış sergilediğini belirtmek için denge altı kirişlerde süneklik katsayısının en az 4~5 civarında olması gerekir (Wang ve Belarbi, 2013). Süneklik katsayısı, nihai deplasman değerinin akma noktasındaki deplasman değerine oranı olarak hesaplanır. Burada nihai deplasman değeri (Şekil 3.42), maksimum yük seviyesine ulaşıldıktan sonra yük seviyesinin %15 oranına kadar düştüğü andaki maksimum deplasman değerini temsil etmektedir. Akma noktasındaki deplasman değeri ise, yük değerinin maksimum seviyesinin %85'ine ulaşıldığı anda kaydedilen deplasman değeridir (Bernardo ve ark., 2016). Şekil 3.42'de

süneklik hesabı için kullanılan değerler grafik üzerinde gösterilmiştir. Süneklik katsayısı, Denklem 3.1'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. 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).

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{1}$$

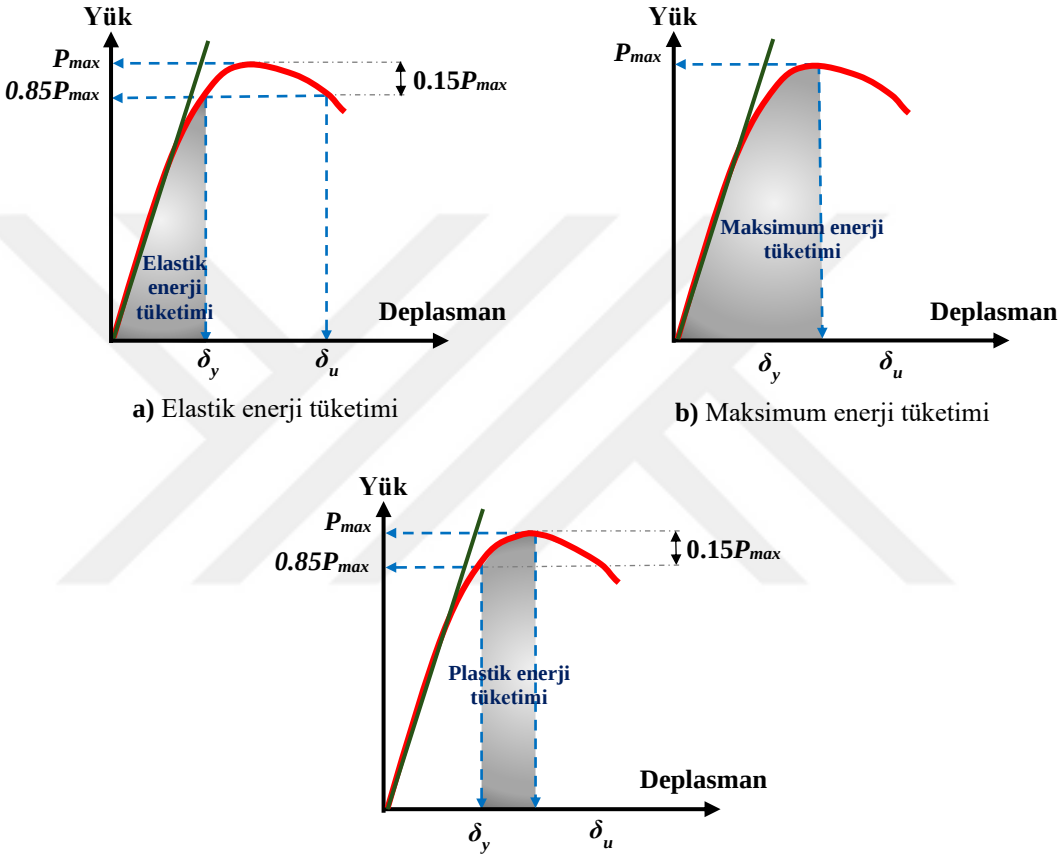


Şekil 3.42. Süneklik katsayısı için yük-deplasman grafiği

3.5.2. Enerji tüketme kapasitesinin değerlendirilmesi

Betonarme elemanların enerji tüketim kapasiteleri, yük-deplasman eğrisi altında kalan alanların kümülatif olarak toplanmasıyla hesaplanır. Her bir deney numunesi için akma noktasında, maksimum yük değerinde ve plastik seviyedeki enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Akma enerji tüketimi (elastik) için, akma noktasına kadar eğri altında kalan alan; maksimum enerji tüketimi için ise, maksimum yük değerine kadar eğri altında kalan alan toplanarak hesaplanmıştır. Plastik enerji tüketimi, maksimum enerji tüketiminden elastik enerji tüketiminin çıkarılmasıyla elde edilmiştir (Liu ve Dai, 2021). Kiriş numunelerinin tamamı ani kesme hasarı nedeniyle göçmüş olduğundan, plastik enerji tüketimi hesaplanırken maksimum yük ile maksimum yük seviyesinin %15'e kadar düştüğü seviye arasındaki enerji tüketimi dikkate alınmamıştır.Yani, ani ve gevrek bir kırılmanın maksimum yük seviyesinden sonraki enerji tüketiminin yapının ayakta kalmasına katkı sağlamayacağı göz önünde bulundurularak, plastik enerji tüketiminin bu yöntemle hesaplanması uygun görülmektedir (Saatci ve Vecchio, 2009). Enerji tüketim kapasitelerinin hesaplanmasına yönelik şematik gösterimler Şekil 3.43'de gösterilmiştir.

Bu gösterimde, ilk olarak teorik akma noktası olarak kabul edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesine kadar eğri altında kalan alan toplanarak elastik enerji tüketimi (Şekil 3.43(a)) hesaplanmıştır. Ardından maksimum enerji tüketimi (Şekil 3.43(b)), maksimum yük (P_{max}) seviyesine kadar eğri altında kalan alanın toplanmasıyla hesaplanmıştır. Plastik enerji tüketimi (Şekil 3.43(c)) ise, maksimum enerji tüketiminden elastik enerji tüketimi çıkarılarak bulunmuştur (Arslan ve ark., 2006).



a) Elastik enerji tüketimi

b) Maksimum enerji tüketimi

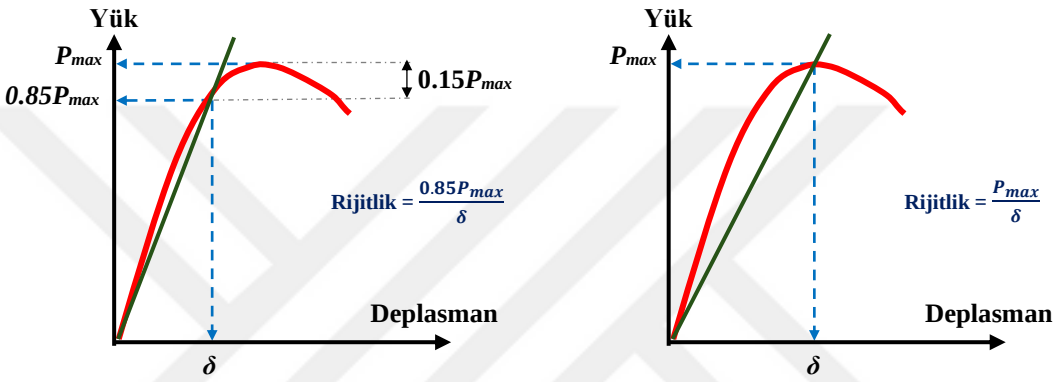
c) Plastik enerji tüketimi

Şekil 3.43. Enerji tüketim kapasitelerinin hesaplanması

3.5.3. Rijitliğin değerlendirilmesi

Rijitlik, yapı elemanının kuvvet etkisi altında meydana gelen deplasman/deformasyonlara karşı gösterdiği direnci ifade eder. Başka bir deyişle, yapıya gelen yükler altında yapının mevcut konumunu koruması ve denge halinde kalabilmesi olarak da tanımlanabilir (Czaderski ve ark., 2005). Bu çalışma kapsamında, deney elemanları için rijitlik değerleri Şekil 3.44'te verildiği gibi yük-deplasman eğrilerinden elde edilmiştir. Rijitlik değerleri, akma noktasında ve maksimum yük seviyesinde

hesaplanarak değerlendirmeler yapılmıştır. Akma noktasındaki rijitlik değeri (Şekil 3.44a) için, teorik olarak akmanın başladığı kabul edilen noktadan ($0.85P_{max}$) çizilen doğrunun eğimiyle hesaplama yapılmıştır. Bu durum, aynı zamanda akma noktasındaki yük değerinin deplasman değerine oranı olarak da ifade edilebilir. Maksimum yükteki rijitlik değeri (Şekil 3.44b) ise, orijin noktasından maksimum yük noktasına (P_{max}) çizilen doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Başka bir deyişle, maksimum yük değerinin bu yüke karşılık gelen deplasman değerine oranı hesaplanmıştır (Meda ve ark., 2012). Şekil 3.44'te rijitliklerin hesaplanmasına ilişkin şematik gösterimler sunulmuştur.



a) Akma Rijitliği **b)** Maksimum yükteki rijitlik

Şekil 3.44. Rijitliklerin hesaplanması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında, 1 tanesi referans kesme kirişi ve 7 tanesi Mekanik Çelik Dikişlerle (MÇD) güçlendirilmek üzere toplamda 8 adet kiriş numunesi 4 noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Çizelge 3.1'de deneysel çalışmada yer alan numunelerin detayları ve isimleri tablo halinde sunulmuştur. Bu çalışmada, diğer tüm parametreler sabit tutulup sadece kirişe uygulanan MÇD aralıkları (*d*/5'ten *d*'ye) değiştirilerek, dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri açısından değişimleri araştırılmıştır. Deney kirişlerinde, MÇD aralığının kiriş kesme dayanımına olan etkisini gözlemleyebilmek için kesme kapasitesi düşük, eğilme kapasitesi ise olabildiğince yüksek seçilmiştir. Yapılan bu kiriş donatı tasarımıyla referans ve güçlendirilmiş numunelerin tamamında kesme göçmesi beklendiğinden dolayı, yaklaşık 10 kN'luk artışlarla yük kontrollü protokol dikkate alınmıştır. Kiriş elemanlarında göçme durumu oluştuktan sonra deney sonlandırılmıştır. Deney esnasında, yapılan her monotonik yükleme sonunda kirişlerde oluşan çatlakların işaretlenmesi için beklenmiştir. Tüm deney kirişlerinde aynı yükleme protokolü uygulanmıştır. Sisteme verilen yük, 200 kN kapasiteli yük hücresi (Load cell) yardımıyla ölçülürken; yer değiştirmeler, kirişin alt orta bölgesine yerleştirilen iki adet yer değiştirme ölçerler/potansiyometrik cetveller (Linear Variable Differential Transformer) ile ölçülmüştür (Şekil 3.40). Potansiyometrik cetveller arası mesafe deney düzeneğinden kaynaklı olarak 580 mm olarak dikkate alınmıştır. Ancak, basit geometrik hesap ile kirişin tam orta noktasındaki deplasman değeri hesap edilerek, her bir deney kirişi için yük-deplasman grafiği elde edilmiştir.

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılması ve birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için her deney elemanı için aşağıdaki grafik ve şekiller sırasıyla verilmiştir;

- ✓ Göçme durumuna geçene kadar olan çatlak oluşum aşamaları
- ✓ Yük-deplasman grafiği
- ✓ Göçmeden sonraki detaylı hasar durumları

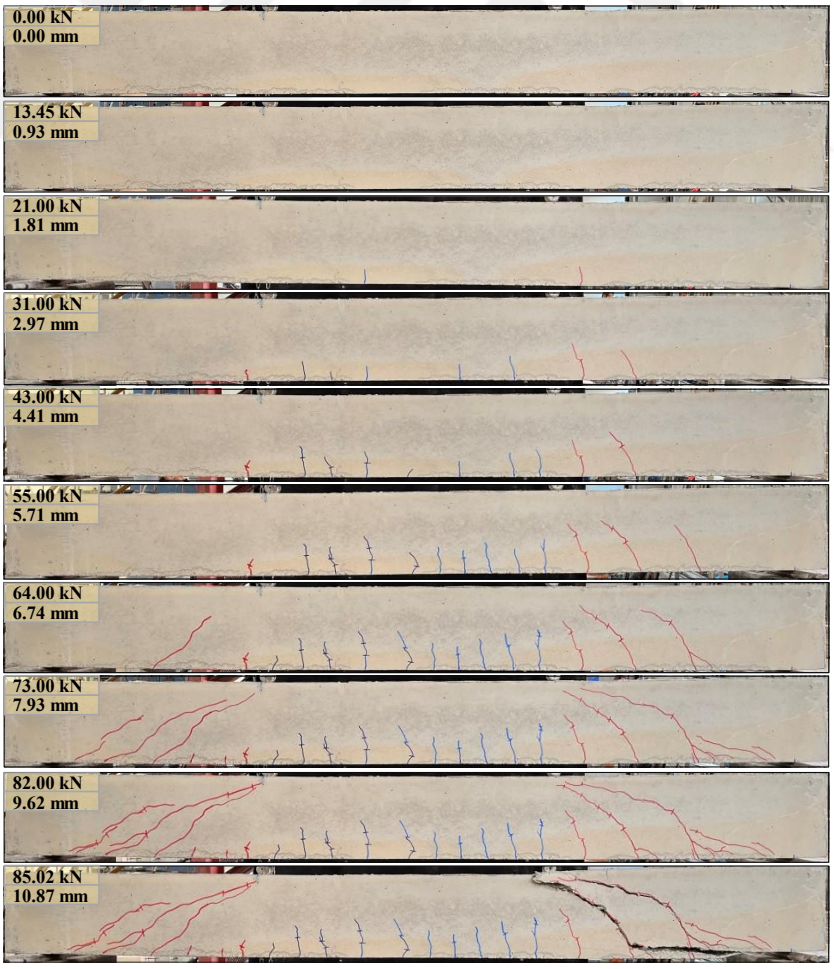
Her bir deneyin sonuçları verildikten sonra, tüm deney elemanları için karşılaştırma yapılarak dayanım, süneklik, rijitlik, enerji tüketim kapasiteleri ve göçme durumları açısından değerlendirmeler yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Deneylerin bireysel sonuçları ve bu sonuçların karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmesi farklı başlıklarda ele alınmıştır.

4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları

Bu bölümde deney kirişlerinin bireysel sonuçları sunulmuştur. Bölüm 4.2'de burada sunulan tüm deney sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

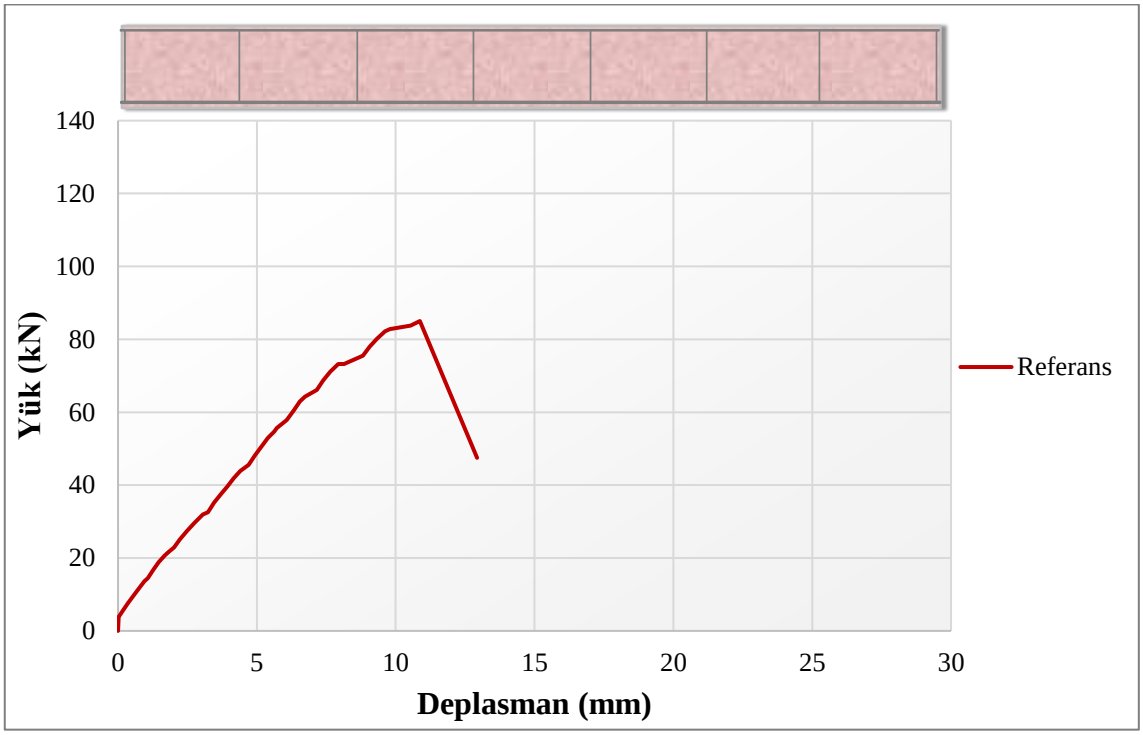
4.1.1. Referans numune

Çalışma kapsamında ilk olarak güçlendirme uygulaması bulundurmayan referans numune test edilmiştir. Referans kiriş numunesinde, yük miktarı 21.00 kN seviyesine ulaştığında kiriş orta bölgesinde ilk eğilme çatlağı ve kesme açıklığında ise ilk kesme çatlağı meydana gelmiştir. Bu aşamadaki deplasman değeri 1.81 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş numunesi 85.02 kN yük ve 10.87 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında ani ve gevrek bir şekilde oluşan kesme hasarından (eğik çekme kırılması) göçmüştür. Şekil 4.1'de referans kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.

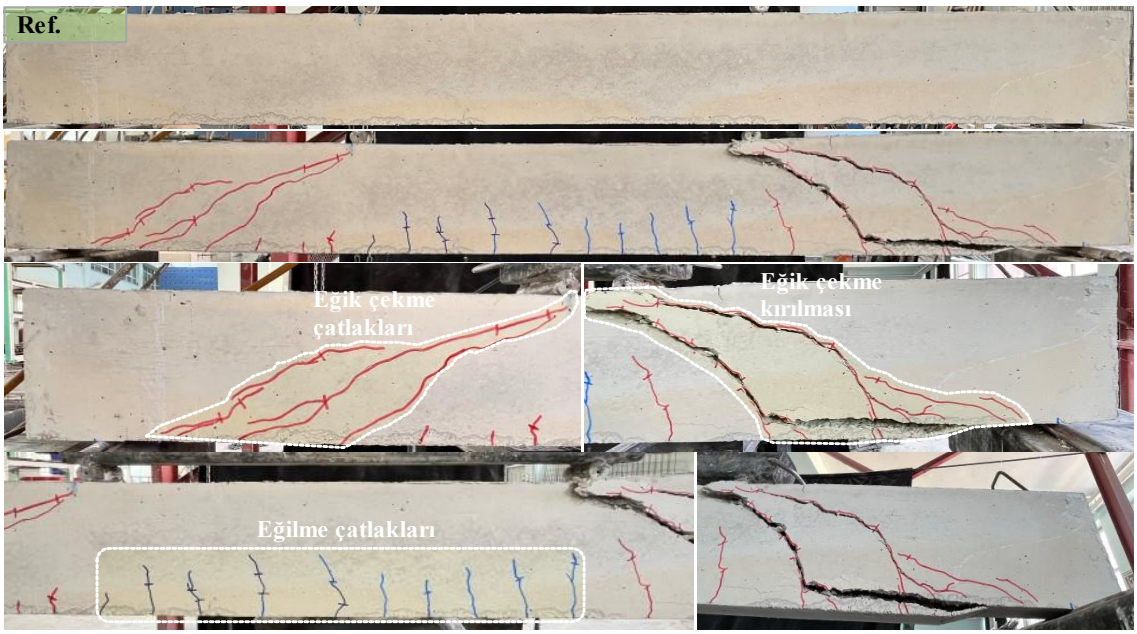


Şekil 4.1. Referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Kiriş numunesi yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra kirişte oluşan hasarlar detaylıca incelenmiştir. Şekil 4.3'te referans kiriş numunesinin detaylı hasar görüntüleri sunulmuştur.



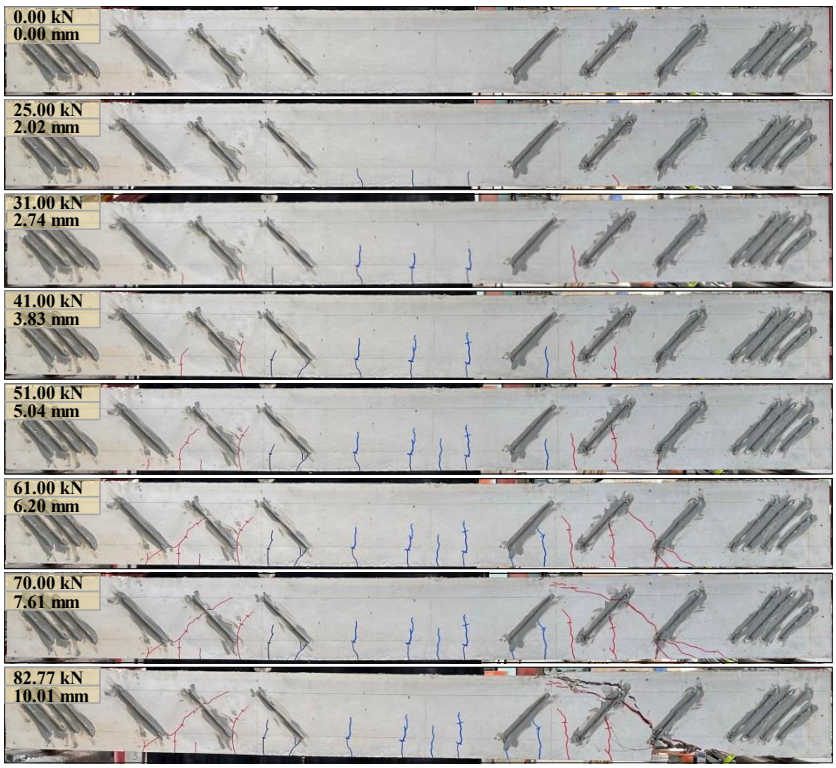
Şekil 4.2. Referans kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.3. Referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

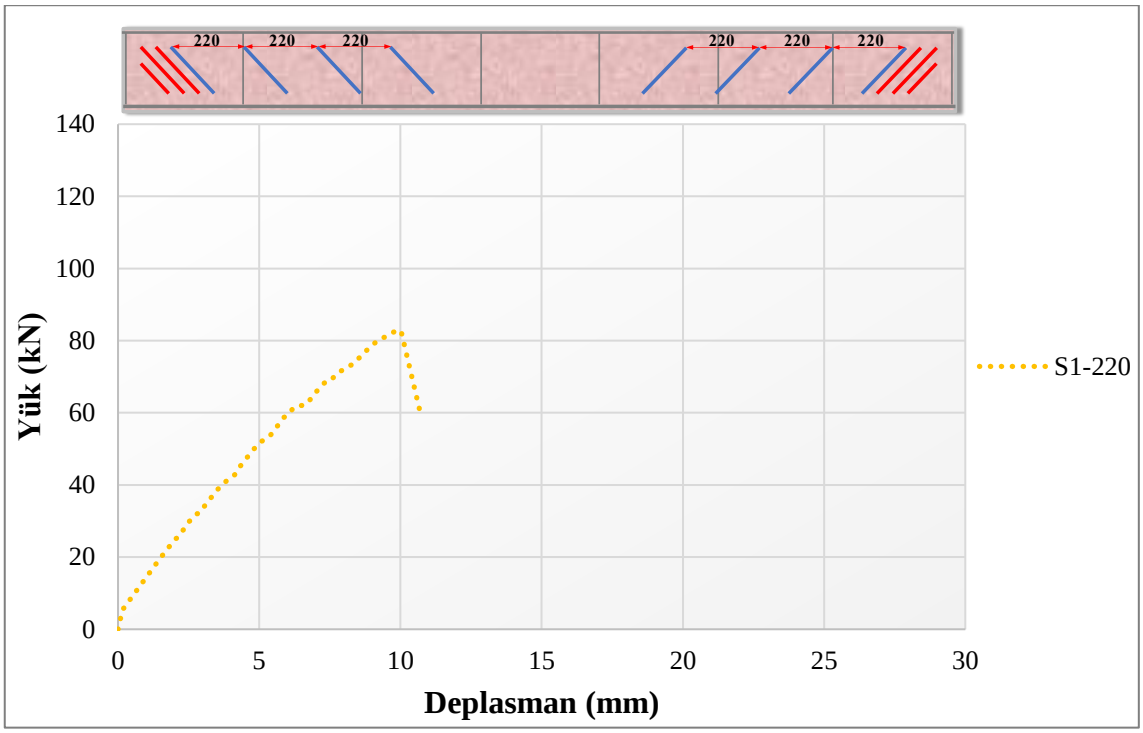
4.1.2. S1-220 numunesi

S1-220 numunesi, 220 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu kiriş numunesinde mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD dışında, kesme açıklığında 4 adet MÇD bulunmaktadır. S1-220 numunesi, deney kirişleri arasında en az MÇD sayısı (MÇD aralığı en fazla) bulunduran kiriş numunesidir. Yapılan bu kiriş deneyinde yük miktarı 25.00 kN ve deplasman değeri 2.02 mm seviyesine ulaştığında, kiriş orta bölgesinde ilk eğilme çatlağı ve kesme açıklığında ise ilk kesme çatlağı (kılcal seviyede) oluştuğu gözlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde eğilme çatlakları kiriş tarafsız eksenine doğru ilerlerken, kesme çatlakları göçmeden kısa süre önce belirgin hale gelmiştir. Kiriş numunesi 82.77 kN yük ve 10.15 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında ani ve gevrek bir şekilde iki MÇD arasından yukarıya doğru ilerleyen kesme kırılmasından (eğik çekme kırılması) dolayı göçmüştür. S1-220 numunesinde MÇD uygulaması sırasında delikler açılırken oluşan kılcal düzeydeki hasarlardan dolayı, referans kiriş numunesine göre %2.65 kesme kapasitesinde azalma gözlenmiştir. Şekil 4.4'te S1-220 numunesinde deney boyunca meydana gelen çatlak oluşum aşamaları gösterilmiştir.

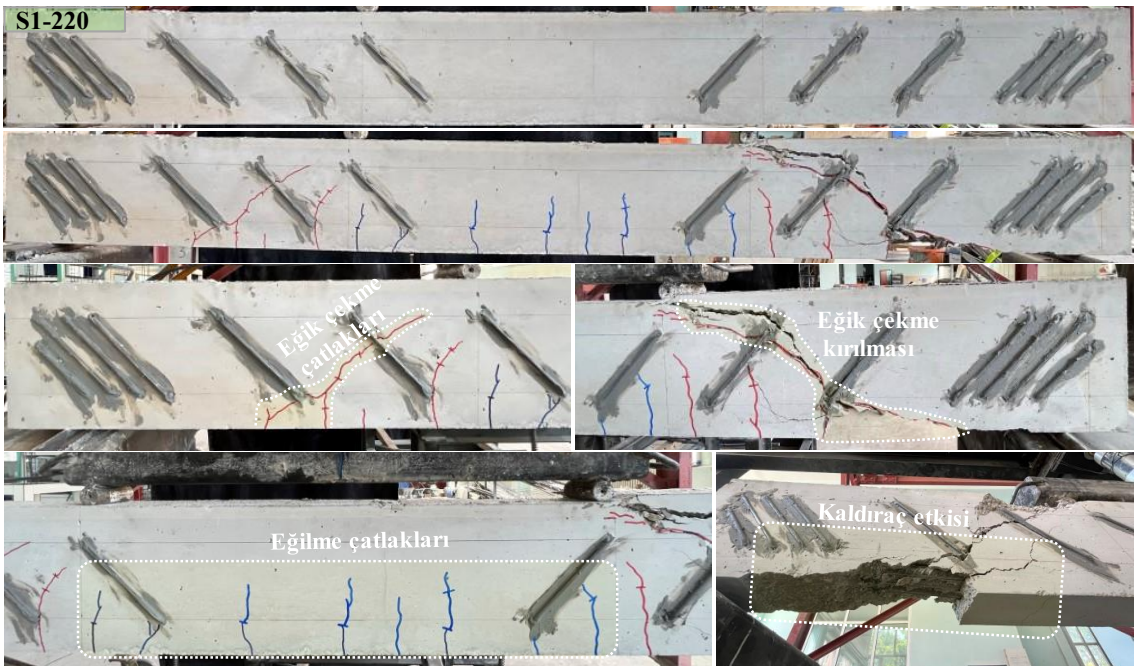


Şekil 4.4. S1-220 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S1-220 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.5'te sunulmuştur. Güçlendirilmiş kiriş numunesi, yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra kirişte oluşan hasarlar detaylıca incelenmiştir. Şekil 4.6'da S1-220 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri gösterilmiştir.



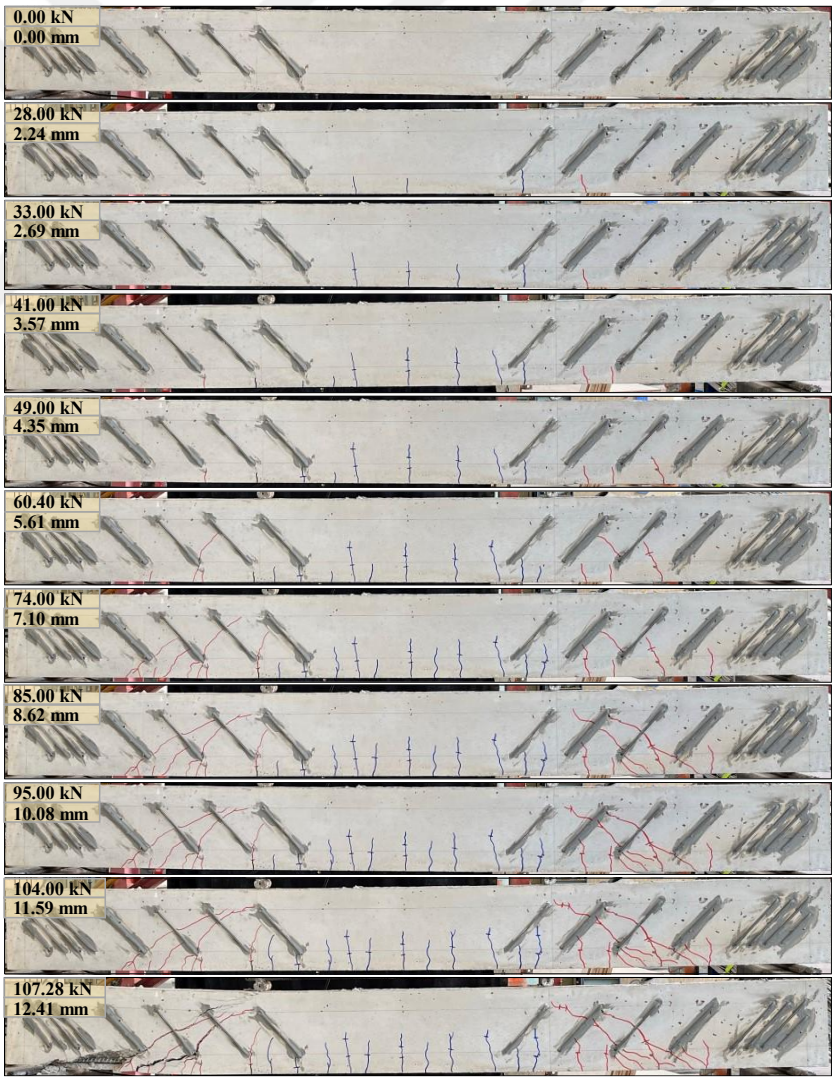
Şekil 4.5. S1-220 numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.6. S1-220 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

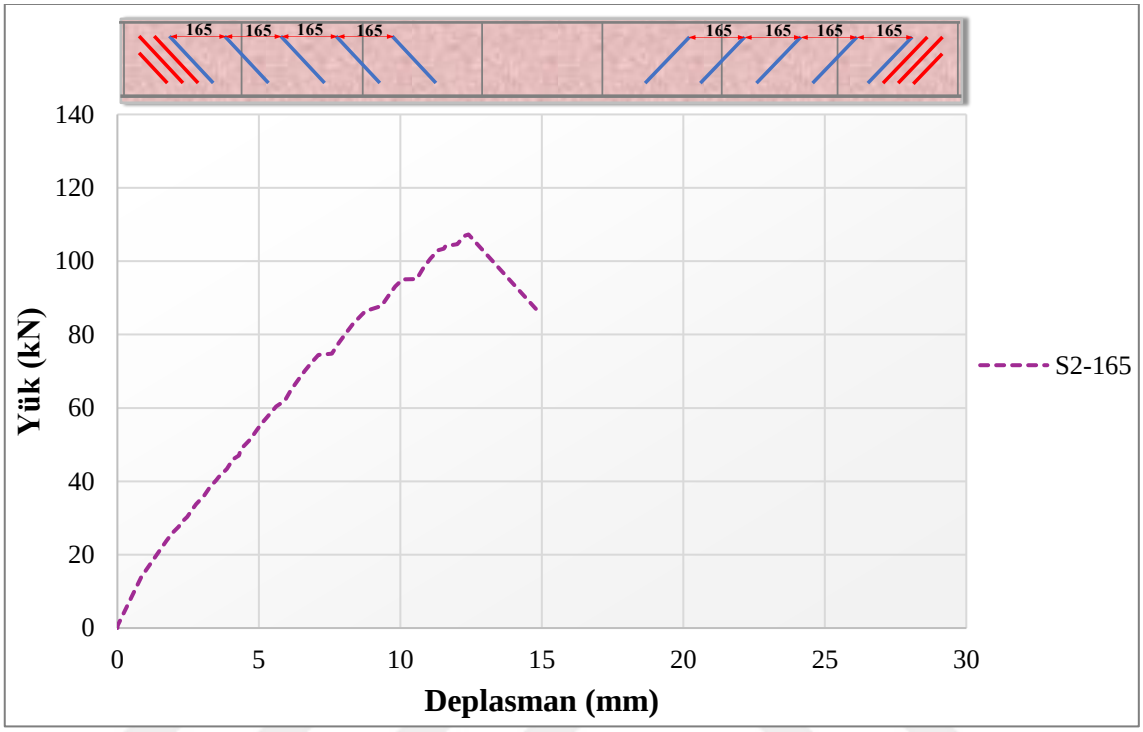
4.1.3. S2-165 numunesi

S2-165 numunesi, 165 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu kiriş numunesinde mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD dışında, kesme açıklığında 5 adet MÇD bulunmaktadır. S2-165 kiriş numunesinde, yük miktarı 28.00 kN seviyesine ulaştığında kiriş orta bölgesinde ilk eğilme çatlağı ve kesme açıklığında ise kılcal düzeyde ilk kesme çatlağı meydana gelmiştir. Bu aşamadaki deplasman değeri 2.25 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş numunesi 107.28 kN yük ve 12,41 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklığında oluşan kesme hasarından (eğik çekme kırılması) göçmüştür. S2-165 numunesinde referans kiriş numunesine göre %26.18 kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Şekil 4.7'de S2-165 kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları gösterilmiştir.

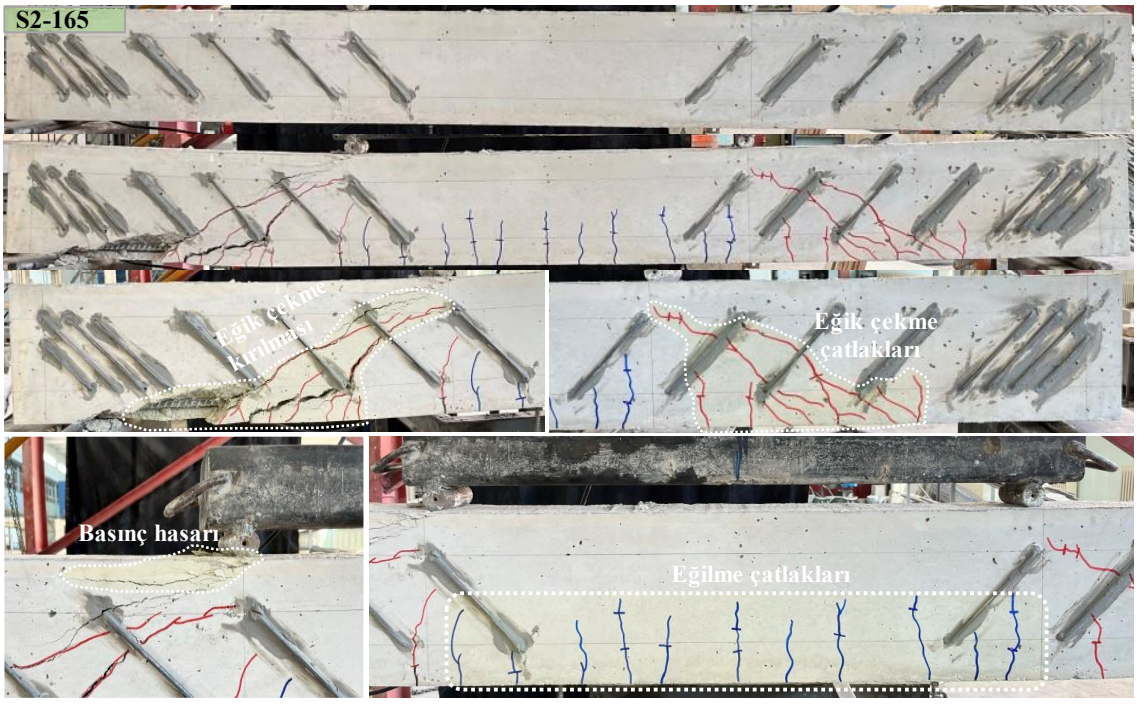


Şekil 4.7. S2-165 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

Deney sırasında eş zamanlı olarak çizilen yük-deplasman grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.9'da S2-165 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri sunulmuştur.



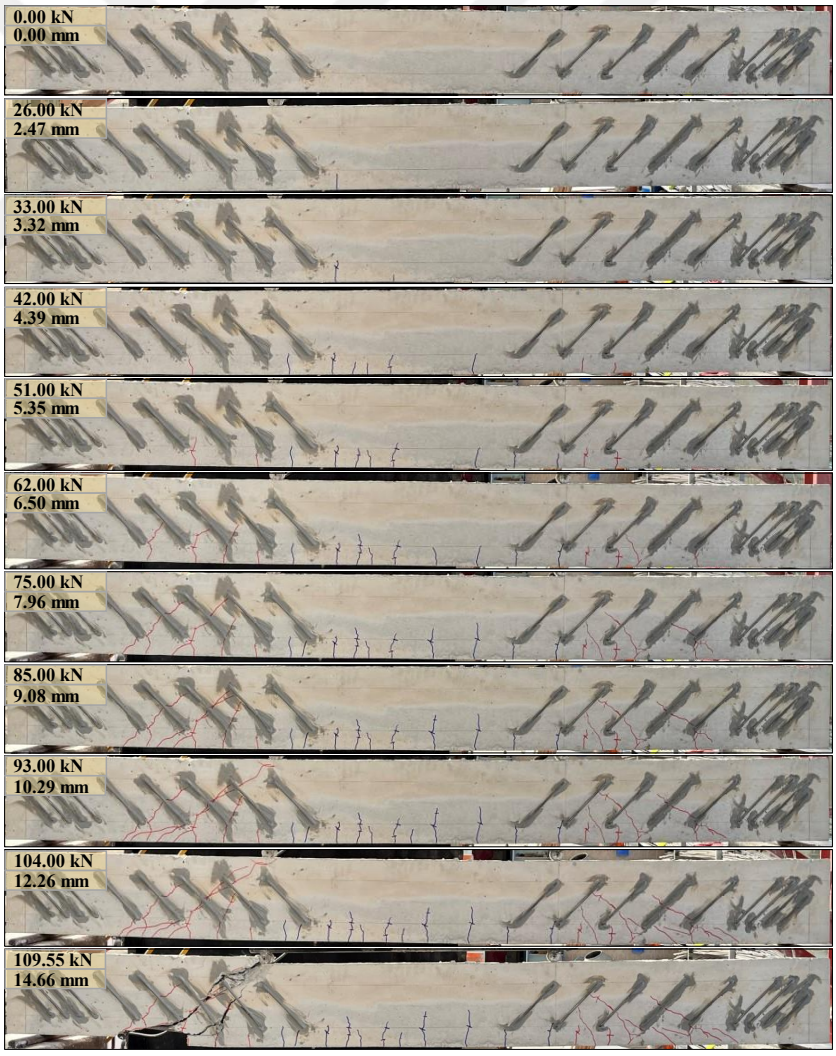
Şekil 4.8. S2-165 numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.9. S2-165 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

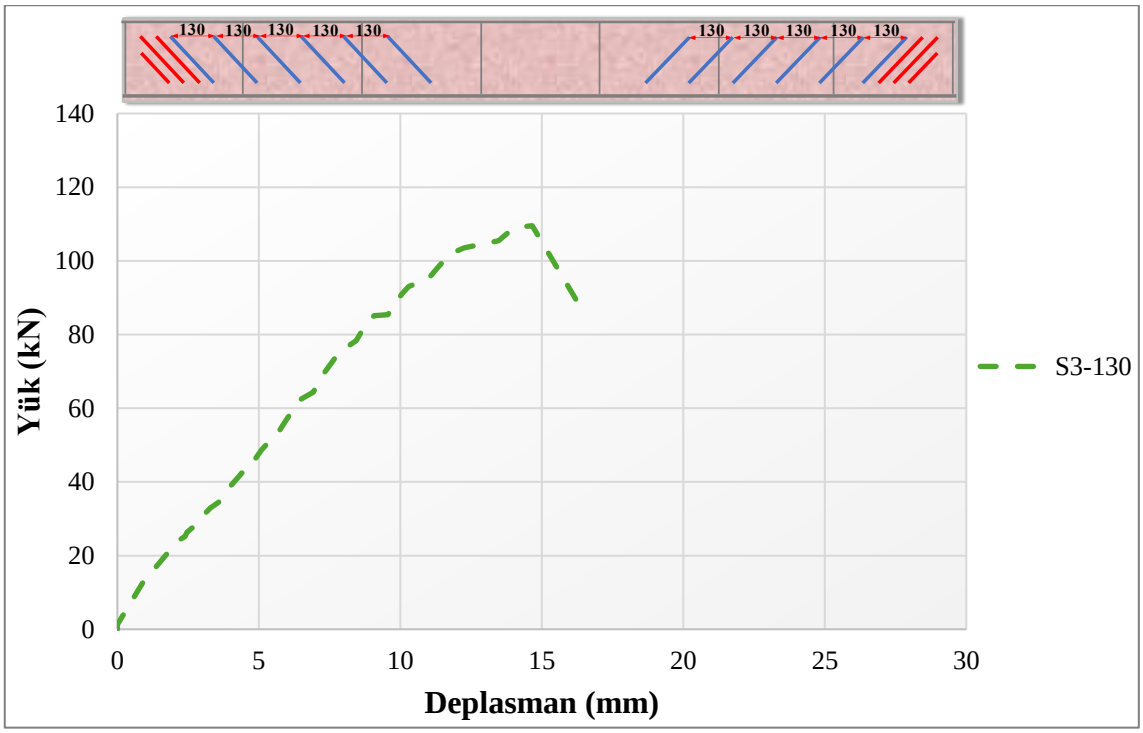
4.1.4. S3-130 numunesi

S3-130 numunesi, 130 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu kiriş numunesinde mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD dışında, kesme açıklığında 6 adet MÇD bulunmaktadır. S3-130 kiriş deneyinde 26.00 kN yük ve 2.47 mm deplasman seviyesine ulaştığında, kiriş orta bölgesinde ilk eğilme çatlağı görülmüştür. İlk kesme çatlağı ise 42.00 kN yük seviyesinde ve 4.39 mm deplasman değerinde gözlenmiştir. Kiriş numunesi 109.55 kN yük ve 14.66 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklığında oluşan kesme hasarından (eğik çekme kırılması) göçmüştür. S3-130 numunesinde referans kiriş numunesine göre %28.85 kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Şekil 4.10'da S3-130 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları gösterilmiştir.

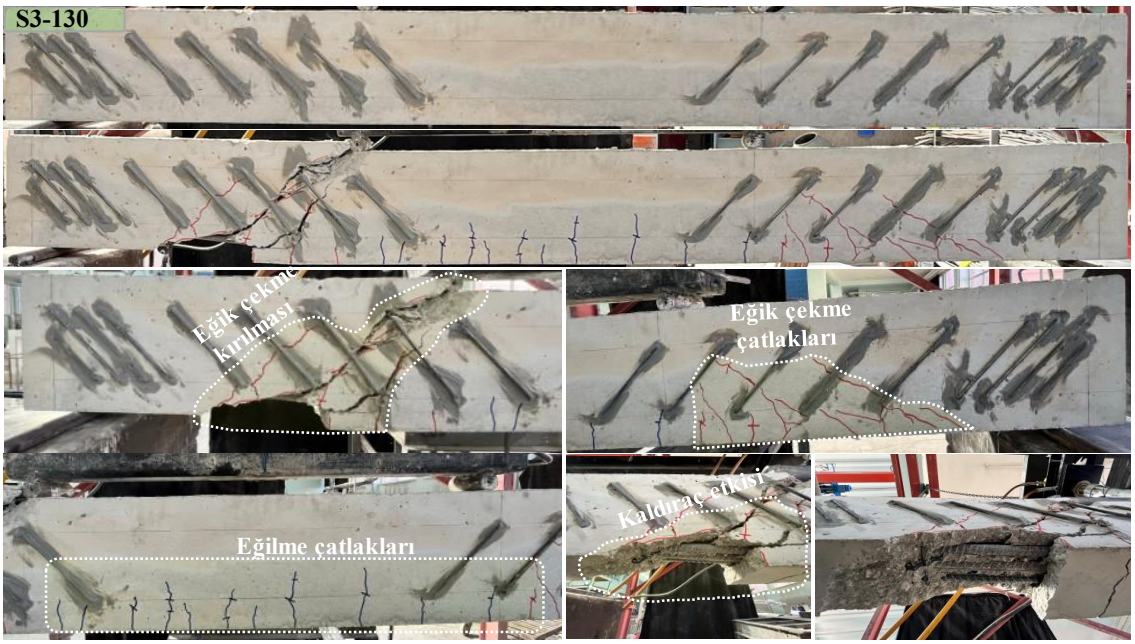


Şekil 4.10. S3-130 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S3-130 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Kesme hasarından göçmeye uğrayan kiriş numunesinde meydana gelen çatlaklar ve hasarlar, deney sonrasında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.12'de S3-130 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.11. S3-130 numunesine ait yük-deplasman grafiği



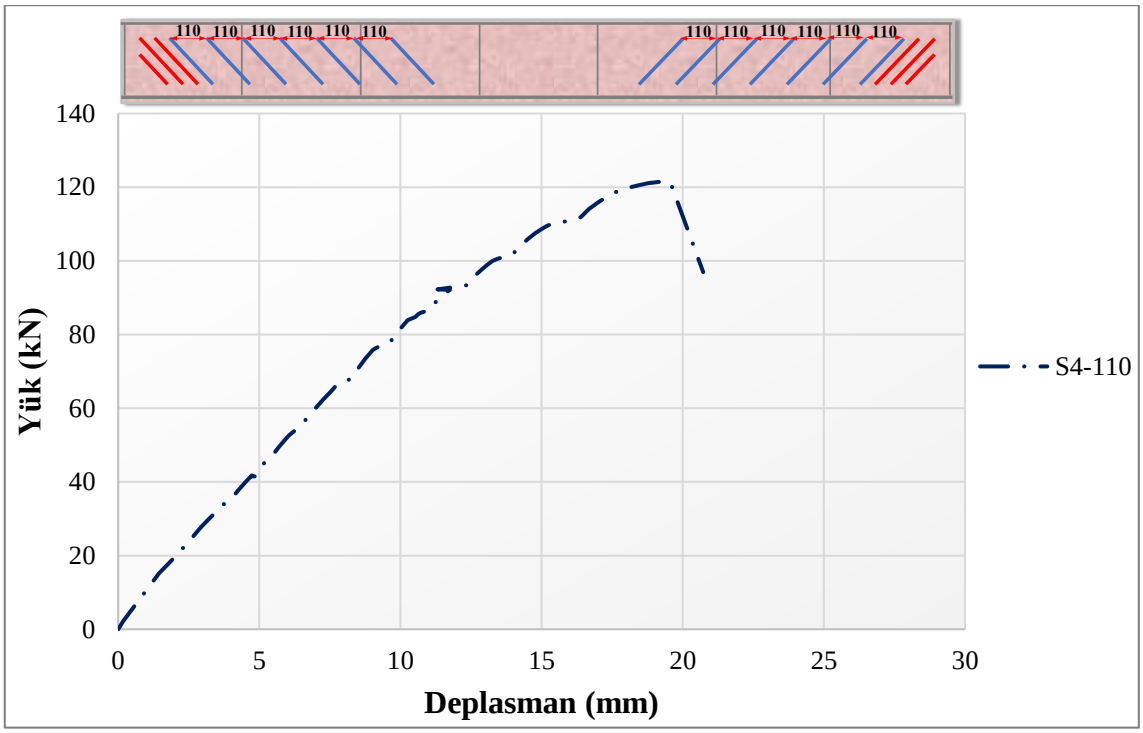
Şekil 4.12. S3-130 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.1.5. S4-110 numunesi

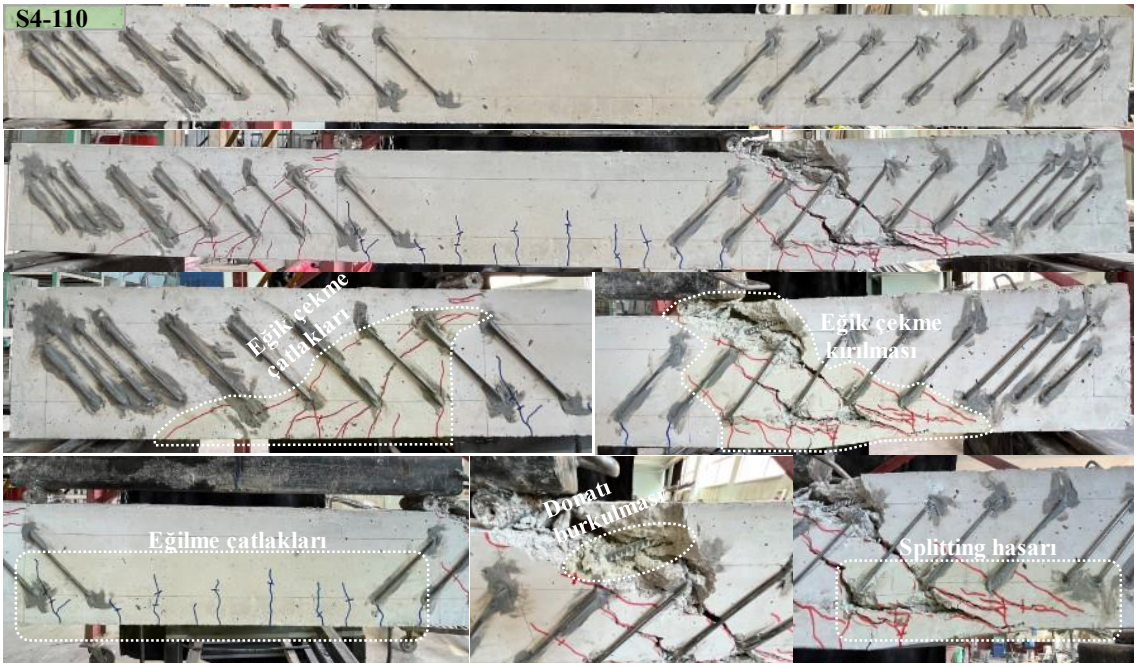
S4-110 numunesi, 110 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu numunede mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD dışında, kesme açıklığında 7 adet MÇD bulunmaktadır. S4-110 kiriş numunesinde, yük miktarı 21.80 kN ve deplasman değeri 2.24 mm seviyesine geldiğinde ilk eğilme çatlağı ve ilk kesme çatlağı gözlenmiştir. Kiriş numunesi 121.46 kN yük ve 19.18 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında oluşan splitting (aderans hatası) ve kesme hasarının (eğik çekme kırılması) ortak etkisiyle göçmüştür. Şekil 4.13'te S4-110 kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları sunulmuştur.

Şekil 4.13. S4-110 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S4-110 kiriş numunesinin deney sırasında eş zamanlı olarak çizilen yük-deplasman grafiği, Şekil 4.14'te sunulmuştur. S4-110 numunesinde, referans kiriş numunesine kıyasla %42.86 kesme kapasitesi artışı gözlenmiştir. Şekil 4.15'te S4-110 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri gösterilmiştir.



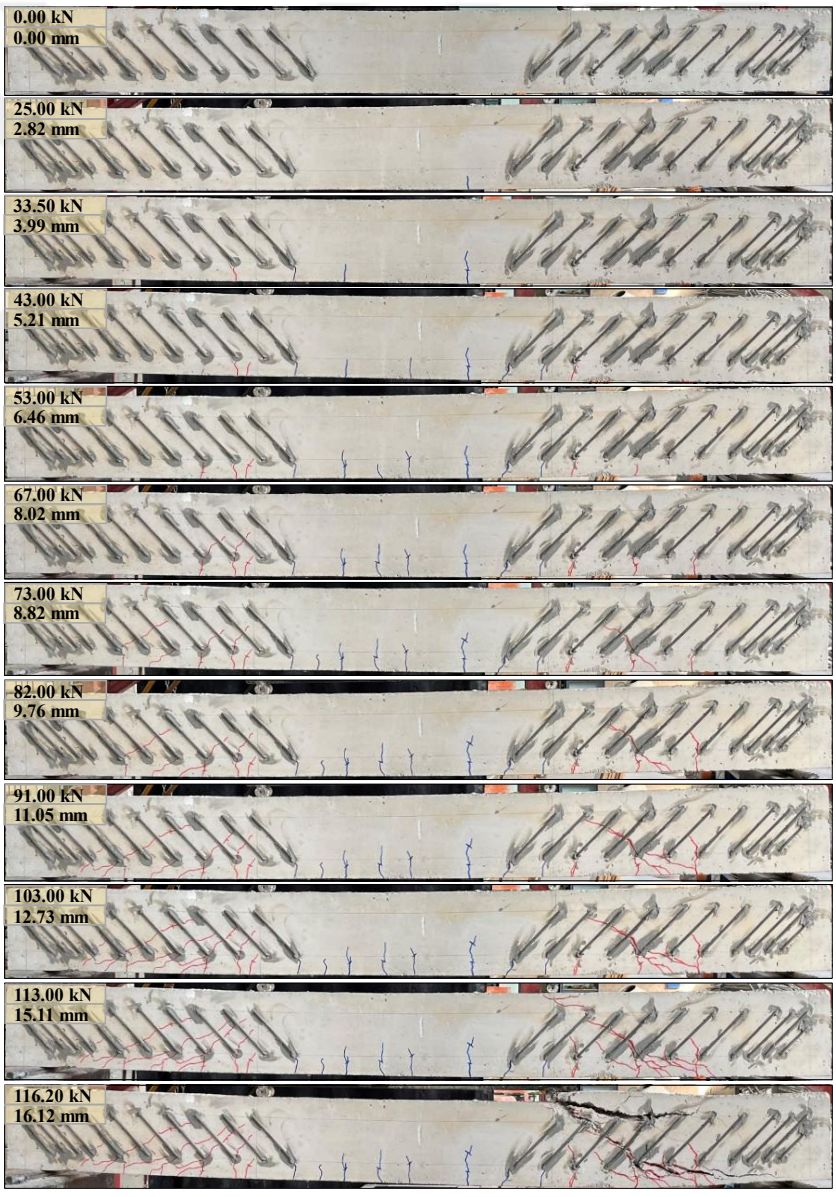
Şekil 4.14. S4-110 numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.15. S4-110 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

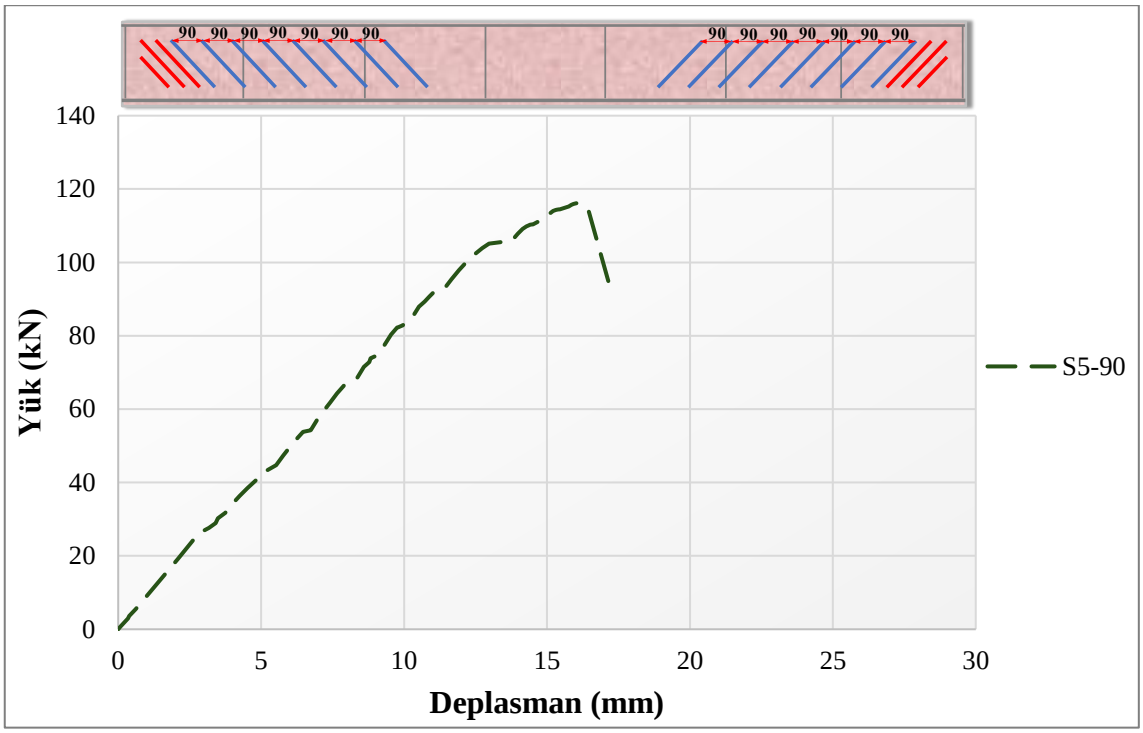
4.1.6. S5-90 numunesi

S5-90 numunesi, 90 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu numunede mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD dışında, kesme açıklığında 8 adet MÇD bulunmaktadır. S5-90 numunesinde, 25.00 kN yük ve 2.82 mm deplasman seviyesinde ilk eğilme çatlağı, 33.50 kN yük ve 3.35 mm deplasman seviyesinde ilk kesme çatlağı görülmüştür. Kiriş numunesi 116.20 kN yük ve 16.12 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında oluşan splitting (aderans hatası) ve kesme hasarının (eğik çekme kırılması) ortak etkisiyle göçmüştür. Şekil 4.16'da S5-90 kiriş numunesinin çatlak oluşum aşamaları sunulmuştur.



Şekil 4.16. S5-90 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S5-90 kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği, Şekil 4.17'de verilmiştir. S5-90 numunesinde, referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesinde %36.67 artış gözlenmiştir. Şekil 4.18'de S5-90 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri sunulmuştur.

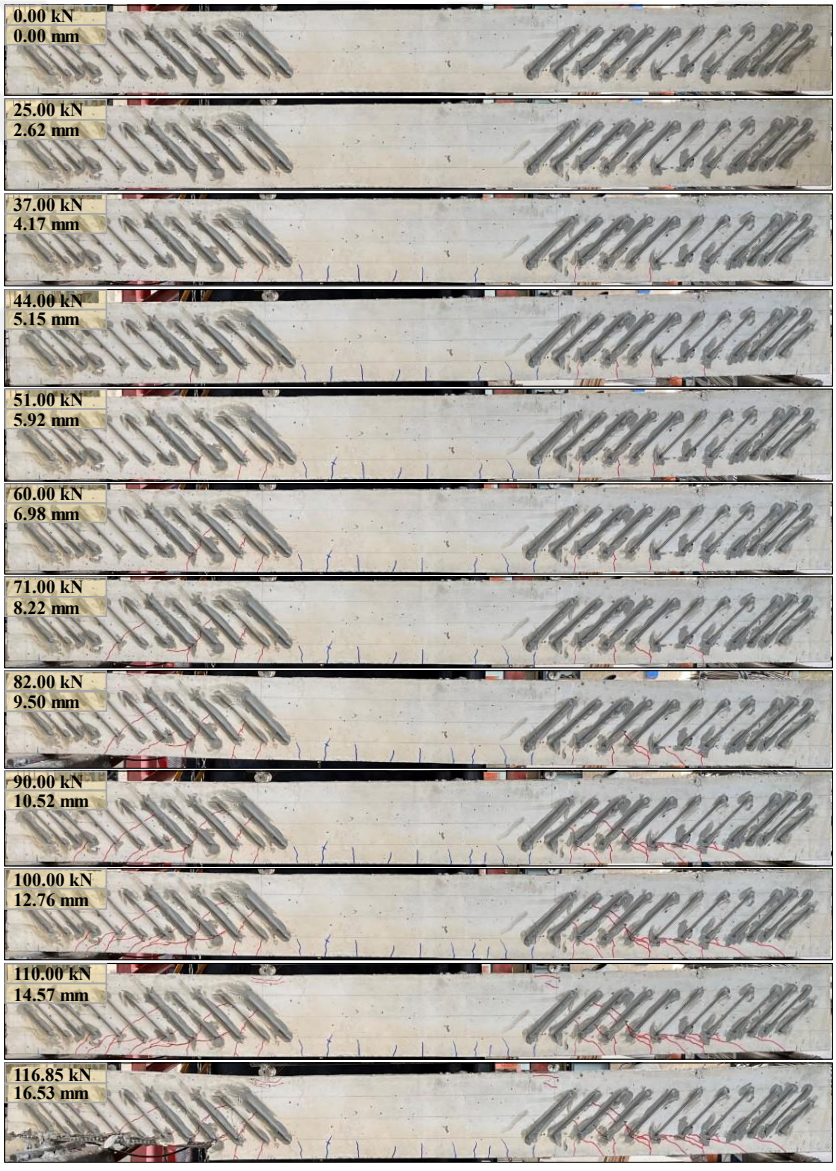


Şekil 4.17. S5-90 numunesine ait yük-deplasman grafiği

Şekil 4.18. S5-90 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

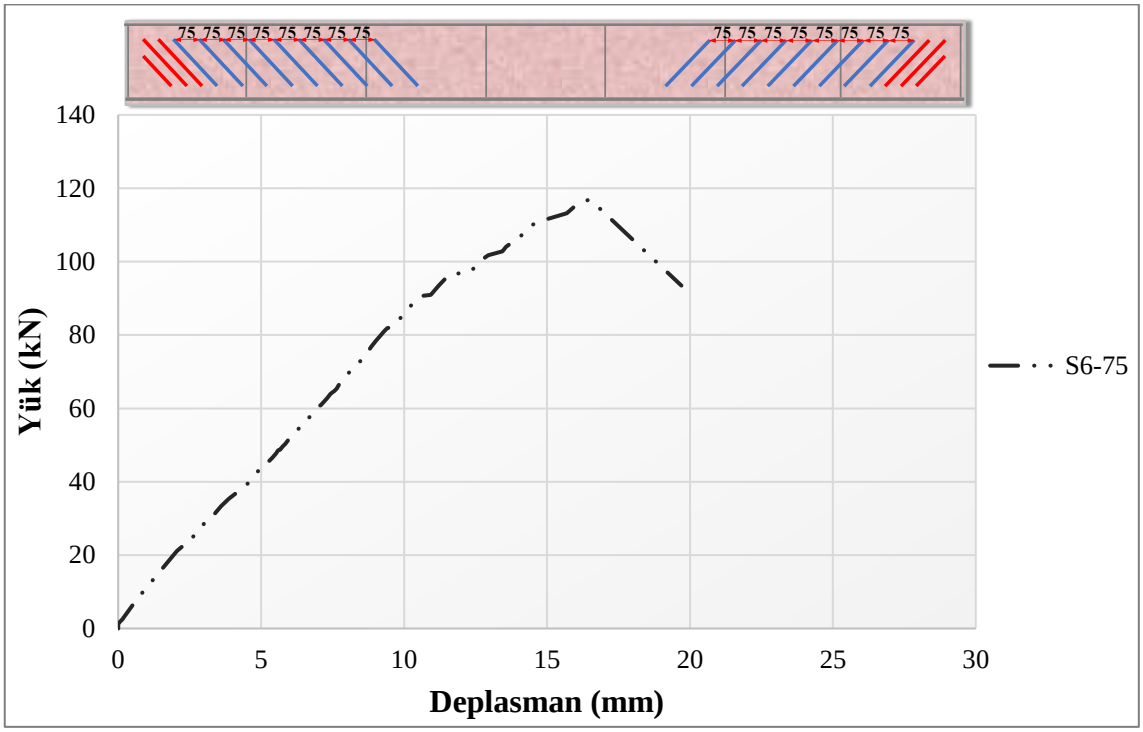
4.1.7. S6-75 numunesi

S6-75 numunesi, 75 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu numunede mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD haricinde, kesme açıklığında 9 adet MÇD bulunmaktadır. S6-75 numunesinde, 37.00 kN yük ve 4.17 mm deplasman seviyesine ulaştığında ilk eğilme çatlağı ve ilk kesme çatlağı gözlenmiştir. Kiriş numunesi 116.85 kN yük ve 16.53 mm deplasman değerine ulaştığında, sağ kesme açıklığında oluşan splitting (aderans hatası) hasarından dolayı yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Şekil 4.19'da S6-75 nolu kiriş numunesinin deney esnasındaki çatlak oluşum aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.19. S6-75 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S6-75 kiriş numunesinin deney sırasında eş zamanlı olarak çizilen yük-deplasman grafiği, Şekil 4.20'de gösterilmiştir. S6-75 numunesinde, referans kiriş numunesine kıyasla kesme kapasitesinde %37.44 artış gözlenmiştir. Kiriş numunesinde meydana gelen hasarlar, deney sonrasında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.21'de S6-75 nolu kiriş numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri sunulmuştur.

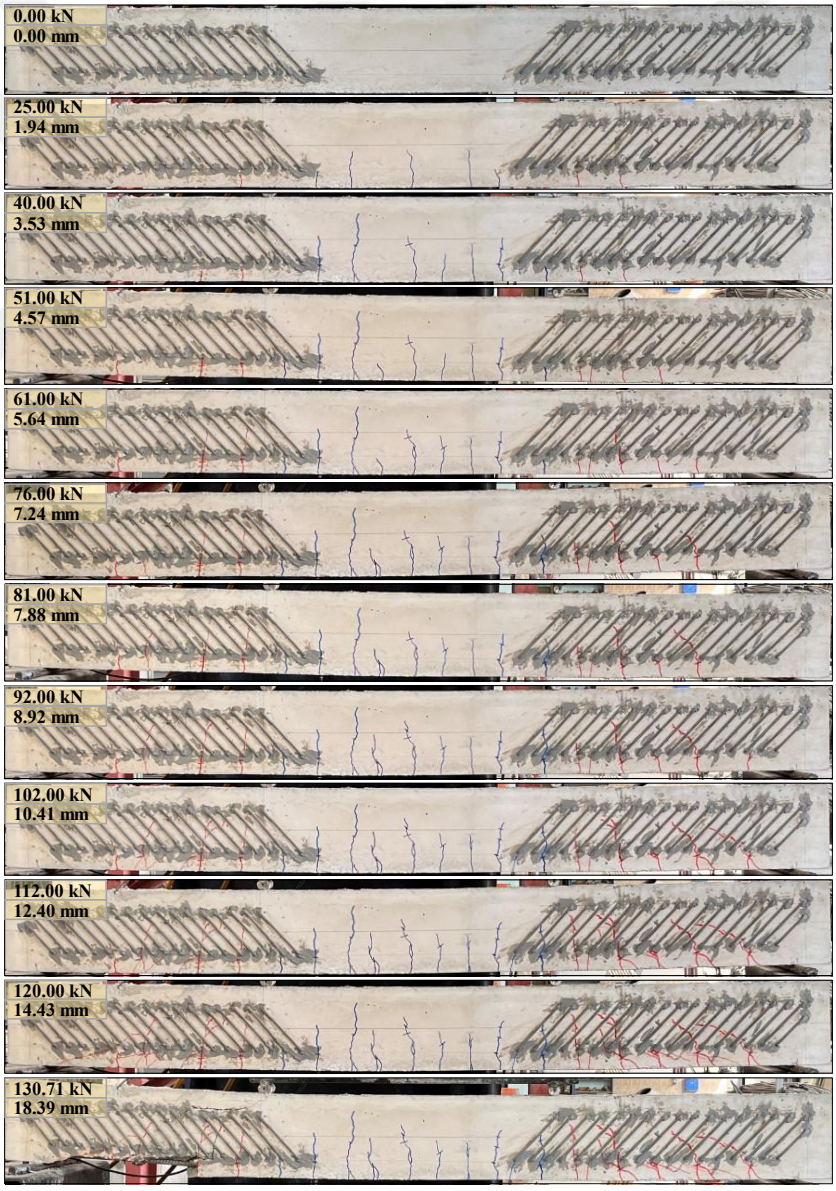


Şekil 4.20. S6-75 numunesine ait yük-deplasman grafiği

Şekil 4.21. S6-75 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

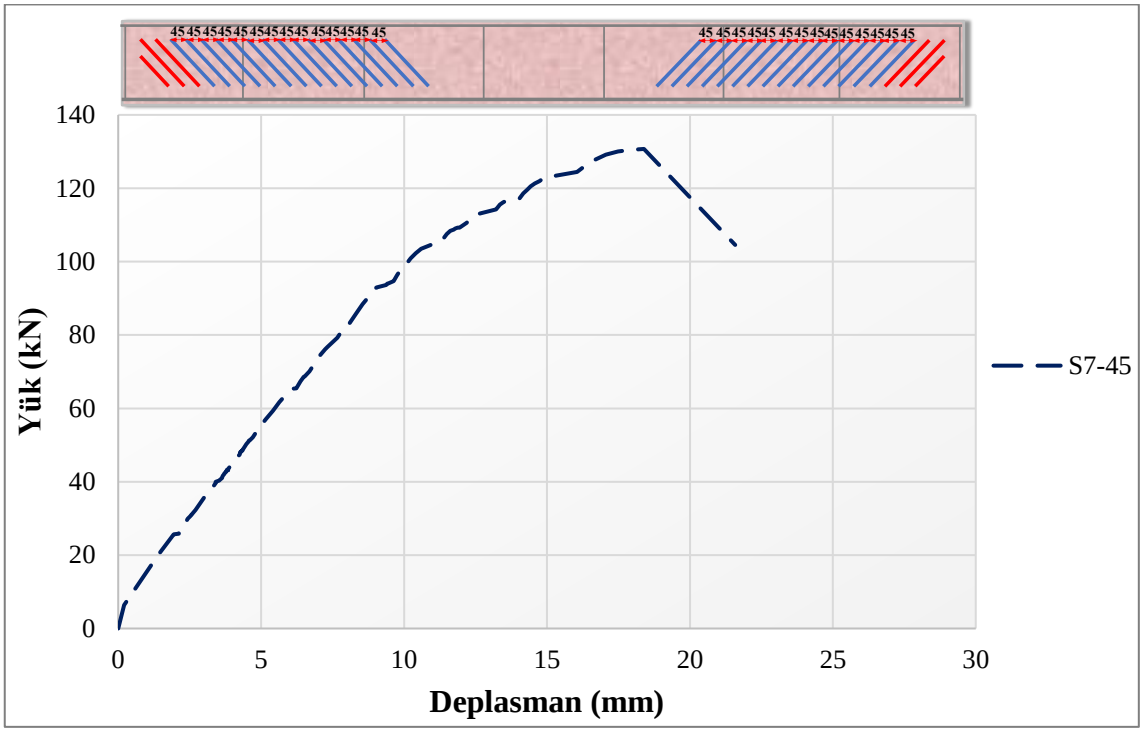
4.1.8. S7-45 numunesi

S7-45 numunesi, 45 mm aralıklara sahip Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) kullanılarak güçlendirilen deney kirişidir. Bu kiriş numunesinde mesnet bölgesine yerleştirilen 3 adet MÇD haricinde, kesme açıklığında 15 adet MÇD bulunmaktadır. S7-45 numunesinde, 25.00 kN yük ve 1.94 mm deplasman seviyesine ulaştığında ilk eğilme çatlağı ve ilk kesme çatlağı gözlenmiştir. Kiriş numunesi 130.71 kN yük ve 18.39 mm deplasman değerine ulaştığında, sol kesme açıklığında oluşan splitting (aderans hatası) hasarından dolayı göçme durumu gerçekleşmiştir. Şekil 4.22'de S7-45 nolu kiriş numunesine ait deney esnasındaki çatlak oluşum aşamaları gösterilmiştir.

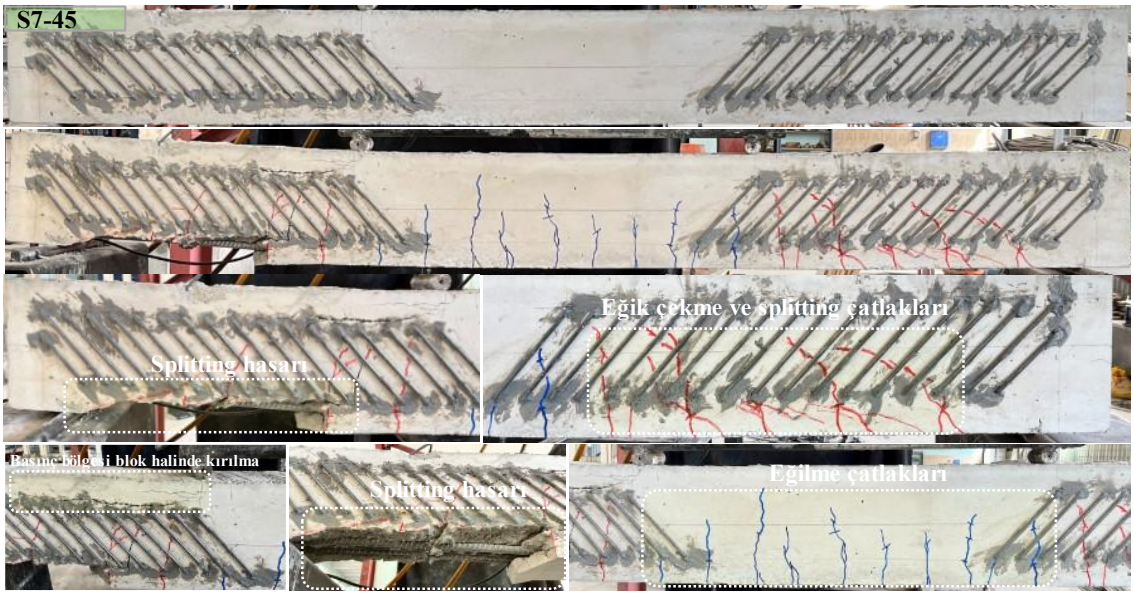


Şekil 4.22. S7-45 numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S7-45 nolu kiriş numunesine ait yük-deplasman grafiği, Şekil 4.23'te verilmiştir. S7-45 numunesinde, referans kiriş numunesine kıyasla kesme kapasitesinde %53.74 artış gözlenmiştir. En büyük kesme kapasitesi artışı, 45 mm aralıklı MÇD ile güçlendirilen bu kiriş numunesinde görülmüştür. Şekil 4.24'te S7-45 numunesinin göçme sonrası detaylı hasar analizi görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.23. S7-45 numunesine ait yük-deplasman grafiği



Şekil 4.24. S7-45 numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmada, MÇD aralığının kesme kapasitesi üzerindeki etkisini anlamak amacıyla 7 adet güçlendirilmiş kiriş ve bir adet referans kesme kirişi, dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde, çalışma kapsamında test edilen 8 adet kiriş numunesinin deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada değişken parametre olarak seçilen Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) aralığına bağlı olarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar özet halinde Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Bu tablodaki simgeler sırasıyla δ_y; akma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_{max}; maksimum yük (P_{max}) seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_u; kopma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), u; süneklik oranını (δ_u / δ_y), S_y; nominal akma noktasındaki rijitliği (kN/mm), S_{max}; maksimum yük seviyesindeki rijitliği (kN/mm), P_y; akma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük değerini (kN) ve P_{max}; maksimum yük değerini (kN) temsil etmektedir. Ayrıca kırılma türü için kullanılan simgeler tablonun altında açıklanmıştır.

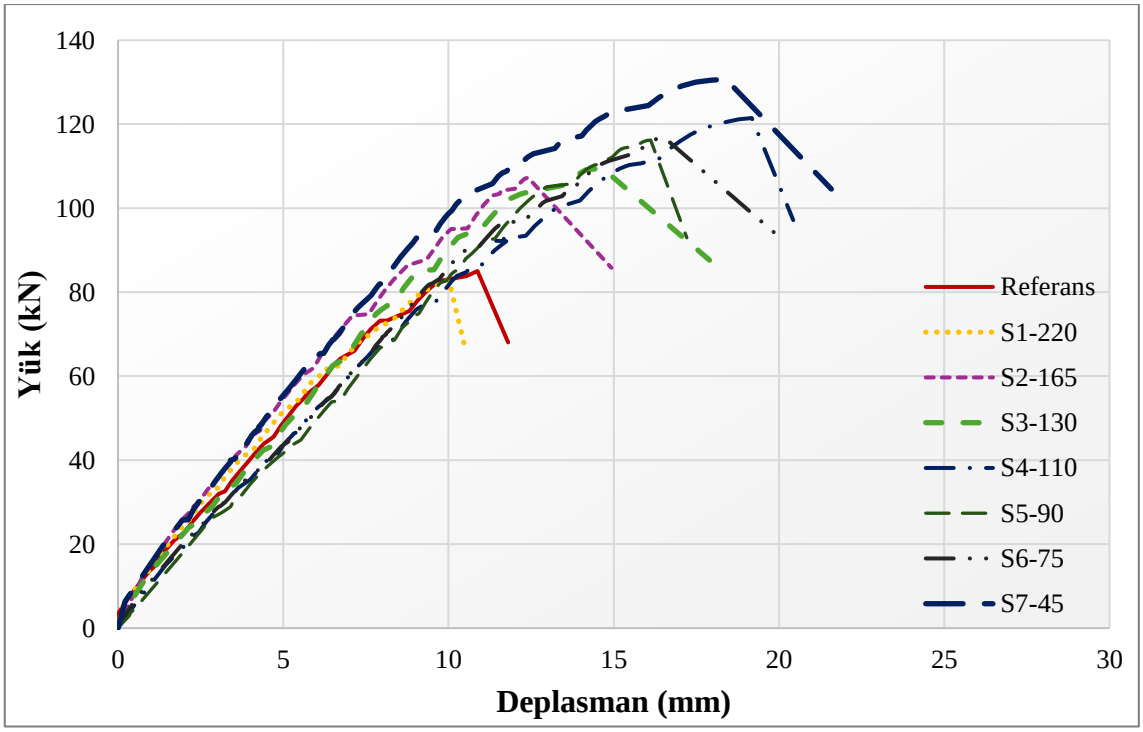
Çizelge 4.1. Deney sonuçları

Numune	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)	u (δ_u/ δ_y)	S_y (kN/mm)	S_{max} (kN/mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	Kırılma Türü*
Ref.	7.80	10.87	11.57	1.48	9.27	7.82	72.26	85.02	DT
S1-220	7.69	10.01	21.16	1.73	9.15	8.26	70.36	82.77	DT
S2-165	9.64	12.41	19.22	1.52	9.46	8.64	91.18	107.28	DT
S3-130	10.31	14.66	17.01	1.41	9.03	7.47	93.12	109.55	DT
S4-110	14.15	19.18	20.43	1.44	7.30	6.33	103.24	121.46	S+DT
S5-90	12.03	16.12	17.09	1.66	8.21	7.21	98.77	116.20	S+DT
S6-75	12.60	16.53	14.30	1.48	7.88	7.07	99.32	116.85	S
S7-45	12.25	18.39	10.39	1.35	9.07	7.11	111.11	130.71	S

*Burada DT Diagonal Tension (Eğik çekme kırılması) ve S ise Splitting (Aderans hatası) hasarlarını temsil etmektedir.

Yapılan kiriş deneylerinde 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 çizilmiştir. Şekil 4.25'te tüm deney kirişlerinin yük-deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, olası sünek bir kırılmanın gözlemlenmemesi amacıyla yüksek eğilme

donatısı (3Ø16) seçilerek eğilme kapasitesi yüksek ve düşük enine donatısı (etriye) kullanılarak kesme kapasitesi yetersiz kirişler üretilmiştir. Başka bir deyişle, kirişlerin yükleme altında eğilme kapasitesine ulaşmasını zorlaştıracak şekilde eğilme (boyuna) donatısı seçilmiştir. Şekil 4.25'te görüldüğü üzere, tüm deneylerde, P_y değerine ulaşılıncaya kadar deney kirişlerinin yük-deplasman eğrisinde doğrusala yakın bir davranış gözlenirken, maksimum yüke (P_{max}) ulaşıldıktan sonra ani kırılma sonucu hasar meydana gelmiştir. Bu sayede, değişen MÇD aralığına bağlı olarak kiriş kesme kapasitesindeki değişimler gözlemlenebilmiştir.



Şekil 4.25. Tüm deney kirişlerinin yük-deplasman grafikleri

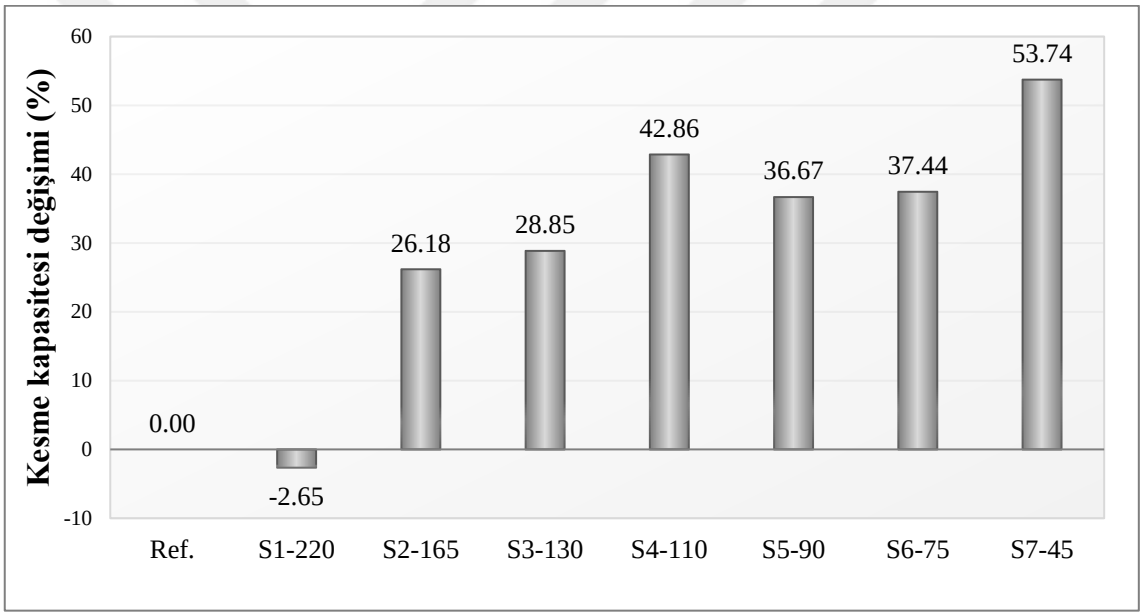
Bu çalışmanın temel amacı, güçlendirme uygulamasında kullanılan MÇD aralığının kesme kapasitesine katkısını incelemek ve bu güçlendirme yöntemi için optimum MÇD aralığını belirlemektir. Bu doğrultuda, deney kirişlerinde değişen MÇD aralıklarına bağlı olarak deney sonuçları karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmeler, deney sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda verildiği gibi alt başlıklar halinde sunulmuştur;

- ✓ Kesme kapasitesinin değerlendirilmesi
- ✓ Göçme tiplerinin değerlendirilmesi
- ✓ Rijitlik açısından değerlendirme

- ✓ Eğilme kapasitesinin değerlendirilmesi
- ✓ Süneklik ve enerji tüketimleri açısından değerlendirme
- ✓ MÇD'nin kiriş kesme kapasitesine katkısının hesaplanması

4.2.1. Kesme kapasitesinin değerlendirilmesi

Şekil 4.26'da, referans kiriş numunesine göre mekanik dikiş ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımlarındaki artışlar (S1-220 numunesi hariç) açıkça görülmektedir. Mekanik dikişin kiriş kesme kapasitesine etkisi +%53.74 ile %-2.65 aralığında değişmiştir. Bu değişimde, MÇD aralığı kritik rol oynamıştır. Deney kirişlerinde, MÇD aralığının sıklaştırılmasına bağlı olarak kirişin kesme kapasitesinde artışlar gözlenmiştir.



Şekil 4.26. Referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesi yüzdelik değişimleri

Deneysel çalışma sonuçlarına göre, en sık MÇD aralığına (45 mm) sahip olan S7-45 kirişi en yüksek kesme kapasitesine ulaşmış ve etriyeli referans kirişin kesme kapasitesini %53.74 oranında artırmıştır. Ayrıca, kirişlerde kullanılan MÇD aralığı arttıkça, kirişlerin kesme kapasitelerinin beklenildiği gibi azaldığı görülmüştür. Bu durum, yetersiz kesme dayanıma sahip kirişlerde sık yerleştirilen MÇD'lerin, seyrek yerleştirilen MÇD'lere göre daha fazla asal çekme gerilmelerini karşılamasından kaynaklanmaktadır. S1-220 numunesinde ise referans kiriş numunesine göre kesme kapasitesi artışı gözlenmemiştir. Bu kiriş numunesinde, MÇD uygulaması sırasında açılan deliklerden dolayı oluşan kılcal çatlamaların kapasiteyi düşürmesi nedeniyle

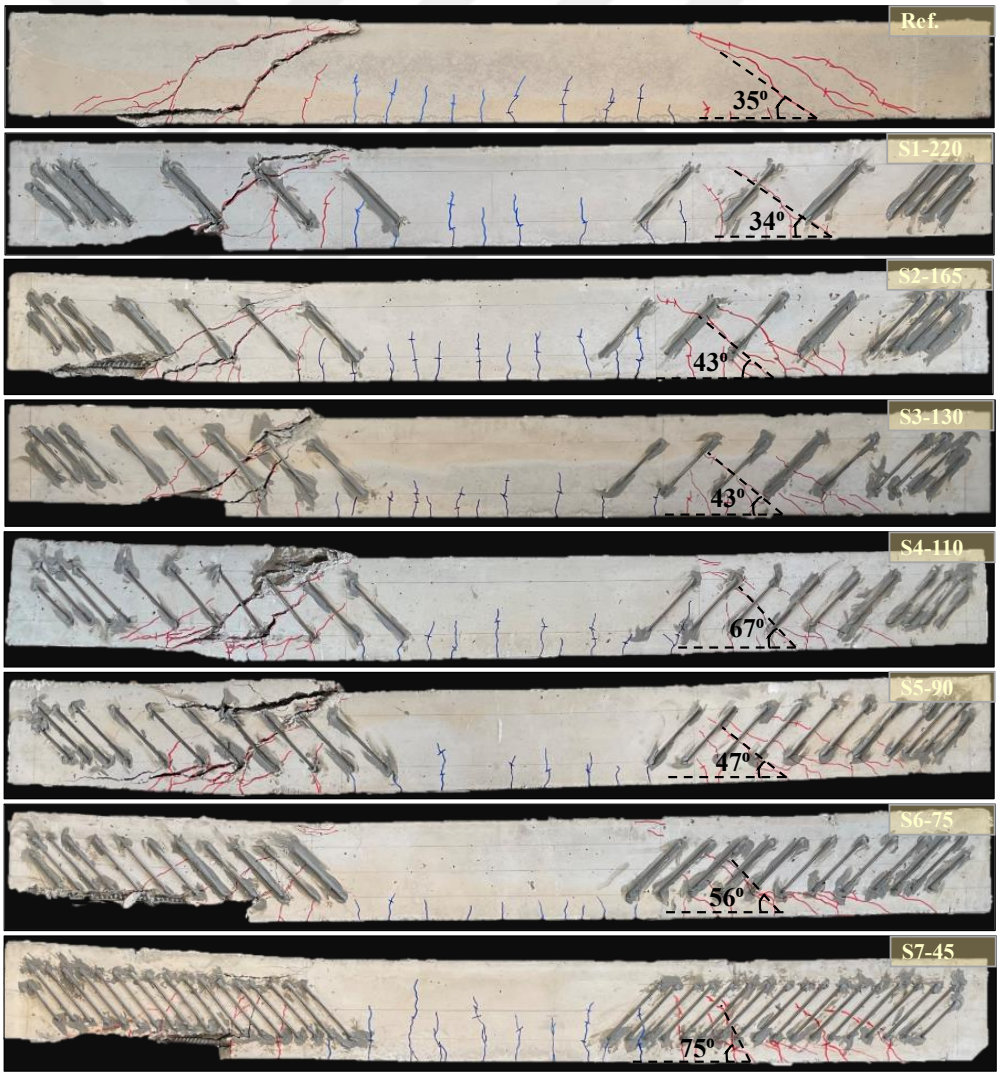
referans kirişe göre dayanımda azalma (%-2.65) meydana gelmiştir. Deney kirişlerinde MÇD aralığının d boyuna (225mm) eşit ya da daha büyük olarak kullanılması durumunda, eğik çatlaklar MÇD'lere denk gelmemekte ve bu nedenle MÇD'ler kirişin kesme kapasitesini artırmamaktadır. Bu durum, salt etriyeli kirişlerle (*Ref.*) de benzerlik göstermektedir. Literatürde ve betonarme yapım yönetmeliklerinde (ACI 318-19 ve TS500-2000), eğik çatlağın en az bir etriyeye denk gelebilmesi için etriye aralığının en fazla *d*/2 olması tavsiye edilmektedir. Şekil 4.26'da da görüleceği üzere, 110 mm (*d*/2) MÇD aralığından, en seyrek aralığa sahip olan 220 mm (*d*) aralığına doğru gidildikçe, kirişin kesme kapasitesinde önemli bir düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca, *d* aralığındaki kiriş numunesinin kesme kapasitesi, MÇD deliklerinin kiriş rijitliğini azaltması sebebiyle az da olsa düşmektedir.

4.2.2. Göçme tiplerinin değerlendirilmesi

Yapılan deneylerde, yetersiz etriyeye sahip referans kirişte beklenildiği gibi eğik çatlaktan dolayı yaklaşık 45 derecelik bir açı ile gelişen diagonal tension göçmesi (eğik çekme kırılması) meydana gelmiştir. (Şekil 4.27). Benzer şekilde, *d*/2 aralığından daha büyük MÇD aralığına sahip kirişlerde (S1-220, S2-165 ve S3-130), MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesine olan pozitif etkisi daha az olmaktadır. Bu nedenle, bu deney kirişlerinde de asal çekme gerilmeleri, eğik çekme çatlağının zayıf olduğu bölgeden ani bir şekilde ilerlemesine yol açarak diagonal tension göçmesine sebep olmuştur. MÇD aralığının *d*/5 (45mm) ile *d*/2 (112.5mm) aralığında olduğu kirişlerde (S4-110, S5-90, S6-75 ve S7-45) ise kirişlerin göçme modları diagonal tension kesme göçmesinden, splitting (aderans hatası) göçmesine doğru değişmiştir. Bu göçme durumları, MÇD aralığına göre değişiklik göstermiştir.

Deney kirişlerinde splitting göçme durumu şu şekilde ortaya çıkmaktadır. Kirişte sık MÇD aralığının kullanılması durumunda, kesme açıklığında bulunan MÇD sayısı artmaktadır. Artan MÇD sayısına bağlı olarak, diagonal tension (eğik çekme kırılması) göçmesi önlenmektedir. Bunun sonucunda kirişin kesme kapasitesi gittikçe artmaktadır. Ancak, kesme kapasitesindeki bu artış, boyuna çekme donatılarındaki çekme gerilmelerinde de artışa yol açmaktadır. Dolayısıyla artan çekme gerilmelerinin taşınması için daha fazla aderansa ihtiyaç duyulmakta ve bu nedenle donatıdan betona daha fazla aderans gerilmesi aktarılmaktadır. Mekanik kilitlenmeyle aktarılan bu gerilmeler (splitting gerilmeleri), betona donatı yüzeyinden radyal bir şekilde yayılmaktadır. Deney

kirişlerinde yapılan MÇD sıklaştırılması, radyal splitting gerilmelerinin artmasına yol açmaktadır. Yükleme altındaki kiriş numunesinde, artan splitting gerilmelerinin betonun çekme gerilmesini aşması sonucunda ani ve gevrek bir kırılma türü olan splitting kırılması (aderans hatası) meydana gelmektedir. Deney kirişlerinde yoğun MÇD aralığının seyrekleştirilmesiyle birlikte, kirişin kesme kapasitesi azalmakta ve dolayısıyla kirişte splitting gerilmeleri de azalmaktadır. Böylece, kesme kapasitesinin azalmasıyla birlikte asal çekme gerilmelerine daha fazla direnemeyen kiriş numunesinde, göçme modu diagonal tension kırılmasına (eğik çekme kırılması) dönüşmeye başlamaktadır. Şekil 4.27'de de görüldüğü üzere, S7-45 ve S6-75 numunelerinde tamamen splitting hasarı oluşurken, S5-90 ve S4-110 numunelerinde splitting ve diagonal tension hasarı birlikte gözlenmiştir. Diğer yandan, S3-130, S2-165, S1-220 ve *Ref.* kirişlerinde ise tamamen diagonal tension hasarının etkisiyle göçme meydana gelmiştir.



Şekil 4.27. Deney kirişlerinin göçme durumları

4.2.3. Rijitlik açısından değerlendirme

Yük-deplasman eğrileri üzerinde kirişlerin rijitlikleri hesaplanırken, yük durumuna göre orijinden çizilen doğruların eğrileri esas alınmıştır. İlk durumda, orijinden akma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesine kadar akma rijitlikleri (S_y) hesaplanmıştır. İkinci durumda ise maksimum yük seviyesine kadar rijitlikler (S_{max}) hesaplanmıştır. Deney kirişlerinin akma ve maksimum yükteki rijitlikleri Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Kirişlerde MÇD aralığı *d*/5'ten (45 mm) *d*/2'ye (110 mm) doğru arttıkça, kirişlerin akma rijitliği referans kirişe (*Ref.*) göre düşüş eğilimi göstermektedir. Ancak, MÇD aralığının *d*/2'yi geçmesiyle birlikte göçme modunun değişmesine bağlı olarak kiriş akma rijitlikleri tekrar referans kiriş seviyesine çıkmıştır. Benzer durum maksimum akma rijitliğinde de (S_{max}) görülmektedir. Bu durum şu şekilde izah edilebilir: Kirişlerde MÇD aralığı sıklaştıkça çatlağa denk gelen MÇD sayısı da artmaktadır. Dolayısıyla, kesme çatlakları daha çok sınırlanmaktadır. MÇD aralığının artmasıyla splitting çatlak ilerlemesi yavaşlamasına rağmen, yükleme devam ettikçe kesme çatlaklarının gelişimi artmaya devam etmektedir. Bu durum devam ederken, kesme çatlakları hala MÇD'ler tarafından sınırlanmaktadırlar. Sınırlanan kesme çatlakları yavaş yavaş genişlemektedir. Dolayısıyla kiriş rijitliği düşmektedir. Ancak, bu iki durum *d*/5'ten *d*/2'ye kadar geçerlidir; çünkü dikkat edilirse bu aralıkta genellikle splitting göçmesi (aderans hatası) oluşmaktadır. Bu durumun yanı sıra, MÇD aralığının *d*/2'den daha fazla olmasıyla birlikte göçme modu diagonal tension göçmesine (eğik çekme kırılması) dönmüştür. Bilindiği üzere, diagonal tension çatlağı çok ani ve gevrek bir şekilde oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu kirişler göçme anına kadar daha rijit kalmışlar, fakat göçmeleri çok daha ani ve gevrek olmuştur. Bu durum kirişlerdeki çatlak sayısından da belli olmaktadır (Şekil 4.27). Benzer durum referans kirişinde de (*Ref.*) görülmektedir.

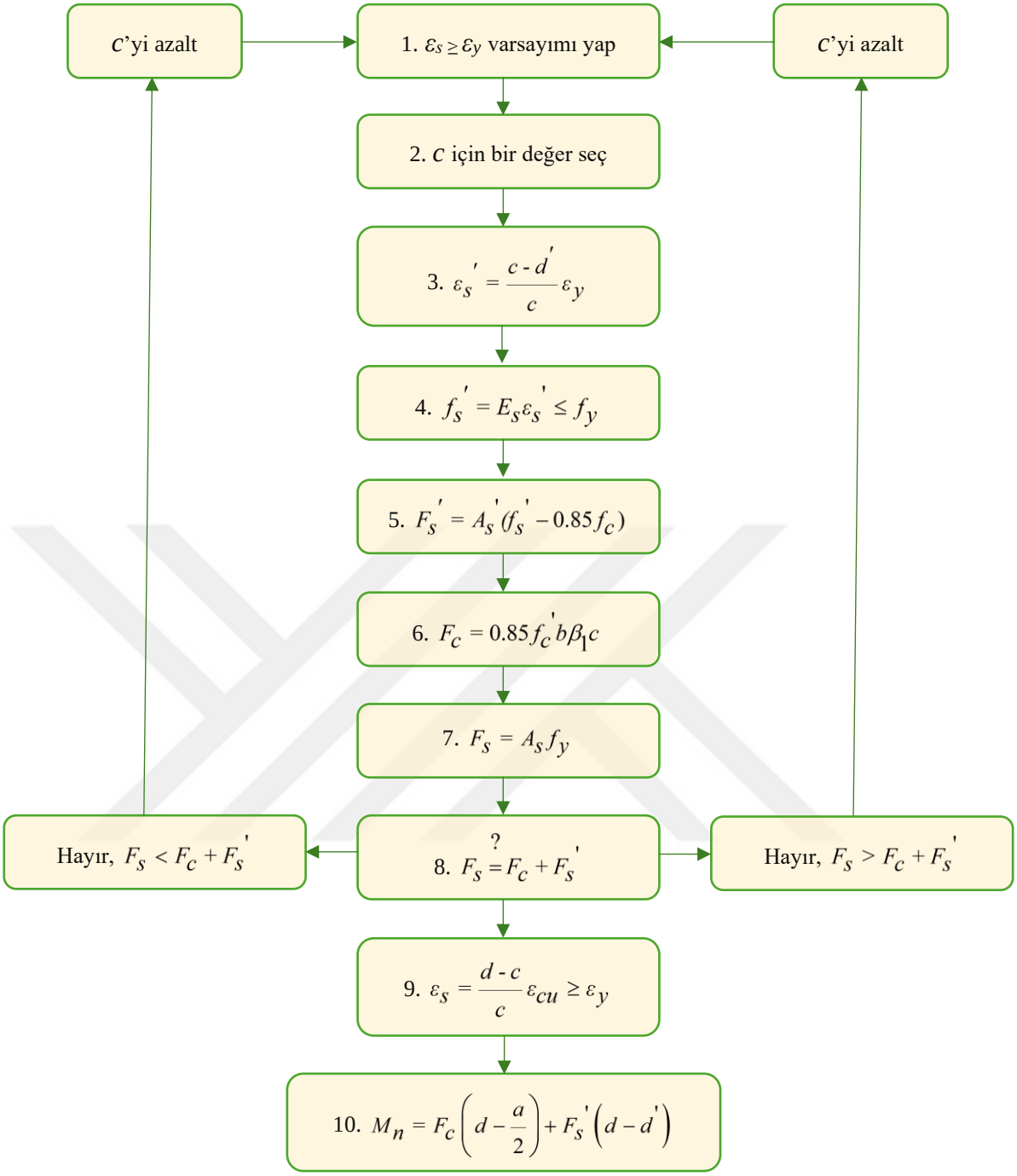
4.2.4. Eğilme kapasitesinin değerlendirilmesi

Deneysel çalışmada MÇD ile güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesine olan katkısı araştırıldığından dolayı, sünek bir göçme mekanizması gözlenmemek üzere kiriş eğilme donatıları yüksek seviyede tutulmuştur. Daha önce belirtildiği gibi, kirişlerde sık MÇD kullanımı kesme kapasitesini artırmaktadır. Dolayısıyla, kesme kırılması tarafından yönetilen kiriş göçmesi, kirişin kesme kapasitesinin artmasıyla beklenen maksimum eğilme dayanımına ve eğilme göçmesine giderek yaklaşmaktadır. Şekil 4.29'da da bu

durum açıkça görülmektedir. Deney kirişlerinde kiriş eğilme kapasitelerinin, kiriş maksimum eğilme kapasitelerine ne kadar yaklaştığını görebilmek amacıyla, kiriş maksimum eğilme kapasitesi ACI 318-19 yönetmeliğinde belirtilen basınç donatılı kiriş moment taşıma gücü hesabına göre teorik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.28'de ACI 318-19 yönetmeliğine göre eğilme momenti taşıma gücü hesabı şematik olarak özetlenmiştir. Şekil 4.28'de verilen eğilme momenti taşıma gücü hesabında kullanılan simgeler Çizelge 4.2'de açıklanmıştır.

Çizelge 4.2. Eğilme momenti taşıma gücü hesabında kullanılan parametreler

Simgeler	**Açıklama**
ε_s	Çekme donatısı birim uzaması
ε_y	Donatının akma anındaki birim uzaması
c	Tarafsız eksen derinliği
ε_s'	Basınç donatısı birim uzaması
d	Faydalı yükseklik
d'	Paspayı
f_s'	Basınç donatısı gerilmesi
f_y	Akma noktasındaki donatı gerilmesi
E_s	Basınç donatısının elastisite modülü
F_s'	Basınç donatısı arafından taşınan kuvvet
A_s'	Kesitteki toplam basınç donatısı alanı
f_c	Betondaki basınç gerilmesi
F_c	Betondaki basınç kuvveti
f_c'	Betonun tasarım basınç dayanımı
b	Kiriş gövde genişliği
$\beta_1 = k_1$	Ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı
F_s	Donatıdaki toplam çekme kuvveti
A_s	Kesitteki toplam çekme donatısı alanı
ε_{cu}	Basınç bölgesinin en dış lifindeki betonun birim kısalması
M_n	Nominal moment dayanımı
a	Basınç bloğu derinliği ($\beta_1 c$)

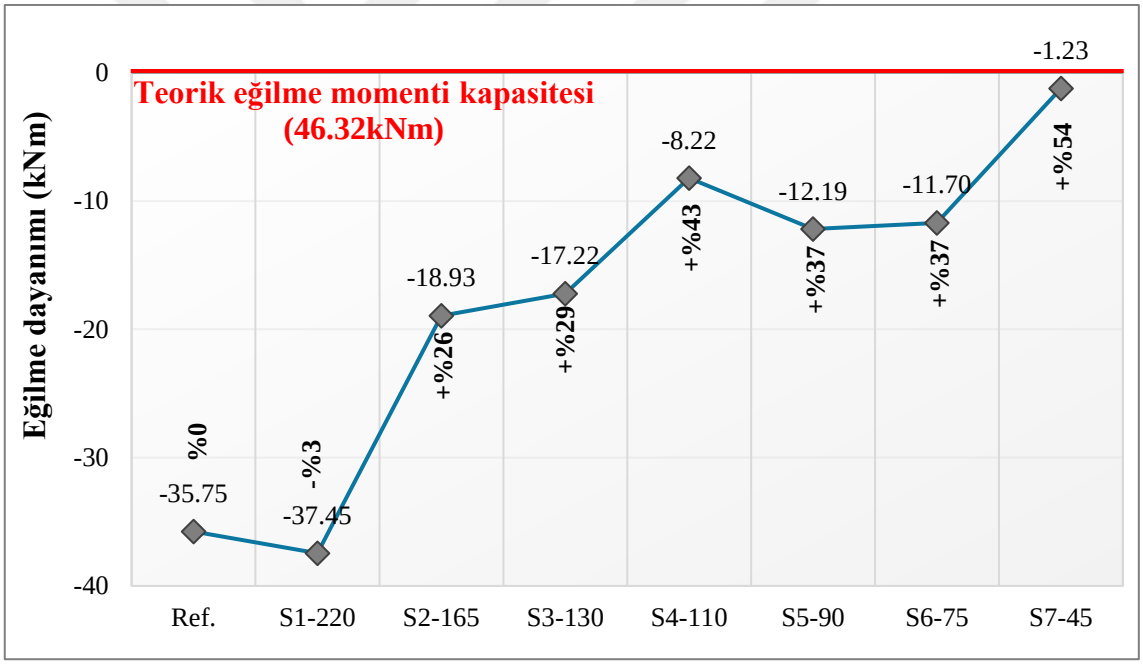


Şekil 4.28. ACI-318-19 yönetmeliğine göre moment taşıma gücü hesabı (Özuygur, 2020)

Şekil 4.29'da, MÇD ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımına denk gelen eğilme momentleri ile ACI 318-19 yönetmeliğinde belirtilen formüle göre hesaplanan teorik eğilme momenti kapasitesi arasındaki karşılaştırma gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, Şekil 4.29'daki grafik, Şekil 4.26'da verilen kesme kapasitelerinin karşılaştırıldığı sütun grafiği ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bunun nedeni, tüm kirişlerin aynı moment kollarına sahip olması ve kirişlerde eğilme göçmesinin oluşmamasıdır.

Böylece kirişlerin moment kapasitesi ile kesme kapasitesi MÇD aralığından aynı oranda etkilenmektedir.

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere, referans kirişin (*Ref.*) taşıma gücü kapasitesi, maksimum eğilme kapasitesinin %36 altında kalmıştır. Öte yandan, MÇD uygulanan kirişlerde, MÇD aralığına bağlı olarak MÇD'nin kesme kapasitesine olan katkısıyla kirişlerin eğilme dayanımları artmıştır. Bu durum, kirişlerin eğilme kapasitelerine tam olarak ulaşmasalar bile önemli bir katkı sağlamıştır. Özellikle en sık MÇD aralığına sahip olan S1-45 kirişinin eğilme kapasitesi, kirişin maksimum eğilme kapasitesinin %1.2 kadar altında kalmıştır. Bu durum MÇD aralığının artmasıyla negatif yönde bir eğilim gösterse de, *d*/2 aralığa sahip olan S4-110 kirişi için eğilme kapasitesi %8.2 değerinin altında kalmıştır. Sonuç olarak MÇD'ler, *d* aralığına kadar kirişlerin eğilme kapasitesini artırsa da, nihayetinde aralığın d mesafesine erişmesiyle bu artışlar etkisiz kalmıştır.



Şekil 4.29. MÇD'li kirişin kesme dayanımına denk gelen eğilme momentleri ile teorik eğilme momenti kapasitesine göre karşılaştırılması

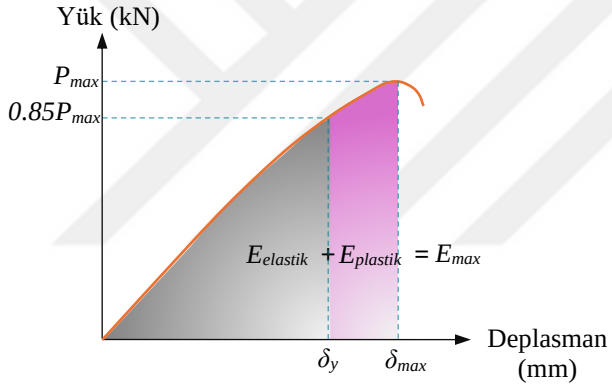
Deney kirişlerinde, MÇD'lerin kesmeye katkısından dolayı kirişin moment kapasitesindeki değişimler kesme bölgesindeki eğik çatlak açılarından da net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.27). Kirişlerde MÇD aralığı azaldıkça, kirişin teorik eğilme kapasitesine yaklaştığı ve kesme bölgesindeki çatlakların da artan çekme gerilmelerine bağlı olarak dikleşerek eğilme çatlağına benzediği görülmektedir. Bu durum, normal çekme gerilmelerinin asal çekme gerilmelerine göre çok daha baskın olmasından

kaynaklanmaktadır. MÇD aralığı arttıkça, normal çekme gerilmelerinin asal çekme gerilmeleri üzerindeki baskınlığı azalmış ve böylece açı git gide küçülmüştür.

4.2.5. Süneklik ve enerji tüketimleri açısından değerlendirme

Kirişlerin enerji tüketimleri ve süneklikleri Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Burada $E_{elastik}$, $0.85P_{max}$ yük seviyesine kadar olan enerji tüketimini E_{max}, P_{max} yük seviyesine kadar olan enerji tüketimini $E_{plastik}$, P_{max} yük seviyesi ile $0.85P_{max}$ yük seviyesi arasında kalan enerji tüketimini ve u ise süneklik katsayısını temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 4.30'da enerji ve sünekliğin etriyeli referans kirişe göre değişimleri yüzdesel olarak gösterilmiştir.

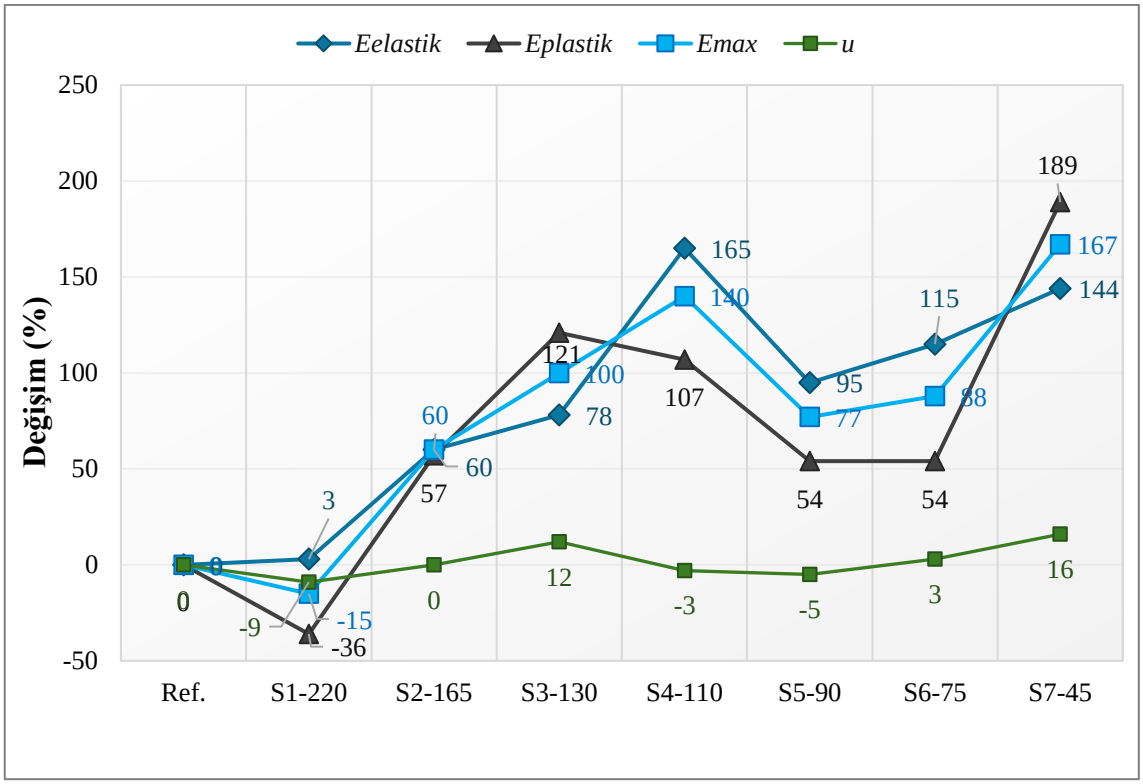
Çizelge 4.3. Kirişlerin enerji tüketimleri ve süneklikleri



Numune adı	$E_{elastik}$ (kJ)	$E_{plastik}$ (kJ)	E_{max} (kJ)	μ (δ_u/δ_y)
Ref.	0.32	0.28	0.60	1.48
S1-220	0.33	0.18	0.51	1.35
S2-165	0.52	0.44	0.96	1.48
S3-130	0.58	0.62	1.20	1.66
S4-110	0.86	0.58	1.44	1.44
S5-90	0.63	0.43	1.06	1.41
S6-75	0.70	0.43	1.13	1.52
S7-45	0.79	0.81	1.60	1.73

Şekil 4.30'da görüldüğü üzere, en sık MÇD aralığına sahip kiriş olan S1-45 kirişinin, referans kirişe göre nominal akma (elastik), plastik ve maksimum enerji tüketimleri sırasıyla %144, %167 ve %189 gibi çok yüksek oranlarda artmıştır. Bu artışın en büyük nedeni, kirişin kesme kapasitesindeki %53.74'lük artış olarak gösterilebilir. Ayrıca, kirişlerin tamamında MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısı görülmek istendiğinden ve bu yönde bir tasarım yapıldığından dolayı, literatüre göre referans ve güçlendirilen kirişlerde yeterli süneklikten (μ = 4~5) bahsedilememektedir. Ancak burada kirişin sözde süneklik seviyesinde %16'lık bir artışın meydana geldiği söylenebilir. Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi, bu kirişte splitting göçmesi oluşmuştur. MÇD aralığının artmasıyla, göçme modunun splittingden diagonal tension hasarına geçme eğilimi, kirişlerin akma ve toplam enerji tüketiminin yanı sıra sünekliğini de azaltmaktadır. Bu durum aynı zamanda, kirişin toplam yük taşıma kapasitesindeki

düşüşle de benzerlik göstermektedir. Göçme modundaki değişimin yaşandığı karar anında (S5-90), enerji ve süneklik değerleri dip yaptıktan sonra, göçme modu artık diagonal tensiona dönmeye başlamaktadır. Ancak kirişte hala splitting etkisi gözlemlenirken, bu etki artık S3-130 kirişinde tamamen diagonal tension göçmesine bırakmıştır. Bu aşamadan sonra, kirişte diagonal tension modunun tam hakimiyetiyle birlikte enerji tüketim seviyeleri ve sözde süneklikler, referans kiriş seviyelerine geri dönmüştür.



Şekil 4.30. MÇD'li kirişlerin referans kirişe göre enerji tüketimi ve süneklik değişimleri

4.2.6. MÇD'nin kiriş kesme kapasitesine katkısının hesaplanması

Referans kiriş numunesinin nominal kesme dayanımın (V_n) belirlenmesi için ACI 318-19 yönetmeliğinde yer alan hesap adımları uygulanmıştır. Yönetmelikte belirtilen kesme dayanımı, betonun katkısıyla (V_c) enine donatının katkısının (V_s) toplamıyla hesaplanmaktadır. Deney kirişlerinde, beton ile donatı da tam aderansın olduğu varsayılmaktadır. Aşağıda kiriş kesme dayanımında kullanılan denklemler sunulmuştur. Burada λ, düzeltme katsayısını (betonarme elemanlar için 1) ρ_w, eğilme donatısı oranını A_v, enine donatı alanını f_{yt}, enine donatının akma dayanımını ve s ise enine donatı aralığını

temsil etmektedir. Yapılan hesaplamalarda referans kiriş numunesi için kesme dayanımları Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

$$V_c = 0,66\lambda\sqrt[3]{\rho_w}\sqrt{f_c'}\,b_w d \quad (1)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt}}{s} d \quad (2)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (3)$$

Çizelge 4.4. Referans kiriş numunesin nominal kesme dayanımı

V_c (kN)	V_s (kN)	$V_n = V_c + V_s$ (kN)
20.42	16.39	36.81

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 8 adet kiriş deneyinin sonuçlarına göre, farklı aralıklarla uygulanan MÇD'nin kiriş kesme kapasitesine olan katkısı şu şekilde hesaplanmıştır. Öncelikle deneysel çalışma sonucunda elde edilen MÇD'li kirişlerin taşıdığı maksimum kesme kapasitesinden (V_{Exp}), referans kirişin maksimum kesme kapasitesi ($V_{exp,Ref}$) çıkarılarak, MÇD'ler tarafından taşınan kesme kuvveti ($V_{MÇD}$) elde edilmiştir. Daha sonra MÇD'lerin eğimli etriye gibi çalıştığı varsayılarak, MÇD'lerin taşıdığı kesme kuvvetleri ($V_{MÇD}$), ACI318-19'da yer alan eğik etriye denklemi kullanılarak gerilmeye ($f_{yt,\,MÇD}$) dönüştürülmüştür. MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesine olan katkısının bulunması için kullanılan hesap adımları, sırasıyla Denklem 4,5 ve 6'da gösterilmiştir. Burada A_v, güçlendirmede kullanılan MÇD'nin kesit alanını (mm^2) α, MÇD'nin boyuna donatı ile yaptığı açıyı (◦) s, MÇD aralığını (mm) d, ise kiriş faydalı yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.

$$V_{MSS} = V_{Exp} - V_{Exp,\mathrm{Re}\,f} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt}(\sin\alpha + \cos\alpha)}{s} d \quad (5)$$

$$f_{yt,MSS} = \frac{V_{MSS} s_{MSS}}{A_{v,MSS}(\sin\alpha + \cos\alpha)d} \quad (6)$$

Çizelge 4.5'te MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesine olan katkıları her deney numunesi için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere güçlendirme uygulamasında kullanılan MÇD aralıkları azaldıkça, MÇD'lerin kesme kapasitesine katkısı artmıştır. Ancak göçme modunun diagonal tension hasarından splitting hasarına doğru değişmesiyle, S4-110 kirişinde bir artış gözlenmiştir. Nitekim bu durum "4.2.2. Göçme tiplerinin değerlendirilmesi" bölümünde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.5'te MÇD'lerin taşıdığı gerilmeler de görülmektedir. MÇD aralığı azaldıkça, çatlaklara karşı direnç sağlayan MÇD sayısı da artmaktadır. Bu nedenle, MÇD'lere gelen kesme kuvveti MÇD'ler arasında paylaştırılır ve son durumda bir MÇD'ye düşen gerilme de azalma görülür (Şekil 4.27).

Çizelge 4.5. MÇD'lerin kiriş kesme kapasitesine katkısı ve MÇD gerilmeleri

Numune adı	P_{max} **(kN)**	V_{Exp} **(kN)**	$V_{MÇD}$ **(kN)**	$f_{yt,MÇD}$ **(MPa)**
Ref	85.02	42.51	0	0
S1-220	82.77	41.39	-1.13	-29.76
S2-165	107.28	53.64	11.13	220.84
S3-130	109.55	54.78	12.27	191.73
S4-110	121.46	60.73	18.22	241.01
S5-90	116.20	58.10	15.59	168.72
S6-75	116.85	58.43	15.92	143.54
S7-45	130.71	65.36	22.85	123.62

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan çalışma kapsamında sabit beton basınç dayanımı, sabit boyuna ve enine donatı miktarı dikkate alınarak, aynı çapa ve ankraj derinliğine sahip fakat farklı Mekanik çelik dikiş (MÇD) aralıklarına sahip güçlendirilmiş kirişlerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla 1 tanesi referans olmak üzere toplamda 8 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiş ve düşey yük altında dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda kirişlerin hasar türü, yük taşıma kapasitesi, sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve rijitlik değerleri incelenerek yorumlanmıştır. Bununla birlikte, kirişlerin eğilme kapasiteleri teorik olarak hesaplanmış ve güçlendirme sonrası eğilme kapasitesine yaklaşım oranları belirlenmiştir. Son olarak, her bir numune için MÇD'lerin kesme dayanımına olan katkısı da deney sonuçları esas alınarak hesaplanmıştır. Çalışma ile ilgili spesifik sonuçlar aşağıdaki gibi detaylandırılmıştır:

1. Referans numunede ve güçlendirilen tüm numunelerde yalnızca kesme hasarı (diagonal tension - splitting) sonucu göçme gerçekleşmiştir. Bu durumun temel nedeni, MÇD'nin kesmeye katkısının deneysel olarak gözlemlenmesi için kirişte seçilen boyuna donatının dengeli duruma oldukça yakın olmasıdır. Başka bir deyişle, kirişlerin eğilme kapasitesine ulaşmasını zorlaştıracak bir boyuna donatı oranı seçilmiştir. Böylece MÇD'lerin katkısı gözlemlenebilmiş ve kiriş kesme kapasitesini %53.74 oranına kadar artırmıştır.
2. Düşey yük altında test edilen deney kirişlerinde, kesme açıklığında boyuna donatı ile yaklaşık 45º açı oluşturan eğik çatlaklar meydana gelmiştir. Aksoylu ve ark. (2022) tarafından yapılan deneysel çalışmada, kesme açıklığındaki eğik çatlakları yaklaşık 45º açıyla karşılayacak 90º açılı MÇD'ler kullanılarak kesme kapasitesinde %31'e kadar artış sağlanmıştır. Ancak, 45º açı ile oluşan eğik çatlakların tam anlamıyla dik bir açı ile karşılanamadığından dolayı, MÇD'lerin 45º açı ile uygulanmasının daha etkili olacağı savunulmuştur. Bu deneysel çalışmada ise eğik çatlakları tam anlamıyla dik açı ile karşılayacak şekilde 45º açılı MÇD uygulaması yapılmıştır. Kiriş kesme kapasitesinde %53.74'e kadar artış görülmesiyle yapılan güçlendirme uygulamasında, MÇD'lerin 45º açıyla uygulanmasının oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır.

3. Her ne kadar *d*/1.7 ve *d*/1.4 oranlarında kesme kapasitesi sırasıyla %28.85 ve %26.18 artmış olsa da, MÇD aralığı d kadar olduğu anda referans kirişe göre kesme kapasitesi %2.65 azalmıştır. Yani kiriş üzerinde oluşan kesme çatlaklarının en az bir MÇD'ye denk gelmesi için MÇD aralığının en fazla *d*/2 olması gerekmektedir. Bu durum, kirişlerin kesme kapasitesinin artırılabilmesi için seçilecek en büyük MÇD aralığının *d*/2 olması gerektiğini göstermiştir.
4. Deney kirişlerinde uygulanan MÇD sıklığına göre göçme mekanizması değişmektedir. Kirişlerde en sık MÇD uygulamasında (*d*/5) splitting (aderans hatası) hasarı gözlenirken, *d*/2 aralıkla yerleşime doğru gidildikçe hasar diagonal tension (eğik çekme kırılması) göçmesine dönmektedir. Diğer bir ifadeyle, MÇD aralığı arttıkça, kirişin kesme kapasitesi azalmakta ve kiriş diagonal tension göçmesine maruz kalmaktadır. Diagonel tension göçmesi ani ve gevrek olduğundan, MÇD aralığının seçimi önemli hale gelmektedir.
5. Güçlendirilen numunelerin deney sonu hasarları incelendiğinde, MÇD'ler de sıyrılma olmadığı gözlenmiştir. Bu durum MÇD'ler ile yapılacak güçlendirmelerde ankraj boyunun en az 10Ø alınabileceğini göstermiştir. Fakat burada beton dayanımının, deliğin temizlenme şeklinin ve kullanılan epoksinin mekanik özelliklerinin de etkili birer parametre olduğu söylenebilir.
6. Mesnet bölgesinde tekil yükten dolayı oluşabilecek ani göçmeyi önlemek amacıyla tüm deney kirişlerinde mesnet bölgesine sık aralıklarla 3 adet MÇD yerleştirilmiştir. Bu uygulama, deney sonuçlarını olumsuz etkileyebilecek mesnet bölgesi kırılmalarını engellemiştir.
7. Kirişlerde MÇD aralığı *d*/5'ten *d*/2'ye doğru arttıkça, kirişlerin akma rijitliğinde referans kirişe (*Ref.*) göre %2.1 ile %21.2 arasında bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Ancak aralık *d*/2'yi aştığında, göçme modunun değişmesiyle birlikte kiriş akma rijitlikleri tekrar referans kiriş seviyesine (-2.5% ile %2 arasında) yükselmiştir.
8. Referans kirişin (*Ref.*) göçme anında taşıma gücü, maksimum teorik eğilme kapasitesinin %35.75 altında iken, güçlendirme sonrası MÇD aralığı azaldıkça teorik eğilme kapasitesine %1.23 oranına kadar yaklaşmıştır. Ayrıca, MÇD aralığının d mesafesine ulaştığı S1-220 kiriş numunesinde, eğilme kapasitesine katkı sağlanamamıştır. Diğer bir ifadeyle, MÇD aralığı azaldıkça kiriş kesme bölgesinde oluşan çatlaklar 75°'ye kadar ulaşarak eğilme davranışı sergilemeye çalışırken, MÇD aralığı arttıkça kesme bölgesinde oluşan çatlaklar 34°'ye kadar düşmüştür.

9. Kirişlerin tamamında MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısı görülmek istendiğinden ve bu yönde bir tasarım yapıldığından dolayı, referans ve güçlendirilen kirişlerde yeterli süneklikten (μ=4~5) bahsedilememektedir. Ancak en sık MÇD aralığına sahip S1-45 numunesinin akma, maksimum ve toplam enerji tüketim kapasitesi referans numuneye göre sırasıyla %144, %132 ve %366 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte süneklik kapasitesinde %16'lık bir artış gözlenmiştir.
10. Yapılan çalışmanın sonucunda, 45° açı ile MÇD'lerin kirişlere uygulanmasında optimum aralığın belirlenmesinin oldukça önemli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, mevcut yapılarda kesme dayanımı açısından yetersiz olduğu düşünülen kirişlerin kesme kapasitesi belirlendikten sonra, uygulanacak MÇD ile kesme kapasitesi artışının ne kadar olacağının belirlenmesi gerekmektedir. Rehber niteliğinde olacak bu çalışmanın sonuçları, MÇD'lerin kesme dayanımına olan katkısını belirlemeye yardımcı olacaktır. Böylece, kirişin eğilme kapasitesinin aşılmasını sağlayacak optimum MÇD tasarımının yapılması halinde, kirişte sünek davranış oluşmasının sağlanabileceği söylenebilir.
11. Yapılan tez çalışması, sonuçları itibariyle Mekanik Çelik Dikişler ile kesme kapasitesi zayıf kiriş elemanların güçlendirilebileceğinin gösterilmesi adına oldukça önemlidir. Gelecek çalışmalar için referans alınabilecek bu çalışma literatür için ilk çalışmalardandır.

5.2. Öneriler

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak aşağıda belirtilen önerilerde bulunulmuştur.

1. Bu deneysel çalışmada her bir numuneden bir adet kullanılmıştır. Ancak her bir numuneden üç adet kullanılıp sonuçların ortalaması alınırsa, daha kesin sonuçlar elde edilebilir.
2. Çalışma kapsamında ele alınan kirişlerin boyutları ½ geometrik ölçeklidir. Fakat 1/1 geometrik ölçekli numuneler kullanılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Bu öneri doğrultusunda, yapılan güçlendirme uygulamasında geometrik boyutun kirişlerin davranışı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
3. Güçlendirme uygulamasında MÇD çapı Ø6 ve MÇD ankraj derinliği 10Ø ve MÇD türü transmisyon çelik seçilerek deneyler yapılmış ve MÇD'lerde herhangi

bir sıyrılma görülmemiştir. Ancak, belirtilen bu parametrelerin değiştirilmesiyle MÇD ankraj etkinliği araştırılabilir.

4. Deney kirişlerinde, MÇD'lerin kesme kapasitesine olan katkısını gözlemleyebilmek için yüksek oranda eğilme donatısı (3Ø16, $\rho = 0.0224$) ve basınç donatısı (2Ø12, $\rho' = 0.0084$) kullanılmıştır. Daha düşük oranda eğilme ve basınç donatısı kullanılarak, MÇD'lerin kesme kapasitesini arttırmasıyla kiriş numunesinde sünek davranış sağlanabilir.
5. Çalışma sonuçlarına göre, düşey yük altında test edilen 45º açılı MÇD uygulamasının oldukça etkili olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, MÇD ile güçlendirme yönteminin tersinir-tekrarlı deprem yüklemesi altındaki etkinliği araştırılabilir.
6. Deneysel çalışmada, sabit parametre olarak dikkate alınan beton sınıfı ve etriye aralığı değiştirilerek, bu parametrelerin güçlendirme uygulamasındaki etkisi araştırılabilir.
7. Deney kirişlerinde kesme göçmesinin gözlenebilmesi amacıyla kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a_v/d) 3.26 olarak seçilmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı a_v/d oranları seçilerek MÇD uygulamasındaki etkisi incelenebilir.
8. Kuşatılmış ve kuşatılmamış kesme kapasitesi yetersiz kolon-kiriş birleşim bölgelerinde MÇD uygulamasının etkinliği araştırılabilir.
9. MÇD ile güçlendirme uygulamasında kullanılan mekanik dikişlerin yangın ve korozyon performansı da ileriki çalışmalarda araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Abadel, A., Abbas, H., Albidah, A., Almusallam, T. and Al-Salloum, Y., 2022, Effectiveness of GFRP strengthening of normal and high strength fiber reinforced concrete after exposure to heating and cooling, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 36. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101147

Abd, L. M., 2021, Shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP strips, *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 415-423. https://doi.org/10.5937/jaes0-29968

Abdo, A., Ahmed, S., Selim, M. and Sharaky, I. A., 2023, Effect of main and NSM reinforcing materials on the behavior of the shear strengthened RC beams with NSM reinforced HSC layers and bars, *Case Studies in Construction Materials*, 18. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02109

Abdul-Razzaq, K.S., Ali, H. I. and Abdul-Kareem, M. M., 2017, A new strengthening technique for deep beam openings using steel plates, *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(24), 15935-15947.

Abdulsalam, B., 2014, Behaviour of shear critical FRP reinforced concrete one-way slabs, Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke, https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2783.1844

Abed, M. J., Fayyadh, M. M. and Khaleel, O. R., 2021, Effect of web opening diameter on performance and failure mode of CFRP repaired RC beams, *Materials Today: Proceedings*, 42, 388-398. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.591

ACI 318-19, 2019, Building Code Requrements for Structural Concrete and Commentart, American Concrete Institute: ACI Committee 318.

Aksoylu, C. ve Arslan, M. H., 2019, Çerçeve + perde türü betonarme binaların periyod hesaplarının TBDY-2019 yönetmeliğine göre ampirik olarak değerlendirilmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 365-382. https://doi.org/10.17482/uumfd.603437

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

Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L. and Arslan, M. H., 2019, İnceltilmiş uçlu betonarme prefabrik aşıkların kesme kapasitelerinin CFRP uygulaması ile artırılması. *International Science and Academic Congress (INSAC'19)*, 285-291.

Akyürek, M., 2019, Yüksek sıcaklığa maruz FRP donatılı betonlarda paspayı ve beton dayanımının etkisi, Yüksek lisans tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

Al Rjoub, Y. S., Ashteyat, A. M., Obaidat, Y. T. and Bani-Youniss, S., 2019, Shear strengthening of RC beams using near-surface mounted carbon fibre-reinforced polymers, *Australian Journal of Structural Engineering*, 20(1), 54-62. https://doi.org/10.1080/13287982.2019.1565617

Al-Fakih, A., Hashim, M. H. M., Alyousef, R., Mutafi, A., Sabah, S. H. A. and Tafsirojjaman, T., 2021, Cracking behavior of sea sand RC beam bonded externally with CFRP plate, *Structures*, 33, 1578-1589. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.042

Alhassan, M., Al-Rousan, R. and Ababneh, A., 2021, Anchoring of the main CFRP sheets with transverse CFRP strips for optimum upgrade of RC Beams: Parametric experimental study, *Construction and Building Materials*, 293. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123525

Al-Khafaji, A., Salim, H. and El-Sisi, A., 2021, Behavior of RC beams strengthened with CFRP sheets under sustained loads, *Structures*, 33, 4690-4700. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.049

AL-Ridha, A. S. D., Abuzaid, E. K. M. and Abbood, A. A., 2018, Effect of addıtıon of chopped carbon fiber on the behavıor of reınforced concrete beams wıth varıable (shear dıstance to effectıve depth) ratıos, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 22(1), 137-148.

AL-Shalif, S. A. H., Akın, A., Aksoylu, C. and Arslan, M. H., 2022, Strengthening of shear-critical reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored GFRP fabrics applications, *Structures*, 44, 809-827. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.044

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.

Altin, S., Anil, Ö. and Kara, M. E., 2005, Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates, *Engineering Structures*, 27(5), 781-791. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.012

Altin, S., Tankut, T., Anil, Ö. and Demirel, Y., 2003, Response of reinforced concrete beams with clamps applied externally: An experimental study, *Engineering Structures*, 25(9), 1217-1229. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00082-8

Altun, F., Vekli, M., Özcan, D. M. ve Haktanır T., 2002, Mantolu betonarme kirişlerin taşıma gücünün deneysel incelenmesi, *Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu (ECAS2002)*, Ankara, 197-204.

Al-Zu'bi, M., Fan, M., Al Rjoub, Y., Ashteyat, A., Al-Kheetan, M. J. and Anguilano, L., 2021, The effect of length and inclination of carbon fiber reinforced polymer laminates on shear capacity of near-surface mounted retrofitted reinforced concrete beams, *Structural Concrete*, 22(6), 3677-3691. https://doi.org/10.1002/suco.202100198

Anıl, Ö., Altın, S., Kara, M. E., Kopraman, Y. ve Mertoğlu, Ç., 2011, Kesmede yetersiz betonarme kirişlerin cfrp ile dayanım ve sünekliğinin artırılması, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, 1-8.

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. and Korkmaz, H. H., 2007, What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey?, *Engineering Failure Analysis*, 14(1), 1-22. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.01.003

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

Aykaç, B. ve Acar, D., 2014, Betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılmış karbon kumaş ve çelik levhalardan oluşan kompozit malzemeyle güçlendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 175-183.

Barros, J. A. O. and Dalfré, G. M., 2013, Assessment of the effectiveness of the embedded through-section technique for the shear strengthening of reinforced concrete beams. *Strain*, 49(1), 75-93. https://doi.org/10.1111/str.12016

Barros, J. A. O. and Dias, S. J. E., 2006, Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams, *Cement and Concrete Composites*, 28(3), 276-292. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.11.003

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

Bentz, E. C., Vecchio, F. J. and Collins, M. P., 2006, Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements, *ACI Structural Journal*, 103(4), 614-624.

Bernardo, L. F. A., Nepomuceno, M. C. S. and Pinto, H. A. S., 2016, Flexural ductility of lightweight-aggregate concrete beams, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(5), 622-633. https://doi.org/10.3846/13923730.2014.914094

Bhat, J. A., 2022, An innovative technique of anchoring lacing bars with CFS sections for shear strengthening of RC beams, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 125. https://doi.org/10.1007/s41062-021-00722-7

Börekçi, M., 2019, Dolgu duvarlı betonarme binaların hakim periyodunun doğrudan formüller ile elde edilmesi, *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 161-178. https://doi.org/10.46373/hafebid.6079763.

Breveglieri, M., Aprile, A. and Barros, J. A. O., 2014, Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars, *Engineering Structures*, 81, 76-87. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.026

Cansız, S., 2021, A study on investigation of length of hugging zone of reinforced concrete beams, *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 13(2), 339-349. https://doi.org/10.29137/umagd.728936

Cansız, S., 2022, Türkiye'de kullanılan deprem yönetmeliklerinin özellikleri ve deprem hesabının değişimi. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 14(1), 58-71. https://doi.org/10.29137/umagd.948025

Chalioris, C. E. and Pourzitidis, C. N., 2012, Rehabilitation of shear-damaged reinforced concrete beams using self-compacting concrete jacketing, *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1-12. https://doi.org/10.5402/2012/816107

Choi, I.-R. and Park, H.-G., 2011, Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel ınfill plate, *Journal of Structural Engineering*, 137(6), 654-664. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000317

Collins, M. P., Mitchell, D., Adebar, P. and Vecchio, F. J., 1996, A general shear design method, *ACI Structural Journal*, 93(1), 36-45.

Czaderski, C., Hahnebach, B. and Motavalli, M., 2005, RC beam with variable stiffness and strength. *Construction and Building Materials*, 20(9), 824-833. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.038

De Lorenzis, L. and Nanni, A., 2001, Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods, *ACI Structural Journal*, 98(1), 60-68.

De Lorenzis, L. and Teng, J. G., 2007, Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 119-143. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2006.08.003

Demir, A., 2018, Betonarme yüksek kirişlerde kesme çatlağının artık yük taşıma kapasitesine etkisinin incelenmesi, Doktora tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

Demir, A., Ercan, E. and Demir, D. D., 2018, Strengthening of reinforced concrete beams using external steel members, *Steel and Composite Structures*, 27(4), 453-464. https://doi.org/10.12989/scs.2018.27.4.453

Dias, S. J. E. and Barros, J. A. O., 2008, Shear strengthening of t cross section reinforced concrete beams by near-surface mounted technique. *Journal of Composites for Construction*, 12(3), 300-311. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(300)

Dias, S. J. E. and Barros, J. A. O., 2010, Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates. *Engineering Structures*, 32(2), 373-384. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.10.001

Doğangün, A., 2020, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.

Ergün, S., 2014, Betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin dış donatılar ile arttırılması, Doktora tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.

Erkan, İ. H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M. H., 2019, Ön hasarlı kesme kirişlerinin çelik plakalar ile onarımı/güçlendirilmesi, *The International Alumınıum-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, *Evrim Yayınevi*, İstanbul.

Esen, B., Gündoğay, A., Yaman, S., Tekeli Kabaş, H. ve Demir, F., 2022, Betonarme kirişlerin davranışını etkileyen parametrelerin deneysel incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(3), 1043-1060. https://doi.org/10.17482/uumfd.1120435

Eurocode 2, 2004, Design of concrete structures - Part 11: General rules and rules for buildings. 2004.

Eurocode 8, 2004, Design of structures for earthquake resistance in Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.

Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B. and Foo, S., 2009, Shear strength of reinforced recycled concrete beams without stirrups, *Magazine of Concrete Research*, 61(7), 477-490. https://doi.org/10.1680/macr.2008.61.7.477

Fayyadh, M. M. and Abed, M. J., 2022, Utilizing CFRP and steel plates for repair of damaged RC beams with circular web openings, *Structural Engineering and Mechanics*, 84(1), 49-61. https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.1.049

Ferguson, P. M., Breen, J. E. and Jirsa, J. O.,1988, Reinforced concrete fundamentals.

Fu, L., Nakamura, H., Chi, S., Yamamoto, Y. and Miura, T., 2023, Shear strength degradation mechanism dependent on size increase in RC slender beams by using 3D Rigid-Body-Spring-Method. *Structures*, 48, 989-1002. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.016

Garip, E., 2011, Enine donatısız betonarme kirişlerin kesme mukavemeti, Yüksek lisans tezi, *Yıldız Teknik Ünivesitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Hadhood, A., Agamy, M. H., Abdelsalam, M. M., Mohamed, H. M. and El-Sayed, T. A., 2019, Shear strengthening of hybrid externally-bonded mechanically-fastened concrete beams using short CFRP strips: Experiments and theoretical evaluation, *Engineering Structures*, 201. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109795

Hamoush, S. and Ahmad, S. H., 1997, Concrete crack repair by stitches, *Materials and Structures*, 30, 418-423.

Hany, M., Makhlouf, M. H., Ismail, G. and Debaiky, A. S., 2022, Experimental shear strengthening of GFRC beams without stirrups using innovative techniques, *Structural Engineering and Mechanics*, 83(4), 415-433. https://doi.org/10.12989/sem.2022.83.4.415

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

Hou, R. and Xia, Y., 2021, Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010-2019, *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115741. https://doi.org/10.1016/J.JSV.2020.115741

Hu, B. and Wu, Y. F., 2018, Effect of shear span-to-depth ratio on shear strength components of RC beams, *Engineering Structures*, 168, 770-783. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.017

Huber, T., Huber, P. and Kollegger, J., 2019, Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups, *Engineering Structures*, 186, 26-42. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.074

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., Sarsam, K. F. and Muhammad, B. R., 2021, Size effect on the shear strength of reinforced concrete beams, *Engineering and Technology Journal*, 39(12), 1960-1976. https://doi.org/10.30684/etj.v39i12.2283

Jaber, H.T., 2021, Influence of size on the shear strength of reinforced concrete beams, Doctoral dissertation, *University of Technology*, Baghdad/Iraq.

Jalali, M., Sharbatdar, M. K., Chen, J. F. and Alaee, F. J., 2012, Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars, *Construction and Building Materials*, 36, 990-1000. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.068

Jayaprakash, J., Abdul Samad, A. A., Abbasovich, A. A. and Ali, A. A. A., 2008, Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips, *Construction and Building Materials*, 22(6), 1148-1165. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.008

Johnson, S. M., 1965, Deterioration, maintenance, and repair of structures, New York: McGraw Hill.

Kale, F. and Doğan, O., 2023, An experimental study to investigate shear performance of anchor bolt to strengthen an RC frame against lateral load, *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, https://doi.org/10.29137/umagd.1281639

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. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.12.005

Kani, G. N. J., 1964, The riddle of shear failure and its solution. *ACI Journal Proceedings*, 61(4), 441-468. https://doi.org/10.14359/7791

Kani, G. N. J., 1966, Basic facts concerning shear failure. *ACI Journal Proceedings*, 63(6), 675-692. https://doi.org/10.14359/7644

Kani, G. N. J., 1967, How safe are our large reinforced concrete beams? *ACI Journal Proceedings*, 64(3), 128-141. https://doi.org/10.14359/7549

Kaplan, H., Yilmaz, S., Binici, H., Yazar, E. and Çetinkaya, N., 2004, May 1, 2003 Türkey-Bingöl earthquake: damage in reinforced concrete structures, *Engineering Failure Analysis*, 11, 279-291. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2003.08.005

Karzad, A. S., Al Toubat, S., Maalej, M. and Estephane, P., 2017, Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer, *MATEC Web of Conferences*, Sharjah, 120,01008. https://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201712001008

Kaygusuz, M. A., 2018, Yüksek sıcaklık hasarına uğramış betonarme kirişlerin FRP ile onarım ve güçlendirilmesi, Doktora tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.

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.

Kishi, N., Mikami, H., Matsuoka, K. G. and Ando, T., 2002, Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar, *International Journal of Impact Engineering*, 27(9), 955-968. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00149-X

Kotsovos, M. D., 1986, Behavior of beams with shear span-to-depth ratios greater than 2.5, *ACI Journal*, 83(6), 1026-1034.

Kotynia, R., Oller, E., Marí, A. and Kaszubska, M., 2021, Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials – State-of-the-art in the experimental tests, *Composite Structures*, 267, 113891. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113891

Kwak Y.K., Eberhard, M.O., Kim, W.S. and Kim, J., 2002, Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, *ACI Structural Journal*, 99(4), 530-538.

Lafta, Y. J. and Ye, K., 2016, Specification of deep beams affect the shear strength capacity, *Civil and Environmental Research*, 8(2), 56-68.

Li, W. and Leung, C. K. Y., 2016, Shear span–depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip, *Journal of Composites for Construction*, 20(3). https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000627

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

Ma, G. and Li, H., 2017, Acoustic emission monitoring and damage assessment of FRP-strengthened reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 144, 86-98. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.169

Marí, A., Bairán, J., Cladera, A., Oller, E. and Ribas, C., 2015, Shear-flexural strength mechanical model for the design and assessment of reinforced concrete beams, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(11), 1399-1419. https://doi.org/10.1080/15732479.2014.964735

Matamoros, A. B. and Wong, K. H., 2003, Design of simply supported deep beams using strut-and-tie models, *ACI Structural Journal*, 100(6), 704-712.

Meda, A., Minelli, F. and Plizzari, G. A., 2012, Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete, *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2930-2937. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.06.003

Miruthun, G., Vivek, D., Remya, P. R., Elango, K. S., Saravanakumar, R. and Venkatraman, S., 2021, Experimental investigation on strengthening of reinforced concrete beams using GFRP laminates, *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 2744-2748. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.544

Mofidi, A. and Chaallal, O., 2014, Tests and design provisions for reinforced-concrete beams strengthened in shear using FRP sheets and strips, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 117-128. https://doi.org/10.1007/s40069-013-0060-1

Monicka, R. and John, A., 2018, Shear strengthenıng of reınforced concrete deep beams usıng embedded through sectıon (ETS) technıque. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(5), 1398-1403.

Monney, F., Ruiz, M. F. and Muttoni, A., 2023, Influence of amount of shear reinforcement and its post-yield response on the shear resistance of reinforced concrete members, *Structural Concrete*, 24(1), 1002-1034. https://doi.org/10.1002/suco.202200331

Mörsch, E., 1909, Concrete-steel construction (Der Eisenbetonbau) Ernest Payson Goodrich'den çeviri, *Engineering news publishing Company*, https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797951250560

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

Müsevitoğlu, A., 2019, Kimyasal ankrajların eksenel çekme etkisi altında davranışlarının deneysel ve analitik olarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.

Müsevitoğlu, A., Arslan, M. H., Aksoylu, C. and Özkış, A., 2020, Experimental and analytical investigation of chemical anchors's behaviour under axial tensile, *Measurement*, 158, 107689. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107689

Naderpour, H. and Alavi, S. A., 2017, A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *Composite Structures*, 170, 215-227. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.028

Naqash, M. T., Alluqmani, A. E. and Farooq, Q. U., 2024, A comparative analysis of design and analysis methods for steel connections: contrasting American and

European perspectives, *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, 15(1), 14–30. https://doi.org/10.1007/S43995-023-00037-X

Naaman, A. and Jeong, M., 1995, Structural ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures: proceedings of the second international RILEM symposium (Vol. 29, p. 379)*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Naughton, J. W. and Sheplak, M. (2002). Modern developments in shear-stress measurement, *Progress in Aerospace Sciences*, 38(6-7), 515-570. https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00031-3

Nghiep, V. H., 2011, Shear design of straight and haunched concrete beams without stirrups, Doctoral Thesis, *Department of Civil Engineering, Hamburg University*, Germany. https://doi.org/10.15480/882.1050

Odacioglu, O. G., Dogan, O. and Kale, F., 2022, An experimental study to determine the optimum depth of steel anchors in RC subjected to shear force, *Structures*, 44, 1321-1327. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.043

Ojaimi, M.F., 2021, Experimental study on shear strengthening of reinforced concrete beams using different techniques of concrete jacketing, *Basrah Journal of Engineering Science*, 21(2), 53-61. https://doi.org/10.33971/bjes.21.2.8

Orbay, A., 2005, Ayrıntılı Örnekleriyle Betonarme I., *Birsen Yayınevi*, İstanbul.

Osman, B. H., Wu, E., Ji, B. and Abdulhameed, S. S., 2017, Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 171-183. https://doi.org/10.1007/s40069-016-0182-3

Ozturk, M., Arslan, M. H. and Korkmaz, H. H., 2023, Effect on RC buildings of 6 February 2023 Turkey earthquake doublets and new doctrines for seismic design, *Engineering Failure Analysis*, 153, 107521. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107521

Öcal, C. ve İnce, H. H., 2012, Türkiye'de mevcut yapı stoğu ve kentsel dönüşüm International Journal of Technological Sciences, 4(2), 89-95.

Özmen, A. ve Sayın, E., 2021, Deprem etkisinde çok katlı betonarme bir binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre eşdeğer deprem yüklerinin karşılaştırılması, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 124-133. https://doi.org/10.47495/okufbed.797889

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.

Özuygur, A. R., 2020, ACI318 & TS500 Karşılaştırmalı Betonarme, *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara.

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.

Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K. and Barai, S. V., 2013, Shear strengthening effect by bonded GFRP strips and transverse steel on RC T-beams, *Structural Engineering and Mechanics*, 47(1), 75-98. https://doi.org/10.12989/sem.2013.47.1.075

Park, R. and Paulay, T., 1991, Reinforced concrete structures, *John Wiley & Sons*, New York.

Pham, T. M., Chen, W., Elchalakani, M., Karrech, A. and Hao, H., 2020, Experimental investigation on lightweight rubberized concrete beams strengthened with BFRP sheets subjected to impact loads, *Engineering Structures*, 205, 10095. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110095

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

Rahal, K. N. and Rumaih, H. A., 2011, Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars, *Engineering Structures*, 33(1), 53-62. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.017

Raju, 2014, Review on shear behaviour of reinforced concrete beam without transverse reinforcement, *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(8), 116-121.

Rashid, M., Bhat, J. A. and Waseem, S. A., 2022, Strengthening of RC beams with CFS angle sections: performance assessment of various anchoring solutions, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5), 284. https://doi.org/10.1007/s41062-022-00889-7

Raval, C., Machhi, C. and Shah, S., 2020, experımental study on shear behavıour of RC beam strengthened by AFRP sheet, *International Journal of All Research Writings*, 3(1), 62-68.

Ritter, W., 1899, Die bauweise hennebique (hennebiques construction method).

Rizzo, A. and De Lorenzis, L., 2009, Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement, *Construction and Building Materials*, 23(4), 1555-1567. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.014

Ruiz, M. F., Muttoni, A. and Sagaseta, J., 2015, Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects, *Engineering Structures*, 99, 360-372. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.05.007

Saatci, S. and Vecchio, F. J., 2009, Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 106(1), 78.

Sahoo, D. R., Bhagat, S. and Reddy, T. C. V., 2016, Experimental study on shear-span to effective-depth ratio of steel fiber reinforced concrete T-beams, *Materials and Structures*,, 49(9), 3815-3830. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0756-6

Samad, A. A. A., Mohamad, N., Ali, N., Jayaprakash, J. and Mendis, P., 2016, Rehabilitation of continuous reinforced concrete beams in shear by external bonding of carbon fiber reinforced polymer strips for sustainable construction, *Key Engineering Materials*, 708, 49-58. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.708.49

Shen, D., Li, M., Liu, C., Kang, J., Li, C. and Yang, J., 2021, Seismic performance of corroded reinforced concrete beam-column joints repaired with BFRP sheets, *Construction and Building Materials*, 307, 124731. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124731

Siddika, A., Saha, K., Mahmud, M. S., Roy, S. C., Mamun, M. A. A. and Alyousef, R., 2019, Performance and failure analysis of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) strengthened reinforced concrete (RC) beams, *SN Applied Sciences*, 1(12), 1617. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1675-x

Sogut, K., 2022, FRP Shear Strengthening of Concrete Beams, Doctoral dissertation, *University of Birmingham*, Birmingham/England.

Şenol, A. F., 2023, Betonarme binaların deprem performansının belirlenmesi: binanız depreme ne kadar dayanıklı?, *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, Konya, 262-267.

Taerwe, L. (1995). Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium (1st ed.), *CRC Press*, London. https://doi.org/10.1201/9781482271621

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.

Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J. and Chen, J. F., 2003, Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs, *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 447–462. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00043-6

Triantafyllou, G. G., Rousakis, T. C. and Karabinis, A. I., 2018, Effect of patch repair and strengthening with EBR and NSM CFRP laminates for RC beams with low, medium and heavy corrosion, *Composites Part B: Engineering*, 133, 101-111. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2017.09.029

TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS-EN 1504-3, Beton yapıların korunması ve tamiri için mamuller ve sistemler - Tarifler, gerekler, kalite kontrol ve uygunluk değerlendirmesi - Bölüm 3: Yapısal olan ve yapısal olmayan tamir, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2006, s.27.

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.

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 thesıs, *European University of Lefke Institute of Graduate Studies and Research*, Lefke/KKTC.

Uysal, Y. M., 2019, Kesme donatısız betonarme kirişlerin kesme etkisindeki davranışlarının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.

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: 45º 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.

Ünal, A., 2016, Sabit dikdörtgen kesitli kirişlerin farklı mesnet koşullarında kesme kapasitesinin araştırılması, Doktora tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Üstün, S., 2020, Betonarme kirişlerde etriye açısının kesme davranışına etkisinin deneysel ve teorik analizi, Yüksek lisans tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

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)

Vegera P., Khmil R. and Blikharskyy Z., 2015, The shear capacity of reinforced concrete beams with different shear span to effective depth ratio, *Zeszyty Naukowe Politechniki Często-chowskiej, Budownictwo*, 21(171), 355-364.

Vegera, P., Khmil, R., Vashkevych, R. and Blickharskyy, Z., 2019, Comparison crack resistance of RC beams with and without transverse reinforcement after shear

testing, *Conference Quality Production Improvement - CQPI*, 1(1), 342-349. https://doi.org/10.2478/cqpi-2019-0046

Vegera, P., Vashkevych, R. and Blikharskyy, Z., 2018, Fracture toughness of RC beams with different shear span, *MATEC Web of Conferences*, 174, 02021. https://doi.org/10.1051/matecconf/201817402021

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

Yilmaz, 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