

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI BİLİM DALI**

**BETONARME KİRİŞ ELEMANLARININ FARKLI YERLEŞİM
ŞEKİLLERİNE SAHİP CFRP İLE GÜÇLENDİRİLEREK
ÇARPMA ETKİSİ ALTINDA DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Ömer KARABACAK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erkan KANTAR**

MANİSA-2024

Ömer
KARABACAK

BETONARME KIRIŞ ELEMANLARININ FARKLI YERLEŞİM ŞEKİLLERİNE SAHİP ÇFRP İLE
GÜÇLENDİRİLEREK ÇARPMA ETKİSİ ALTINDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Ömer KARABACAK



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ömer KARABACAK
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Erkan KANTAR

Betonarme yapı elemanlarının dinamik yüke maruz kaldıkları birçok durum vardır ve son yıllarda bu elemanların güçlendirilmesi için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını iki farklı yükseklikten ağırlık düşürücü test düzeneği ile deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla 1.000x100x200 mm boyutlarında 14 adet betonarme kiriş deney elemanı üretilmiştir.

Deney elemanları 1 ve 1,5 m düşme yüksekliği değişkeni için 2 gruba ayrılmış olup, her bir gruptan birer adet deney elemanına güçlendirme uygulanmamıştır. Her grupta kalan 6 adet betonarme kiriş farklı yerleşim şekilleri uygulanarak CFRP ile güçlendirilmiştir. Deney elemanları, iki farklı yükseklikten aynı çekiç kütlesi etkisi altında test edilmiş ve çarpma etkisi göçme meydana gelene kadar uygulanmıştır.

Deney elemanlarının çarpma etkisi altında verdikleri tepkiler ise sağ ve sol ivmeölçerler, kuvvet algılayıcısı, yer değişimi algılayıcı ile ölçülmüş ve veri toplama aygıtlarıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen test sonuçları kullanılarak ivme-zaman, kuvvet-zaman, deplasman-zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri oluşturulmuş, deneysel sonuçlar incelenmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: betonarme kiriş, CFRP, güçlendirme, ağırlık düşürme testi, çarpma etkisi

2024, 182 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Ömer KARABACAK
Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Erkan KANTAR

There are many cases in which concrete structural elements are exposed to dynamic impact loads, and in order to reinforce these elements carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites have been used in recent years.

The objective of this thesis is to make experimental investigation of reinforced concrete beam elements strengthened with CFRP having different layout shapes under impact effect using drop-weight test with two different heights. For that purpose, 14 concrete beam samples were produced with the dimensions of 1.000x100x200 mm.

The reinforced concrete beam elements were divided into two groups for the 1 and 1,5 m drop-weight test variable, and one of the beam elements from each group was un-strengthened. The remaining six specimens in each group were reinforced with CFRP using different layout shapes.

The specimens were tested under the impact effect of the same hammer from two different heights, and the impact load was applied to the beams until collapse.

The responses of the specimens under the impact effect were measured with the help of the right and left accelerometers, force and displacement sensors, and then transferred to the data and recorded. Using these experimental results, acceleration-time, force-time, displacement-time and force-displacement graphs were created. The experimental results have been examined and interpreted.

Keywords: reinforced concrete beam, CFRP, strengthening, drop-weight test, impact effect

2024, 182 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışları iki farklı yükseklikten ağırlık düşürme testi ile deneysel olarak incelenmiş, giriş, literatür araştırması, materyal method, deneysel çalışma, sonuç ve öneriler başlıkları altında sunulmuştur.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, desteklerini ve zamanını benden esirgemeyen değerli tez danışmanı hocam Dr. Öğr. Üyesi Erkan KANTAR'a, bu tez çalışması süresince yardım ve katkılarıyla bana destek olan değerli Doç. Dr. Recep Tuğrul ERDEM'e ve yol gösterici katkılarından dolayı değerli jüri üyesi Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Alper ÇANKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

CFRP malzeme tedariki sağlayan Telateks A.Ş.-METYX® Composites şirketi yönetimine, deney aşamasındaki yardımlarından dolayı Er Prefabrik şirketine ve İnşaat Mühendisi Cihan ALTIN'a, değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca, tez çalışmamda ve hayatım boyunca desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyerek yanımda olan çok kıymetli aileme teşekkür ederim.

Ömer KARABACAK
Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
dB	Desibel
GB	Gigabayt
g/cm³	Gram/santimetreküp
GPa	Gigapascal
gr/m²	Gram/metrekare
Hz	Hertz
kg	Kilogram
kg/m²	Kilogram/metrekare
kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
kV	Kilovolt
m	Metre
m³	Metreküp
mA	Miliamper
max.	Maximum
MBit/sn	Megabit/saniye
MHz	Megahertz
min.	Minimum
mm	Milimetre
mm/dak	Milimetre/dakika
MPa	Megapascal
µs	Mikrosaniye
ms	Milisaniye
m/s	Metre/saniye
mV	Milivolt
N	Newton
N/mm²	Newton/milimetrekare
ns	Nanosaniye
pF	Güç faktörü
s	Saniye

W	Watt
V	Volt
Ø	Fi
Ω	Ohm
ACI	American Concrete Institute (Amerikan beton enstitüsü)
AFRP	Aramid fiber reinforced polymer (Aramid lif takviyeli polimer)
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer (Karbon lif takviyeli polimer)
FRP	Fiber reinforced polymer (Lif takviyeli polimer)
GFRP	Glass fiber reinforced polymer (Cam lif takviyeli polimer)
KFRP	Kevlar fiber reinforced polymer (Kevlar lif takviyeli polimer)
LVDT	Linear variable differential transformer (Doğrusal değişkenli fark transformatörü)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tek çarpma tipi kuvvet zaman grafiği	3
Şekil 1.2. Çarpma türü kuvvetin basit fonksiyonlarla ifade edilmesi: a.dikdörtgen çarpma, b. yarım-sinüs çarpma, c. üçgen çarpma.....	4
Şekil 1.3. Eşit genlikli üç çarpma kuvvetinin spektrumları	4
Şekil 2.1. Tang ve ark. deney düzeneği	11
Şekil 2.2. Beton dayanımına göre düşü sayısı- düşü yüksekliği grafiği.....	13
Şekil 2.3. Anıl ve ark. deney elemanlarının güçlendirme detayları	18
Şekil 2.4. Pham ve ark. deney elemanlarının güçlendirme sarım şekli	19
Şekil 2.5. Fujikake ve ark. deney elemanı güçlendirme detayları.....	21
Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan Metyx Composites CFRP kumaş	34
Şekil 3.2. Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı	35
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan çelik plaka ve kirişe monte edilmiş hali	38
Şekil 3.4. Serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği	39
Şekil 3.5. Mesnet bağlantı aparatları	40
Şekil 3.6. Çekiç, çekiç ağırlıkları, kuvvet algılayıcı, yarı küresel çekiç ucu	41
Şekil 3.7. Optik fotoseller	42
Şekil 3.8. ICP 350B04 ivmeölçerler ve montaj şekli	45
Şekil 3.9. ICP 205C kuvvet algılayıcı	47
Şekil 3.10. Yer değişimi algılayıcı (LVDT) yerleşimi	48
Şekil 3.11. DEWE-43A veri toplama aygıtı	48
Şekil 3.12. TESTBOX 2010 cihazı	52
Şekil 3.13. PCB 002C50 model kabloları.....	52
Şekil 3.14. Betonarme kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı.....	54
Şekil 3.15. Kiriş deney elemanları için üretilen kalıplar	55
Şekil 3.16. Deney elemanı ve deney ölçüm cihazı montaj vidaları yerleşim görünüşü, a. yan görünüş, b. üst görünüş-1, c. üst görünüş-2, d.deney ölçüm cihazı montaj vidalarının kalıplardaki görünüşü	56
Şekil 3.17. Beton dökümü öncesi kalıp ve donatı görünümü	58
Şekil 3.18. Beton döküm işlemi	59
Şekil 3.19. Çelik çubuk ile şişleme sıkıştırma işlemi: a. küp numunede, b. ve c. kiriş deney elemanlarında.....	59
Şekil 3.20. a. Tokmaklama işlemi, b. ve c. mala ile yüzey düzeltme işlemi	60
Şekil 3.21. Deney ölçüm cihazı montaj vidaları yerleştirilmiş deney elemanları	60
Şekil 3.22. a. ve b. Kalıp söküm işlemi, c. kalıp sökümü tamamlanmış hali.....	61
Şekil 3.23. Basınç deneyi beton küp numunelerinin a. kalıptan çıkarılması, b. kalıptan çıkarılmış halleri, c. kür havuzundaki halleri.....	62
Şekil 3.24. Basınç dayanım deneyi.....	62
Şekil 3.25. B1-1 ve B2-1 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	64
Şekil 3.26. B1-2 ve B2-2 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	65
Şekil 3.27. B1-3 ve B2-3 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	65
Şekil 3.28. B1-4 ve B2-4 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	66
Şekil 3.29. B1-5 ve B2-5 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	67
Şekil 3.30. B1-6 ve B2-6 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	67
Şekil 3.31. B1-7 ve B2-7 isimli kirişlerin güçlendirme şekli.....	68
Şekil 3.32. Taşlama işlemi	69
Şekil 3.33. CFRP'nin yapıştırılacağı bölgelere çizim yapılması	69
Şekil 3.34. Deney elemanlarında kullanılan CFRP kumaş kesim örnekleri	70

Şekil 3.35. Epoksi karıştırma işlemi.....	70
Şekil 3.36. CFRP kumaşların epoksi ile yapıştırılma işlemi.....	71
Şekil 3.37. Çelik plaka ve deney ölçüm cihazı montaj vidaların kısaltılması ...	71
Şekil 3.38. Deney elemanlarının çarpma deneyi öncesi hali: a. B1-1 & B2-1, b. B1-2 & B2-2, c. B1-3 & B2-3, d. B1-4 & B2-4, e. B1-5 & B2-5, f. B1-6 & B2-6, g. B1-7 & B2-7	72
Şekil 4.1. Deney elemanı mesnet yerleşim yeri ve geometrisi	74
Şekil 4.2. Deneye hazır hale getirilen çarpma deney düzeneği.....	75
Şekil 4.3. Çarpma deneyi ölçüm aletlerinin yerleşimi.....	76
Şekil 4.4. B1-1 deney elemanı çarpma deneyi.....	78
Şekil 4.5. B1-1 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	79
Şekil 4.6. B1-1 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	80
Şekil 4.7. B1-1 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	80
Şekil 4.8. B1-1 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman	81
Şekil 4.9. B1-1 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	82
Şekil 4.10. B1-1 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman	83
Şekil 4.11. B1-1 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	84
Şekil 4.12. B1-2 deney elemanı çarpma deneyi	85
Şekil 4.13. B1-2 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	85
Şekil 4.14. B1-2 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	86
Şekil 4.15. B1-2 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	86
Şekil 4.16. B1-2 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	87
Şekil 4.17. B1-2 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	88
Şekil 4.18. B1-2 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	89
Şekil 4.19. B1-2 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	90
Şekil 4.20. B1-3 deney elemanı çarpma deneyi.....	91
Şekil 4.21. B1-3 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	91
Şekil 4.22. B1-3 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	92
Şekil 4.23. B1-3 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	92
Şekil 4.24. B1-3 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	93
Şekil 4.25. B1-3 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	94
Şekil 4.26. B1-3 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	95
Şekil 4.27. B1-3 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	96
Şekil 4.28. B1-4 deney elemanı çarpma deneyi.....	97
Şekil 4.29. B1-4 deney elemanında oluşan a. ilk hasar durumu, b. ilerleyen düşmelerde plakanın sabitlendiği ön vida boyunca oluşan beton örtüsü dökülmesi	98
Şekil 4.30. B1-4 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	98

Şekil 4.31. B1-4 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	99
Şekil 4.32. B1-4 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	100
Şekil 4.33. B1-4 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	101
Şekil 4.34. B1-4 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	102
Şekil 4.35. B1-4 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	103
Şekil 4.36. B1-5 deney elemanı çarpma deneyi	104
Şekil 4.37. B1-5 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	105
Şekil 4.38. B1-5 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	105
Şekil 4.39. B1-5 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	106
Şekil 4.40. B1-5 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	107
Şekil 4.41. B1-5 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	108
Şekil 4.42. B1-5 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	109
Şekil 4.43. B1-5 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	110
Şekil 4.44. B1-6 deney elemanı çarpma deneyi	111
Şekil 4.45. B1-6 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	111
Şekil 4.46. B1-6 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	112
Şekil 4.47. B1-6 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	112
Şekil 4.48. B1-6 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	113
Şekil 4.49. B1-6 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	114
Şekil 4.50. B1-6 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	115
Şekil 4.51. B1-6 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	116
Şekil 4.52. B1-7 deney elemanı çarpma deneyi	117
Şekil 4.53. B1-7 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	117
Şekil 4.54. B1-7 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	118
Şekil 4.55. B1-7 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	118
Şekil 4.56. B1-7 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	119
Şekil 4.57. B1-7 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	120
Şekil 4.58. B1-7 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	121
Şekil 4.59. B1-7 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	122
Şekil 4.60. B2-1 deney elemanı çarpma deneyi	123
Şekil 4.61. B2-1 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	123
Şekil 4.62. B2-1 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	124
Şekil 4.63. B2-1 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	124

Şekil 4.64. B2-1 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	125
Şekil 4.65. B2-1 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	126
Şekil 4.66. B2-1 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	127
Şekil 4.67. B2-1 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	128
Şekil 4.68. B2-2 deney elemanı çarpma deneyi	129
Şekil 4.69. B2-2 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	129
Şekil 4.70. B2-2 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	130
Şekil 4.71. B2-2 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	130
Şekil 4.72. B2-2 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	131
Şekil 4.73. B2-2 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	132
Şekil 4.74. B2-2 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	133
Şekil 4.75. B2-2 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	134
Şekil 4.76. B2-3 deney elemanı çarpma deneyi	135
Şekil 4.77. B2-3 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	135
Şekil 4.78. B2-3 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	136
Şekil 4.79. B2-3 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	136
Şekil 4.80. B2-3 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	137
Şekil 4.81. B2-3 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	138
Şekil 4.82. B2-3 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	139
Şekil 4.83. B2-3 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	140
Şekil 4.84. B2-4 deney elemanı çarpma deneyi	141
Şekil 4.85. B2-4 deney elemanında oluşan a. ilk hasar durumu	141
Şekil 4.86. B2-4 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	142
Şekil 4.87. B2-4 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	142
Şekil 4.88. B2-4 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	143
Şekil 4.89. B2-4 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	144
Şekil 4.90. B2-4 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	145
Şekil 4.91. B2-4 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	146
Şekil 4.92. B2-5 deney elemanı çarpma deneyi	147
Şekil 4.93. B2-5 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	147
Şekil 4.94. B2-5 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	148
Şekil 4.95. B2-5 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü.....	148
Şekil 4.96. B2-5 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	149

Şekil 4.97. B2-5 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	150
Şekil 4.98. B2-5 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	151
Şekil 4.99. B2-5 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	152
Şekil 4.100. B2-6 deney elemanı çarpma deneyi	153
Şekil 4.101. B2-6 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	153
Şekil 4.102. B2-6 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	154
Şekil 4.103. B2-6 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü...	154
Şekil 4.104. B2-6 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	155
Şekil 4.105. B2-6 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman.....	156
Şekil 4.106. B2-6 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	157
Şekil 4.107. B2-6 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	158
Şekil 4.108. B2-7 deney elemanı çarpma deneyi	159
Şekil 4.109. B2-7 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu.....	159
Şekil 4.110. B2-7 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu.....	160
Şekil 4.111. B2-7 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü...	160
Şekil 4.112. B2-7 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	161
Şekil 4.113. B2-7 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	162
Şekil 4.114. B2-7 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman.....	163
Şekil 4.115. B2-7 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman	164
Şekil 4.116. İlk hasar düşme sayısı- deney elemanı grafiği.....	166
Şekil 4.117. a. B1 grubu ilk hasarın gözlendiği düşme sayısı grafiği, a. B1 grubu ilk hasarın gözlendiği düşme sayısı grafiği, c. B1-1 deney elemanına göre B1 grubu ilk hasar düşme sayısı fark yüzdesi, d. B2-1 deney elemanına göre B2 grubu ilk hasar düşme sayısı fark yüzdesi	166
Şekil 4.118. Göçme durumu düşme sayısı- deney elemanı grafiği	167
Şekil 4.119. a. B1 grubu göçmenin gözlendiği düşme sayısı grafiği, a. B1 grubu göçmenin gözlendiği düşme sayısı grafiği, c. B1-1 deney elemanına göre B1 grubu göçme düşme sayısı fark yüzdesi, d. B2-1 deney elemanına göre B2 grubu göçme düşme sayısı fark yüzdesi	168
Şekil 4.120. Deney elemanlarının ivme değerlerinin karşılaştırılması: a. ilk hasar durumu, b. göçme durumu	169
Şekil 4.121. Deney elemanlarının ilk hasar kuvvet değerleri	170
Şekil 4.122. Deney elemanlarının göçme kuvvet değerleri	170
Şekil 4.123. Deney elemanlarının ilk hasar deplasman değerleri	171
Şekil 4.124. Deney elemanlarının göçme deplasman değerleri	171
Şekil 4.125. İlk hasar kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği	172
Şekil 4.126. Göçme durumu kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği	173
Şekil 4.127. B1 grubu deney elemanlarının ilk hasar kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması	174

Şekil 4.128. B2 grubu deney elemanlarının ilk hasar kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması	174
Şekil 4.129. B1 grubu deney elemanlarının göçme kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması	175
Şekil 4.130. B2 grubu deney elemanlarının göçme kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması	175
Şekil 4.131. Deney elemanlarının hasar durumuna göre sıçrama sayıları.....	176



TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Donatıların mekanik özellikleri.....	33
Tablo 3.2. Bir m ³ C16/20 beton tasarımı için gerekli malzeme miktarları	33
Tablo 3.3. Deneyisel çalışmada kullanılan Metyx marka CFRP özellikleri	34
Tablo 3.4. Teknobond 330 Epoksi Esaslı Yapıştırıcı tanım, özellik ve uygulama bilgileri	35
Tablo 3.5. Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri.....	37
Tablo 3.6. ICP 350B04 ivmeölçer teknik özellikleri	44
Tablo 3.7. ICP 205C kuvvet algılayıcı modeli teknik özellikleri	46
Tablo 3.8. DEWE-43A teknik özellikleri.....	49
Tablo 3.9. TESTBOX 2010 veri toplayıcı özellikleri.....	51
Tablo 3.10. PCB 002C50 model kablo özellikleri	52
Tablo 3.11. Beton basınç dayanım değerleri	63
Tablo 3.12. Kiriş ismine göre güçlendirme şekli ve CFRP özellikleri	64
Tablo 4.1. Deney sonuçları.....	78
Tablo 4.2. B1-1 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	81
Tablo 4.3. B1-2 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	87
Tablo 4.4. B1-3 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	93
Tablo 4.5. B1-4 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	99
Tablo 4.6. B1-5 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	106
Tablo 4.7. B1-6 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	113
Tablo 4.8. B1-7 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	119
Tablo 4.9. B2-1 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	125
Tablo 4.10. B2-2 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	131
Tablo 4.11. B2-3 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	137
Tablo 4.12. B2-4 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	143
Tablo 4.13. B2-5 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	149
Tablo 4.14. B2-6 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	155
Tablo 4.15. B2-7 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri	161
Tablo 4.16. Deneyisel çalışmadan elde edilen sonuçlar.....	165
Tablo 4.17. Deney elemanlarının hasar durumuna göre enerji yutma kapasiteleri	176
Tablo 4.18. Deney elemanlarının hasar durumuna göre sıçrama sayıları	177

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLO DİZİNİ	XII
İÇİNDEKİLER.....	XIII

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1. GİRİŞ	1
1.1. Lif Takviyeli Polimer (FRP).....	6
1.2. CFRP.....	8

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
--------------------------------	---

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL-METHOD

3. MATERYAL-METHOD	32
3.1. Malzemeler.....	32
3.1.1. Plywood Kalıp Malzemesi.....	32
3.1.2. Donatı Çeliği.....	32
3.1.3. Beton.....	33
3.1.4. CFRP	33
3.1.5. Epoksi Esaslı Yapıştırıcı	34
3.1.6. Çelik Plaka	37
3.1.7. Serbest Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği	38
3.1.8. Optik Fotoseller.....	41
3.1.9. Ölçüm Aygıtları.....	43
3.1.9.1. İvmeölçer.....	43
3.1.9.2 Kuvvet Algılayıcı	45
3.1.9.3. Doğrusal Değişkenli Fark Transformatörü	47
3.1.10. Veri Toplama Aygıtları.....	48
3.1.10.1. DEWE-43 A modeli	48
3.1.10.2. TESTBOX 2010	50
3.1.11. Ölçüm Cihazları Bağlantı Kabloları.....	52
3.2. Deney Elemanları	53
3.2.1. Kiriş Deney Elemanlarının Hazırlanması	53
3.2.1.1. Kiriş Deney Elemanlarının Kesit Özellikleri	53
3.2.1.2. Kiriş Deney Elemanı Kalıplarının Üretimi.....	54
3.2.1.3. Donatı Hazırlama	57
3.2.1.4. Kalıplarının Temizlenmesi ve Yağlanması	57
3.2.1.5. Donatıların Kalıplara Yerleştirilmesi	57

3.2.1.6. Beton Döküm Aşaması	58
3.2.1.7. Deney Ölçüm Cihazı Montaj Vidalarının Yerleştirilmesi	60
3.2.1.8. Deney Elemanlarının Kalıplardan Çıkarılması.....	61
3.2.1.9. Basınç Dayanım Deneyleri	62
3.2.2. Kiriş Deney Elemanlarının CFRP İle Güçlendirilmesi.....	63
3.2.2.1. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi	63
3.2.2.2. CFRP'nin Yapıştırılacağı Yüzey Hazırlığı	68
3.2.2.3. CFRP'nin Yapıştırılacağı Bölgelere Çizim Yapılması ...	69
3.2.2.4. CFRP Kumaşların Kesilmesi	70
3.2.2.5. CFRP Kumaşların Yapıştırılması.....	70
3.2.2.6. Deney Ölçüm Cihazı Montaj Vidalarının Kesilmesi	71

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	73
4.1. Deneyler	77
4.1.1. B1-1 Deney Elemanı.....	78
4.1.2. B1-2 Deney Elemanı.....	85
4.1.3. B1-3 Deney Elemanı.....	91
4.1.4. B1-4 Deney Elemanı.....	97
4.1.5. B1-5 Deney Elemanı.....	104
4.1.6. B1-6 Deney Elemanı.....	111
4.1.7. B1-7 Deney Elemanı.....	117
4.1.8. B2-1 Deney Elemanı.....	123
4.1.9. B2-2 Deney Elemanı.....	129
4.1.10. B2-3 Deney Elemanı.....	135
4.1.11. B2-4 Deney Elemanı.....	141
4.1.12. B2-5 Deney Elemanı.....	147
4.1.13. B2-6 Deney Elemanı.....	153
4.1.14. B2-7 Deney Elemanı.....	159
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	165

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	178
----------------------------	-----

ALTINCI BÖLÜM

KAYNAKLAR

KAYNAKLAR.....	180
----------------	-----

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği alanındaki sürekli gelişim, mühendislik yapılarının performansını ve dayanıklılığını artırma maksadıyla yeni teknolojilere ilham oldu. Son yıllarda, aşırı yük altındaki yapılar için bir tasarım standardı geliştirmek amacıyla, güvenliği artırmak ve ölüm riskini azaltmak için çarpmaya dayanıklı yapıların tasarımına büyük önem verilmekte [1].

Başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla sertleşen beton; çimento, agrega, su ve isteğe bağlı katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen bir malzeme olup, içerdiği malzeme çeşitliliğinden dolayı kompozit bir malzeme gibi davranabilmektedir. Günümüzde insan hayatının her aşamasında çok yaygın kullanılan bir yapı malzemesi olan beton; bina, köprü ve su yapıları (baraj, kanal vb.) inşa edilirken hem taşıyıcı eleman olarak hem de dekoratif amaçlı çok yaygın kullanıma sahiptir. Çok çeşitli sektörlerde önemli alanlarda tercih edilmesinin başlıca nedenleri; dayanıklılığı, yangına karşı direnci, ekonomikliği, yerinde imalat kolaylığı ile istenilen her yerde üretilebilir olması, su geçirmezliği ve ses yalıtımıdır. Beton yüksek basınç dayanımına sahip olmasının yanı sıra düşük çekme dayanımına da sahiptir. Bu nedenle eğilme ve çekme dayanımını artırmak için çelik ile güçlendirilen betonarme sistemler geliştirilmiştir.

Betonarme yapı elemanları, kullanıldıkları süre zarfında çok çeşitli yüklere maruz kalırlar ve bu yükler genel olarak statik ve dinamik yükler olarak sınıflandırılmaktadır.

Statik yükler, yapı malzemeleri, yapı üzerinde yer alan sabit ve depolama alanları ve depolanan malzemelerin toplam ağırlığından oluşur ve herhangi bir yapının veya yapı elemanının ağırlık, boyut ve yapıldığı malzeme çeşidine göre değişir. Statik yükleri yapıyı oluşturan temel, kolon, kiriş, döşeme, duvar, çatı gibi elemanların yapıldıkları malzeme bazlı ağırlıkları ile çeşitli tesisatlar gibi yapıya sabit olacak şekilde entegre edilmiş her tür malzemenin ağırlıkları oluşturur. Bu yüklerin uyguladığı kuvvet sabit kaldığı için dinamik yüklerden farklıdır.

Dinamik yükler anlık oluşur ve belirli zaman aralıklarında devam eder, zamana ve dış koşullara göre büyüklüğü değiştiği için kalıcı değildir ancak etkileri çok büyük olabilmektedir.

Kısa sürede büyük genliğe sahip olan çarpma yükü, beton ve çelik gibi malzemelerde gerinim oranı etkilerine neden olurken, yapılarda da atalet etkilerine neden olur. Bu etkiler, beton yapıların statik yüke kıyasla çarpma yükü altında büyük ölçüde farklı davranışlarına yol açabilir [2].

Kolon, kiriş, döşeme gibi betonarme yapılar statik yüklere ek olarak, çarpma, yorulma, deprem, rüzgâr gibi dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Betonarme yapılar imal edilirken şantiye alanında veya herhangi bir yerde meydana gelen küçük veya büyük kütleli cisim düşmesi gibi kazalar; kasırga kaynaklı rüzgarla taşınan enkaz parçalarının çarpması, dağların eteklerinde bulunan tünel, yol gibi yapılara yol kenarındaki yamaçlardan düşen, kopup gelen kaya parçalarının çarpması, buzulların kopup çarpması gibi doğal afetler; betonarme yapılara ve yapısal elemanlara otomobil, otobüs, kamyon, uçak vb. araç çarpması, denizde bulunan petrol platformlarının veya köprülerin betonarme ayaklarına geminin çarpması gibi insan kaynaklı çarpmalar; kalorifer kazanı, doğal gaz patlaması, askeri tesislerde cephanelik vb. yerlerde patlayıcı maddelerin patlaması, nükleer santrallerde meydana gelen kazalar veya bu santrallere yapılan saldırıların oluşturduğu çarpma veya terör saldırılarındaki patlamalar çarpma etkisi hasarına neden olmaktadır. Bu afetlerin, çarpmaların veya patlamaların can ve mal kaybına neden olmasını engellemek veya en aza indirmek için çarpma etkisi davranışının bilinmesi ve yapı tasarımı sırasında yapılan tasarımın çeşidine göre dinamik yük çeşitlerinin de dikkate alınması çok büyük önem taşımaktadır.

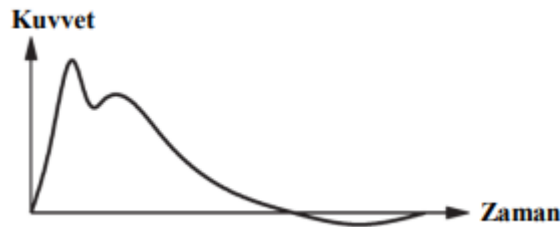
Son yıllarda, tüm dünyada terör saldırıları sebebiyle verilen büyük kayıplar, binaların terör eylemlerine savunmasız olduğunu göstermiştir. Herhangi bir yapının içinde veya bir şehir merkezinde meydana gelen bir patlama büyük miktarda can ve mal kaybıyla sonuçlanabilmekte; yapıların çökmesine veya çok miktarda yapıda hasara neden olabilmektedir. Bu nedenle beton yapı elemanlarının çarpma yükü karşısındaki dayanımını artırmak, olası patlama ile karşılaşma durumlarında hasar görülme ihtimalini azaltmaya yardımcı olabilecektir [3, 4].

Çarpma yüklerine karşı yapıların tasarım gerekliliği için birçok araştırmacı kirişlerin dinamik davranışını araştırmıştır. Makine mühendisliği alanındaki araştırmacılar daha çok çelik ve kompozit kirişlerle araştırma yapmışlardır. Ancak çelik ve kompozit kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarının incelenmesinde kullanılan yöntemleri doğrudan betonarme kirişlere uygulamak malzeme ve tepki farklılığı nedeniyle uygun değildir. Betonarme kirişlerin çarpma yükü etkisi altındaki davranışını incelemek için analitik, deneysel ve sayısal yöntemler vardır. Deneysel araştırmalar için, ağırlık düşürme testi, betonarme kirişlerin çarpma tepkisini incelemek için en çok tercih edilen teknik haline gelmiştir [5].

Çarpma hareketi sırasında belli bir hıza sahip çarpma yükü kütlesi, hareketsiz bir yapı elemanına çarptığında, çarpma yükü kütlesi ile çarpmaya maruz kalan yapı elemanı yüzeyleri kısa süreliğine birleşmekte ve bu esnada bir kuvvet ortaya çıkmaktadır. Çarpma yükü kütlesinin sahip olduğu kinetik enerjisini çarpma sırasında yapı elemanına aktarılmaktadır.

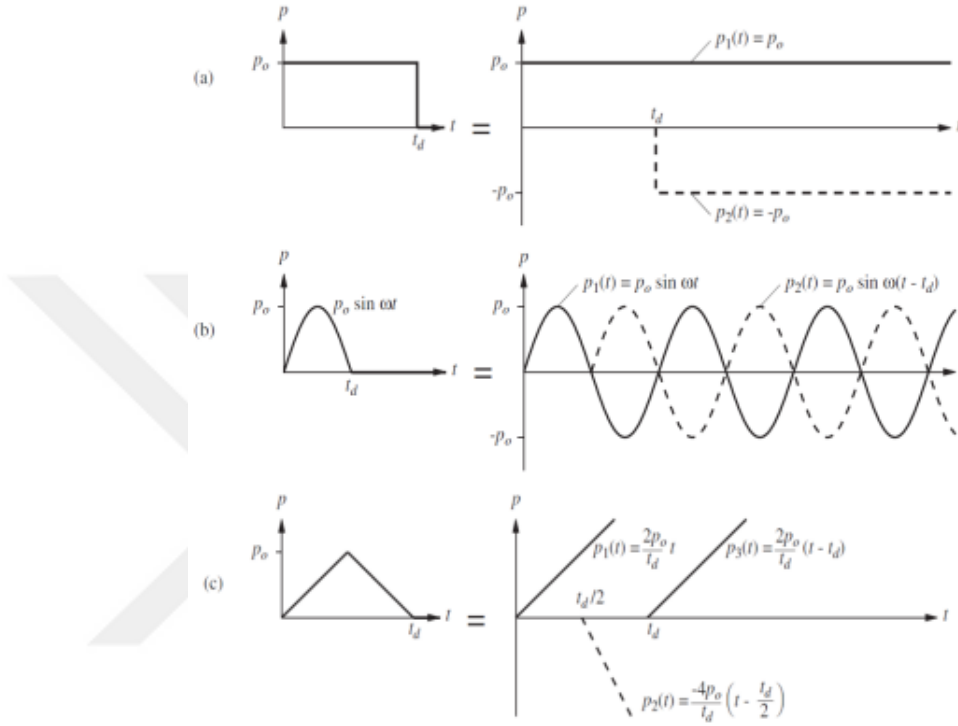
Çarpma yükü altında bir betonarme yapı elemanının davranışı: çarpmadan hemen sonra çarpma yükü noktasında meydana gelen kısa süreli stres dalgası olan “yerel tepki” ve çarpmadan sonra uzun bir süre boyunca tüm yapıda meydana gelen elastik-plastik deformasyona nedeniyle serbest titreşim etkisi olan “genel tepki” olmak üzere iki aşamadan oluşabilir. Genel tepki büyük ölçüde betonarme yapı elemanının yükleme oranı etkisi ile yarı-statik davranışına bağlıdır [6].

Patlama veya bir kütle çarpması ile yapı veya yapı elemanlarında meydana gelecek kuvvetin zamana bağlı değişimi şekil 1.1’de gösterilmiştir [7].

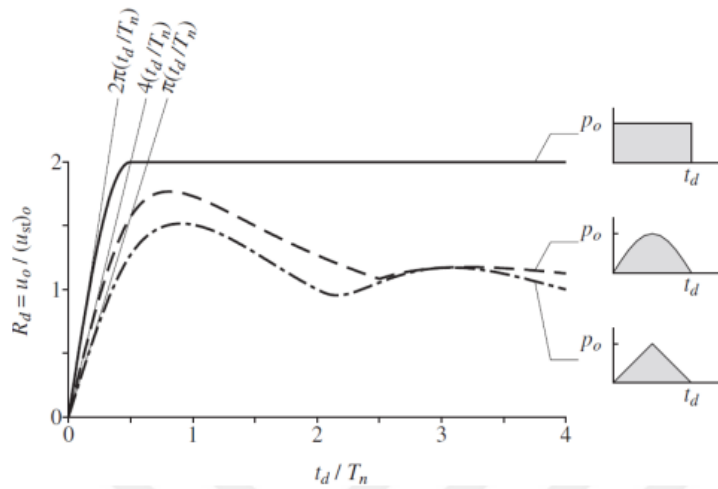


Şekil 1.1. Tek çarpma tipi kuvvet zaman grafiği [7]

Yapı veya yapısal elemanların çarpma etkisine vereceği tepki klasik yöntemle türev denkleminin çözümü, duhamel integrali ile çözümü ve çarpmanın basit fonksiyonları süperpoze edilerek ifade edilmesi şeklinde farklı yaklaşımlar vardır [7]. Çarpma türü kuvvetin basit fonksiyonlarla ifade edilmesi şekil 1.2’de; fonksiyonlara bağlı oluşan spektrumlar şekil 1.3’te gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Çarpma türü kuvvetin basit fonksiyonlarla ifade edilmesi: a. dikdörtgen çarpma, b. yarım-sinüs çarpma, c. üçgen çarpma [7]



Şekil 1.3. Eşit genlikli üç çarpma kuvvetinin spektrumları [7]

Derleme çalışmasında beton kirişlerin çarpma yükü etkisi altındaki davranışlarını incelenen deneysel, analitik ve numerik araştırmaları analiz edilmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Deneysel araştırmalar, bir çarpma düzeneğine entegre edilmiş bir yük hücresi ile çarpma kuvveti ölçülmesi gerektiği; statik yük altındaki yük hücresi için ortak kalibrasyon faktörü kullanılabileceği; betonarme kirişlerde doğru ölçümler elde edebilmek için 50 kHz örnekleme hızının uygun olduğunu; betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki reaksiyon kuvvetlerinin, iki yük hücresi kullanılarak ölçülmesi gerektiği sonucuna varılmış ve çarpma başlığı olarak yarım küre şeklindeki hemisferik veya kavisli (curved) başlığın kullanılması önerilmiştir [5].

Ağırlık düşürme testlerinde, betonarme kirişlerin çarpma yükü altındaki davranışını önemli ölçüde etkileyebilecek birçok farklı parametre ve faktör olmasına rağmen açıkça tartışılmamıştır [5]. Düşme ağırlığı geometrisi ve ara katmanın betonarme kirişlerin darbe davranışı üzerindeki etkisinin açık sonlu elemanlar kodu LS-DYNA kullanarak sayısal olarak incelendiği çalışmada, düşme ağırlığı etkisine maruz kalan betonarme kirişlerin sayısal modelleri, mevcut test verileriyle doğrulanmıştır. Kalibre edilen model ile yaygın olarak kullanılan beş düşme ağırlığının etkilediği betonarme kirişlerin tepkileri analiz edilerek düşme ağırlığı ile betonarme kiriş arasına yerleştirilen çelik levha veya lastik ped ara katmanının etkisi de araştırılmıştır. Her ikisinin de betonarme kirişlerin çarpma yükleme profilini ve göçme modunu önemli ölçüde etkilediğini bulunmuştur [8].

Güçlendirme, hasar gören veya görmeyen bir yapının mevcut performansını arttırma amacıyla yapılan teknik uygulama şeklidir ve yapı kalitesindeki eksiklikler veya yapıda meydana gelen hasarlara yönelik uygulanır. Hasar, kaza gibi hiçbir dış etkiye uğramamış olsa bile eski yönetmeliğe göre uygulanan projedeki hesaplama ve düzenlemelerin yetersiz veya eksik olması durumunda yeni yönetmelikteki hesaplama ve düzenlemelere uygun olacak şekilde güçlendirme yapılabilir. Günümüzde kullanımı hızla artan betonarme yapılarda, düşük kaliteli beton kullanımı, donatı eksikliği, etriye aralıklarının projedeki gibi yapılmaması, yapım sürecindeki eksiklikler, deprem sonrasında oluşan ek yükler veya yapının kullanım amacının değişmesi nedeniyle güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkabilir.

Güçlendirme işlemleri, yapıya yeni elemanlar eklenerek veya mevcut elemanlara takviye yapılarak gerçekleştirilebilir. Güçlendirme, bir yapının kullanım fonksiyonunu bozmadan, servis süresince konforunu minimum etkileyerek, hacmini aşırı değiştirmeden, mimarisini bozmadan, güçlendirme maliyetini minimum seviyede tutarak; yapı elemanlarının yatay ve düşey yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini artırmayı, mevcut ve üzerinde çalışılan yönetmeliklere uygun hale getirmeyi amaçlar. Onarım ise, deprem, çarpma vb. nedenlerle hasar gören, taşıma gücü azalan yapı elemanlarının, önceden sahip oldukları dayanıklılığa geri getirilmesini sağlayan uygulamadır ve hasarlı yapı elemanları tamir edilerek ya da değiştirilerek yapıya yeniden entegre edilir.

İnşaat ve yapı mühendisliğinde, sürdürülebilir malzemeler kullanarak sağlam stabilite ve dayanıklılığa sahip yapılar inşa etmenin zorluğu ve mevcut teknolojik araçlar ve malzemelerin ağırlığı azaltamaması, açıklıkları genişletilememesi veya ince yapılar inşa edilememesi kompozit malzemelerin keşfine ilham olmuştur [9].

Güçlendirme yöntemine karar verirken, güçlendirme malzemesinin teknik gereksinimleri, uygulama kolaylığı ve süresi, yapı kullanımını kısıtlayıp kısıtlamaması ve ekonomik faktörleri göz önünde bulundurulur. Betonarme elemanları güçlendirmek için çeşitli güçlendirme yöntemleri araştırılmakta ve bazıları başarıyla uygulanmaktadır. Her malzemenin kendi içinde avantaj ve dezavantajları vardır.

1.1. Lif Takviyeli Polimer (FRP)

FRP (Fiber Reinforced Polymer), liflerle güçlendirilmiş polimer kompozit malzemelerdir ve genellikle karbon, cam veya aramid gibi liflerin polimer matrisle entegre edilmesiyle oluşturulur. Malzemeye rijitliği lifler sağlarken, dayanıklılık ve esnekliğin artırılmasını polimer matris sağlar.

Havacılık, otomotiv, kimya, denizcilik vb. sektörlerde yaygın olarak kullanılan fiber kompozit malzemeler, inşaat mühendisliğinde onarım ve güçlendirme amacıyla kullanılmaktadır. FRP üretildikleri malzemeye bağlı olarak farklı dayanım ve şekil değiştirme özelliklerine sahip kompozit bir malzemedir.

Son yıllarda en çok araştırması yapılan ve kullanımı yaygın olan FRP kompozitler: karbon lif takviyeli polimer (CFRP), cam lif takviyeli polimer (GFRP) ve aramid lif takviyeli polimer (AFRP) kompozitlerdir.

Araç, gemi ve uçak çarpması, kaya düşmesi veya moloz çarpması, ağır makine veya nesnenin yapısal eleman üzerine düşmesi sonucu çarpma ve patlama veya füze çarpması gibi terörist saldırıları nedeniyle çarpma yüklerine maruz kalan betonarme yapılarda meydana gelen ciddi hasarlara yönelik yapının değiştirilmesi yüksek maliyete neden olduğu için mümkün değildir, bu nedenle güçlendirme teknikleriyle elemanların onarılması veya güçlendirilmesi arzu edilir. Statik yük altında hasar görmüş yapı elemanlarının güçlendirilmesi için oldukça tercih edilen ve hızla kullanımı yayılan lif takviyeli polimer malzemeler, yüksek mukavemet ve yüksek yorulmaya karşı yüksek dayanıklılık; korozyona karşı daha dirençli, daha hafif ve daha yüksek sertlik; dayanıklı ve kolay uygulanabilme gibi avantajları nedeniyle popülerlik kazanmaktadır [10].

Kapsamlı literatür incelemesinde, küresel olarak yürütülen çalışmalar, simülasyon çalışmaları ve FRP takviyesinin pratik uygulamaları gözden geçirilmiş ve araştırmaların çoğunun, malzemelerinin özelliklerinden ve bunların genellikle karbon, cam, bazalt veya aramid olan liflerle güçlendirilmiş bir polimer matrisinden oluşan FRP kompozit matrisinin mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkisinden ziyade FRP'nin kompozit özelliklerinin değerlendirilmesi ile sınırlı olduğu belirtilmiştir [9].

Herhangi bir beton yapı elemanını güçlendirmek için FRP malzemelerinin seçiminde, özelliklerini ve uzun vadeli hizmet açısından etkilerini ve ekosistemle olan tepkisinin dikkate alınması gerektiğini de ifade etmiştir [9].

FRP'lerin tercih sebeplerinin başında; yüksek dayanım, korozyona karşı dayanıklılık, kimyasal etkilere dayanıklılık, makas, bıçak gibi aletlerle istenilen uzunlukta kesilerek, yapıştırma işlemi ile elle veya basit aletlerle kolay uygulanabilirlik, geometrik boyutları değiştirmeden estetik görüntüyü bozmamaları, hafiflik ve düşük bakım maliyeti gelir.

Güçlendirme uygulaması esnasında mevcut kullanımı engellemeden uygulanabilir olması nedeniyle FRP kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. FRP'lerin en büyük dezavantajı yüksek maliyettir. Aynı zamanda ultraviyole ışınlarından ve radyasyondan etkilenirler, düşük enine dayanıma ve son derece düşük yüksek ısı dayanımına sahiptirler.

1.2. CFRP

Karbon fiber doğada 1300 °C'de üretilen anizotropik bir malzemedir. CFRP'nin başlıca avantajları düşük yoğunluk, düşük iletkenlik, kimyasal etkilere karşı dayanıklılık ve su emmemesi, yüksek yorulma dayanımı, yüksek elastik modül, iyi kırılma direncidir. Karbon fiberin düşük basınç dayanımı ve anizotropik olması zayıf özellikleridir. Karbon fiberin üretilmesi için göreceli olarak yüksek enerji gereksinimi, maliyetlerin yükselmesine neden olduğu için başka bir zayıf özelliğidir [11, 12].

Pham ve Hao statik disiplinde güçlendirme yöntemiyle ilgili analitik çalışmalar ve deneysel doğrulamaların oldukça açık olduğunu, ancak yüksek yükleme oranlarına sahip dinamik yük altında FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışının anlaşılmasının hala çok sınırlı olduğunu belirtmişlerdir [13].

Güçlendirme malzeme özellikleri ve çarpma yükü altında betonarme kirişler için darbe testi yöntemlerine ilişkin literatürün gözden geçirildiği derleme çalışmasında; kısa süreli yüksek yoğunluklu bir yük olarak bilinen çarpma yüklemesinin düşük veya yüksek hızlı çarpma olarak sınıflandırıldığını, en sık kullanılan yöntemin ağırlık düşürme çekiç testi olduğunu, darbe yükü altındaki betonarme kirişleri simüle etmek için sonlu elemanlar analizi kullanıldığını ve güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik yük altındaki performansı hakkında zaten çok sayıda araştırma yapılmış olduğunu, ancak FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma yükü altındaki davranışı hakkında çok sınırlı araştırma olduğu belirtilmiştir [10].

Bu yüksek lisans tezinin amacı, farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını iki farklı yükseklikten ağırlık düşürme testi ile deneysel olarak incelemektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

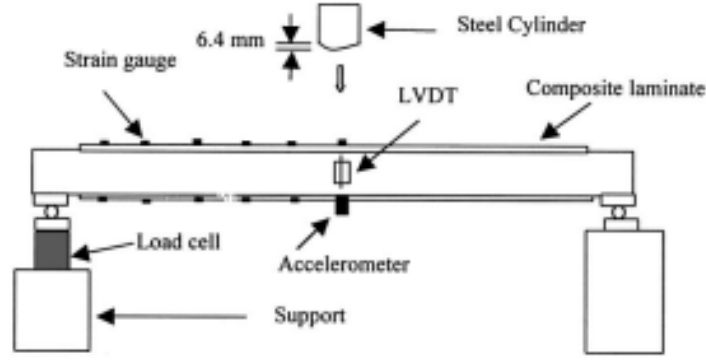
Daha önce yapılan çalışmalarda, FRP ile güçlendirilmiş beton, betonarme, lif katkılı beton ve lif katkılı betonarme yapı elemanlarının çarpma etkileri altındaki davranışları belirli yükseklikten serbest bırakılan ağırlık düşürücü test düzenekleri kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmalarda betonarme yapı elemanlarının statik ve/veya dinamik etki altındaki davranışları boyut tasarımları, güçlendirme çeşitleri, sarım şekilleri, düşme yükseklikleri ve düşen ağırlık miktarları değiştirilerek deneyler yapılarak çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarının yanı sıra bazı araştırmalarda deneylerden elde edilen veriler bilgisayar simülasyonları ile karşılaştırılarak uygun sonlu eleman modelleri geliştirmeye yönelik çalışmalar da yapılmıştır.

Bu bölümde literatürde yer alan FRP / CFRP ile güçlendirilmiş betonarme yapı elemanlarının çarpma davranışını inceleyen çalışmaların kısa özetleri yer almaktadır.

Erki ve ark. çalışmalarında CFRP ve çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi karşısındaki davranışlarını araştırmıştır. Deneysel çalışmada kullanılmak üzere 8.000x400x300 mm kesitlerinde dört adet betonarme kiriş üretilmiş olup, çarpma etkisine maruz kalmadan önce iki kiriş CFRP tabakalarıyla, iki kiriş ise çelik levhalarla güçlendirilmiştir. Kirişin çekme bölgesinde 4Ø8, basınç bölgesinde 3Ø10 ve etriye olarak Ø8 donatı düzenlemesi yapılarak enine ve boyuna donatı oranları sabit tutulmuş ve betonarme kirişlerin sadece eğilme dayanımı değiştirilerek güçlendirme çeşitlerinin dinamik davranışa olan etkisi gösterilmek istenmiştir. Çarpma yükü basit bir şekilde desteklenen kirişin bir ucundan belli bir yüksekliğe kadar kaldırıldıktan sonra, belirlenmiş o yükseklikten bir desteğin üzerine serbest düşmeye bırakılmasıyla oluşturulmuştur. Çarpma etkisi kuvveti, belirli yükseklikten bırakılan kirişin bırakılan ucunun şok emici sönümleyici düzenek bulunan mesnete temas ettiğinde oluşmuştur. CFRP tabaka ile güçlendirilen donatılı kirişlerden bir tanesi 0,5 m, 1 m ve 1,5 m olmak üzere üç farklı yükseklikten bırakılırken diğer kiriş ise sadece 2 m yükseklikten bırakılmıştır. Çelik levhalarla güçlendirilen donatılı kirişlerden biri 1,7 m ve 2 m olmak üzere iki farklı yükseklikten bırakılırken diğeri ise sadece 2,2 m yükseklikten bırakılmıştır [14].

Gerinim yükleme oranı, ortalama 0,7 s21 ile maksimum 0,84 s21 arasında değişmektedir. Her iki güçlendirme yöntemi arasında dinamik davranış ve dayanım farklılıkları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, CFRP'nin çelik plakalar ile aynı enerji absorpsiyon yeteneklerini sağlayamadığını, onların enerji absorpsiyon kapasitesine kadar ulaşamamış olmasına rağmen CFRP tabakalarla güçlendirilen betonarme kirişlerde sağlanan eğilme güçlendirmesi sebebiyle kirişlerin çarpma etkisi kuvveti altında iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Test kirişlerinin kırılma mekanizmasını araştırdılar ve CFRP tabakalara ilave ankraj yapılarak çarpma direncini artıracağına, çarpma davranışını iyileştirilebileceğine dikkat çekmişlerdir. Deneysel çalışmada CFRP tabakalarındaki hasarın, beton yüzeyle temas noktalarındaki bağlantıların ayrılması ya da çekme gerilmeleri etkisi ile meydana geldiği görülmüştür. Bu tabakaların herhangi birinde kopma meydana geldiğinde, aşırı yüklemeye maruz kalan diğer tabaka kiriş kesitinde genişleyerek büyüyen eğilme çatlakları ile kesiştiği yerde çekme gerilmesi etkisine bağlı olarak hasara uğrayıp göçtüğü gözlenmiştir [14].

Tang ve ark. 2003 yılında yürüttükleri deneysel çalışmada FRP levhalarla güçlendirilmiş 1.980x203x95 mm'lik kesite sahip beş adet basit mesnetli betonarme kirişin çarpma yüklemesi altındaki davranışlarını çoklu ağırlık düşürme testleri ile incelemiştir ve kullanılan deney düzeneği şekil 2.1'de verilmiştir. Numunelerde iki adet 9,53 mm çapında çekme donatısı kullanılırken, sargı donatısı kullanılmamıştır. Güçlendirmede karbon ve kevlar olmak üzere iki tip kompozit tabaka kullanılmış olup, iki kiriş CFRP levhalarla, iki kiriş ise Kevlar Fiber Reinforced Polymer (KFRP) levhalarla kirişlerin alt ve üst yüzüne epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilmiş, bir adet kiriş ise referans kiriş olarak karşılaştırma amacıyla güçlendirme uygulanmamıştır. Yazarlar, çarpma yüklemesinin titreşime neden olması nedeniyle kirişlerin üst ve alt yüzlerinin döngüsel çekme ve basınç gerilmeleri yaşayacağını savundukları için FRP'leri (karbon veya Kevlar) kirişlerin iki tarafına yapıştırmıştır. FRP'nin gerilimini izlemek için üst ve alt yüzlere altı gerinim ölçer bağladılar. Çarpma yükü, 127 mm çapında 222 N ağırlığında olan çelik bir silindirin belirli yüksekliklerden kiriş üst yüzeyine düşürülerek uygulanmış olup, çoklu ağırlık düşürme testlerinin sayısının 30'a kadar çıktığı belirtilmiştir. Çalışmada ivme, mesnet reaksiyon kuvveti, kompozit levhaların boyuna birim şekil değiştirmesi, deplasman değerleri ölçülmüştür [15].



Şekil 2.1. Tang ve ark. deney düzeneği [15]

Betonun basınç dayanımı 27,6 MPa, elastisite modülü ise 24,9 GPa iken çeliğin akma dayanımı 275,8 MPa, elastisite modülü de 200GPa olarak gözlenmiştir. Karbonun çekme dayanımı 1.035 MPa iken kevların çekme dayanımı 460 MPa; karbonun elastisite modülü 85,7 GPa, kevlarınki 37,6 GPa olarak gözlenmiştir [15].

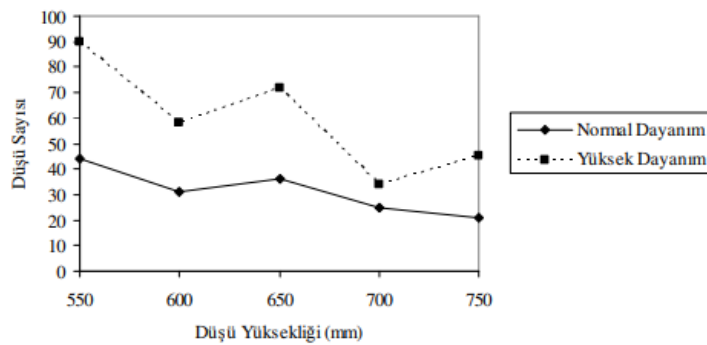
DeneySEL sonuçlar, çekme geriniminin aynı bölümdeki sıkıştırma gerinmesinden daha büyük olduğunu göstermiştir. Testten sonra, eğilme çatlakları ilk önce betonun alt yüzeyinde meydana gelmiş ve nötr düzlem seviyesine kadar yukarı doğru yayılmıştır. Çarpma yükü arttığı için diyagonal kesme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlaklar hızlı bir şekilde üstte veya altta beton ve levha ara yüzüne doğru genişlemiş ve daha sonra ara yüzey boyunca ilerlemiştir. Bu kırışlar sonunda kesmede başarısız oldu. Kiriş mesnet reaksiyon kuvvetinin, aynı çarpma enerjisi için kompozit levhanın ağırlık ve kalınlığına bağılı olarak değiştiği gözlenmiştir. Kevlar laminanta göre daha rijit olan karbon laminantın kirişin deformasyonunu azaltmada daha iyi olduğu görülmüş ve rijitlik arttıkça kirişin artık deformasyonu arttığı sonucuna varılmıştır. Test sonuçları, kompozit levhaların beton kırışların çarpma yükleme dayanma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını ve maksimum deformasyonun azalmasında etkili olduğunu ortaya çıkardığı gibi, ayrıca levhalar sapmayı ve çatlak genişliğini azaltmıştır. Kompozit levhalar çatlak genişlemesini önleyerek kirişin kesme dayanımını da artırmıştır. Kevlar ve karbon levhalarla güçlendirilmiş kırışların test sonuçları karşılaştırıldığında, mukavemet kazanımının kompozit levhaların cinsine, kalınlığına, ağırlığına ve malzeme özelliklerine bağılı olduğu görülmüştür [15].

Tang ve ark. 2005 yılındaki çalışmasında, FRP ile güçlendirilmiş 203x95 mm'lik kesite sahip 27 adet betonarme kirişi çarpma yükleri altında incelemiştir. Önceki çalışmalarına benzer şekilde, kirişlerin alt ve üst yüzlerinin iki tarafına epoksi ile FRP (Karbon veya Kevlar) yapıştırılmıştır. Uzunlamasına gerilimi izlemek için kompozit laminatlara gerinim ölçerler bağlanmış, ancak laminat uçlarındaki FRP gerilimi küçük olduğu için rapor edilmemiştir. Deneysel sonuçlar, daha sert FRP kullanımının, çarpma yükü altındaki betonarme kirişlerin kapasitelerini artırabileceğini göstermiştir. Test sonuçlarında ikisi betonda, diğer ikisi kirişlerin altındaki FRP'de olmak üzere toplamda dört tip çatlak gözlemlenmiş, ancak FRP ile beton arasındaki arayüzde hiçbir çatlak gözlenmemiştir. Eğilme çatlakları önce betonun alt yüzeyinde meydana gelmiş ve daha sonra yukarı doğru nötr düzlem seviyesine doğru ilerlemiştir. Çarpma sayısı veya düşme yüksekliği arttığında, bu çatlakların FRP ile beton arasındaki arayüze doğru genişlediği gözlenmiştir. Yüzeyleri FRP ile birleştirilmeden önce kumlama yöntemiyle pürüzlendirilen bu kirişlerin kesmede başarısız olduğu, ancak bu testlerde FRP soyulması gözlenmediği görüldü. Buna göre, bu çalışma, kum püskürtme kullanımının FRP ve beton arasındaki arayüzde bağlanma mukavemetini iyileştirebileceğini, kesme kırılmasının ise çarpma testlerinde kritik bir göçme modu olabileceğini göstermiştir [16].

Tang ve ark. yaptıkları her iki çalışmada [15,16] pozitif ve negatif momentleri taşımak için kirişlerin üst ve alt yüzeylerine CFRP ve/veya Kevlar FRP levhaların yapıştırılmasıyla güçlendirilen kesme donatısız betonarme kirişler üzerinde ağırlık düşürme çarpma testleri gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, kirişlerin çarpma direncinin, FRP levhalarla güçlendirme yoluyla önemli ölçüde iyileştirildiğini ve güçlendirilmiş betonarme kirişlerin maksimum sehimlerinin, güçlendirilmemiş kirişlere göre %30 -40 daha az olduğunu göstermiştir.

Tang ve ark. FRP'yi kirişlerin her iki tarafına yapıştırmayı önermiş; ancak geri tepme tepkisi ve titreşimin, yapıların davranışı üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması için araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir [15]. 2003 yılındaki çalışmasında FRP delaminasyonu rapor edilmişken [15], 2005 yılındaki çalışmalarında benzer testlerde delaminasyon gözlenmemiştir [16].

Kantar tez çalışmasında [17] CFRP şeritlerle güçlendirilmiş beton kirişlerin ağırlık düşürme testleri ile düşük hızda çarpma davranışını araştırmıştır. Deneysel çalışmada, beton basınç dayanımları 25– 44 MPa arasında değişen, 710x150x150 mm boyutlarında, beş tanesi yüksek dayanımlı beş tanesi normal dayanımlı betondan üretilen 10 adet beton kiriş kullanılmıştır. Güçlendirme malzemesi olarak kullanılan CFRP 150 mm genişliğinde 500 mm uzunluğunda şeritler halinde hazırlanarak tüm kirişlerin alt yüzeyine yapıştırılmıştır. Çarpma testi 5,250 kilogramlık çelik çekicinin kiriş orta noktasına düşürülmesiyle gerçekleştirilmiş olup, çekicinin düşme yükseklikleri 550, 600, 650, 700 ve 750 mm olarak belirlenmiştir. Böylece araştırmada temel değişken olarak ağırlık düşürme yüksekliği ve beton basınç dayanımı kullanılmıştır. Kiriş üst yüzeyinin orta noktasının 150 mm sağına ve soluna ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Deney sırasında, betonun basınç mukavemeti ile çekiç düşme yüksekliği arasındaki ilişkiyi incelemek için CFRP şerit genişliği ve uzunluğunu sabit tutarak deney elemanlarından, aldığı ivme değerleri sayesinde bu elemanların hız, deplasman, enerji kapasitelerini bulunmuş ve kirişleri göçmeye götüren düşü sayısı, hız, ivme ve deplasman değerlerinin zamana göre değişimi, kirişte oluşan sıçrama adedi ve zaman aralığı, çatlak gelişimi ve çatlak şeklini incelenmiştir. Daha sonra ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan çarpma testlerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda test elemanlarının çökmesine yol açan düşme sayısının beton dayanımına ve düşme yüksekliğine bağlı olarak doğrusal olarak değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 2.2). Numune içindeki çarpma kaynaklı sıçramaların sayısının, düşme yüksekliğine ve zaman aralığı örtüşmesine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Numunenin hasarı arttıkça iç çatlakların arttığı ve çatlak sayısının azaldığı sonucuna varılmıştır [17].



Şekil 2.2. Beton dayanımına göre düşü sayısı- düşü yüksekliği grafiği [17]

CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde düşü sayısı arttıkça oluşan çatlakların kirişin üst yüzeyinden CFRP'nin bağlandığı alt yüzeye doğru yayıldığı görülmüştür. Donatısız kısımda çatlakların aşağıdan yukarıya doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. CFRP ile güçlendirilen kirişlerde ilk çatlağı oluşturan düşü sayısında ve çökmenin meydana geldiği düşü sayısında önemli bir artış gözlenirken, CFRP ile güçlendirme yapılmayan kirişlerde aniden çökme gerçekleşmiş ve çatlak oluşan yüzeyler tamamen birbirinden ayrıldığı görülmüştür. CFRP ile güçlendirme uygulanan kirişler çöktüğünde kiriş ikiye bölünmüş ancak CFRP şeritler beton yüzeyine tutunarak ayakta kalmasını sağlamıştır. Normal dayanımlı kirişlerde, agreganın matristen ayrılmasıyla kırılırken, yüksek dayanımlı kirişlerde, agreganın matristen ayrılmadan kırılmıştır [17].

ABAQUS sonlu eleman yazılımı kullanılarak yapılan çarpma analizinden oluşturulan ivme-zaman ve hız-zaman grafikleri, genel davranış ve maksimum uyumluluk açısından deneylerden elde edilen grafiklerle çok benzer sonuçlar vermiştir. Deney ve analizlerdeki deplasman-hız grafikleri şekil olarak benzer davranış gösterse de analiz sonucunda elde edilen deplasman değerlerinin deneyden elde edilenlerden önemli ölçüde düşük olduğu gözlenmiştir. ABAQUS analizi ile elde edilen gerilme dağılım konturları, elemanlarda meydana gelen hasar ve kırılma yüzeylerine benzer olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma sonuçlarına göre CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin davranışının ve göçme modlarının değiştiği ve bununla birlikte deneydeki tekrarlı düşü sayısı ve beton dayanımındaki değişimin de davranışı doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenle, yüksek dayanımlı betondan üretilen kirişlerin, normal dayanımlı betondan üretilen kirişlere kıyasla daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermiş olup yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı betondan üretilen kirişlerde göçme için düşü sayısının artırılması gerektiğini belirtmişlerdir [17].

Bhatti ve ark. alt kısmı FRP panellerle güçlendirilmiş betonarme döşemelerin çarpma direncini araştırmak için 1.650x1.650x150 mm ölçülerinde 12 adet betonarme döşeme kullanarak ağırlık düşürme deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmada güçlendirme malzemesi olarak tek yönlü dokunmuş AFRP, çift yönlü dokunmuş AFRP ve CFRP kullanılmış [18].

Güçlendirme iki tabaka halinde yapılırken tabakaların uygulanma yönleri: ilk tabaka ana donatı yönünde, ikinci tabaka ise dağıtma donatısı yönünde olmuştur. Kullanılan döşemelerin karşılıklı iki kenarı plak kenarından 125 mm içeriye doğru yerleştirilmiş basit bir mesnet ile desteklenirken diğer iki kenarı serbest bırakılmıştır. Mesnetle desteklenen iki kenara dik olacak şekilde ana donatılar yerleştirilirken, paralel bir şekilde de dağıtma donatıları yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, arka yüzeye FRP levha yapıştırıldığında betonarme döşemelerin çarpma dayanımı davranışını araştırmak amacıyla, FRP levhanın yükleme tipi, güçlendirme yöntemi, malzeme özellikleri ile FRP levha katmanlarının sayısı değişken olarak dikkate alınarak düşme ağırlıklı çarpma testleri yapılmıştır. Ağırlık düşürme deneyi 60 mm çapında serbest düşen 300 kg kütleli çelik bir ağırlık, döşemenin tam merkezine düşürülerek gerçekleştirildi. Tek yükleme ve yinelemeli yükleme olmak üzere iki yükleme türü uygulanmıştır. Yinelemeli yükleme testi, 1 m/s'lik başlangıç hızıyla 4 m/s'ye hıza kadar 1 m/s'lik artışlar yapılarak, 4 m/s'den sonra döşeme çökene kadar hız 0,5 m/s'lik artışlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde, kümülatif artık yer değiştirmenin net açıklık uzunluğunun 1/50'si olan 28 mm'ye ulaşması durumunda betonarme döşemelerin çöktüğü varsayılmıştır. Yinelemeli yükleme testinde her bir betonarme döşeme için önceki çarpma hızlarının nihai çarpma hızıyla aynı olduğu ve ikincisinin son hızdan 1 m/s daha büyük bir çarpma hızı ile aynı olduğu plakalar için sırasıyla 4, 5 m/s ve 5, 6 m/s çarpma hızları ile tek yükleme testleri yapılmıştır [18].

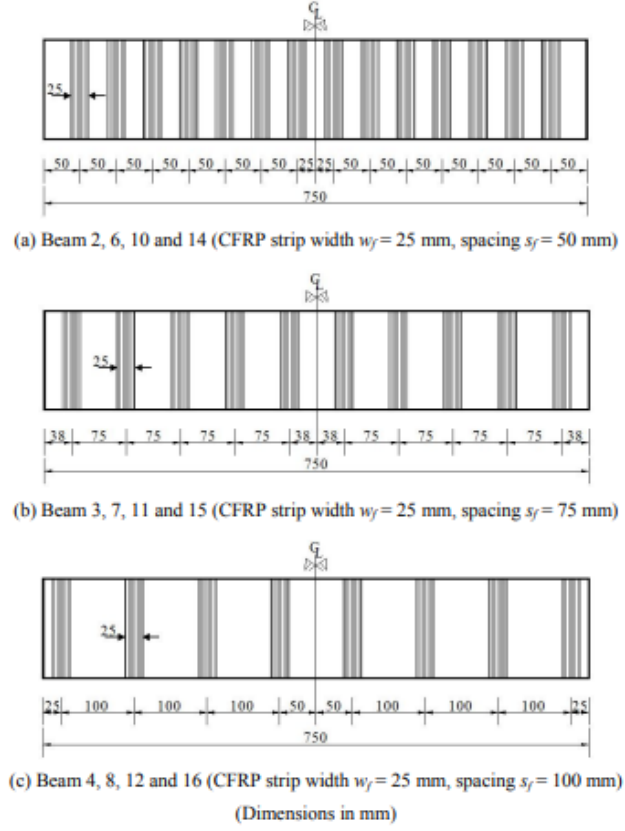
Deney sonuçlarına göre, bu çalışmada ele alınan tüm betonarme döşemeler için elastik sınırın, 3 m/s'lik bir çarpma hızı olduğu ve betonarme döşemelerin çarpma dayanımı, güçlendirilmiş bir FRP levhanın arka yüzeye yapıştırılmasıyla yükseltilebileceği, aynı zamanda bir betonarme döşemenin çarpma tepki davranışı, yükleme geçmişinden güçlü bir şekilde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Deneyde gözlemlenen çatlak deseni, levhaların çift yönlü akmasının gelişimini açıkça göstermekte olup, bu çift yönlü bir FRP sisteminde FRP sisteminin avantajını açıklayabileceği düşünülmüştür. Betonarme döşemelerin yük taşıma mekanizması, FRP levhanın yükleme tipine ve güçlendirme hacmine bağlı ve tüm plakalar için dinamik amplifikasyon faktörleri, yükleme tipine, güçlendirme yöntemine, malzeme özelliklerine ve FRP levhanın hacmine bakılmaksızın yaklaşık iki olarak hesaplanmıştır [18].

Kantar ve ark. farklı beton basınç dayanımına sahip beton kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını inceledikleri deneysel çalışmaları için beş adet normal dayanımlı ve beş adet yüksek dayanımlı beton kiriş elemanı üretmişlerdir. Deney elemanlarındaki çarpma yükünü, düşey vurucu olarak kullandıkları 5,25 kg ağırlığındaki sabit çekiç kütlesi kullanarak oluşturmuşlardır. İvme değişim değerlerini ölçebilmek için simetrik olarak 2 adet ivmeölçer her bir deney elemanına yerleştirilmiştir. Serbest ağırlık düşürme deney düzeneğine, düşme hızını belirleyebilmek için hız ölçüm aleti eklenmiş, ağırlık kılavuz bölümü kalibre edilmiştir ve serbest ağırlık düşürme testi ile yaptıkları deneysel çalışmadaki düşme yüksekliklerini 300 mm ile 500 mm arasında uygulamışlardır. Her bir deney elemanı için her bir yükseklik değerinde çarpma kuvveti, göçme durumu gerçekleşene kadar uygulanmış ve simetrik yerleştirilen 2 adet ivmeölçerden ivme değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçlarını, ivme değerleri, ağırlık düşürme sayısı, yutulan enerji ve kırılma şekilleri açısından değerlendirmişlerdir [19].

Beton basınç dayanımı yüksek olan deney elemanlarında göçmeye neden olan düşme sayısının daha yüksek olduğunu ancak, düşme yüksekliğinin artması ile bu düşme sayısı farkının azaldığını saptamışlardır. Her iki gruptaki deney elemanlarının hasar biçimleri ve göçme şekillerinin birbirinden farklı olduğunu; kırılma yüzeyleri açısından karşılaştırıldığında normal dayanımlı deney elemanlarında agrega yüzeylerinin matris yüzeylerinden ayrılarak kırılma gerçekleştiğini, yüksek dayanımlı deney elemanlarında ise hem agrega hem de matrisin kendisinde kırılma meydana geldiğini ve kiriş eksenine dik çarpmanın uygulandığı bölgede kırılma düzlemi olduğu görülmüştür. Her iki beton basınç dayanımında yer alan deney elemanlarında ölçülen maksimum ivme azalma oranının minimum ivme azalma oranından daha yüksek olduğunu; normal dayanımlı deney elemanlardaki deplasman değerlerinin yüksek dayanımlı deney elemanlarından ortalama %19 daha büyük olduğunu ve normal dayanımlı deney elemanlarında maksimum ivmenin gözlemlendiği düşme için hesaplanan enerji değerlerinin yüksek dayanımlı deney elemanları için hesaplanan enerji değerinden ortalama %17 daha büyük olduğunu saptamışlardır [19].

Kantar ve ark. yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan CFRP kompoziti kullandıkları çalışmalarında CFRP şeritle güçlendirilmiş beton kirişin düşük hızlı çarpma davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla on adet güçlendirilmiş beton kiriş üretmiş ve kendi tasarladıkları çarpma yükleme sistemi kullanarak düşük hızlı çarpma etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Değişken olarak iki farklı beton basınç dayanımı ve beş farklı düşme yüksekliği kullanmışlardır. Beton basınç dayanımına göre iki gruba ayırdıkları deney elemanlarını 5 farklı yükseklikten aynı çekiç kütlesini serbest düşmeye bırakarak test etmişlerdir. Çarpma kuvvetine bağlı oluşan zaman bazlı ivme ölçülmüş ve hız, deplasman ve enerji değişimleri her bir deney elemanı için hesaplanmıştır. Her iki grupta yer alan deney elemanları için sabit çekiç kütlesinin çarpma etkisi altındaki hasar modları gözlemlenmiş ve CFRP ile güçlendirilen kirişlerin olumlu yönde etkilendiği sonucuna varmışlardır. İvmelerin, göçmeye kadarki düşü sayılarının ve harcanan enerjinin arttığını saptamışlar. Aynı zamanda ABAQUS yazılımı kullanarak sonlu elemanlar analizi yapmışlar ve geliştirdikleri modelin deneylerle uyumlu sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır [20].

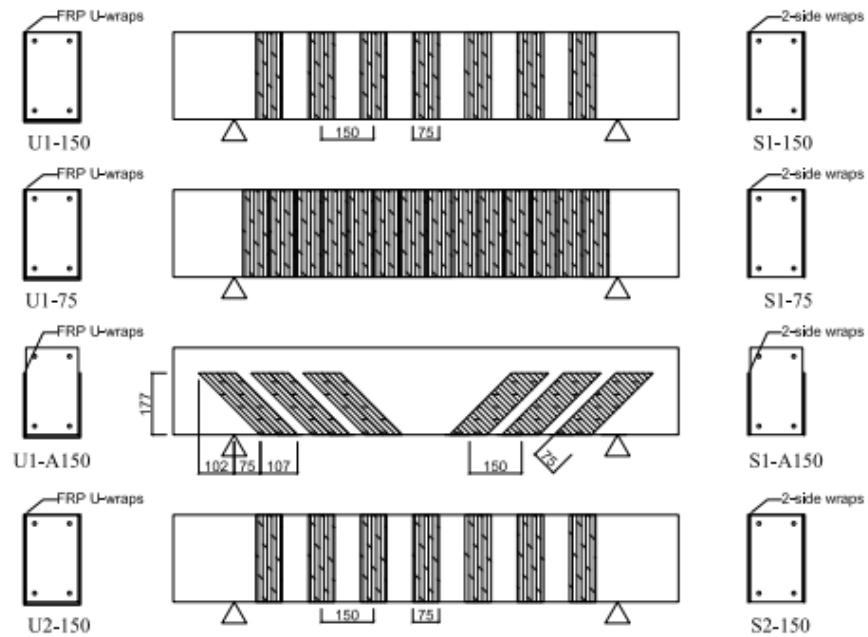
Anıl ve ark. çalışmalarında, normal ve yüksek basınç dayanımlı betona sahip numuneler, CFRP ile güçlendirilerek, çarpma yükü altındaki farklı davranışları araştırmıştır. Toplam 16 adet 750x150x100 mm kesitli betonarme kiriş numunesi test edilmiştir ve CFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişler, kesme donatısız olarak dökülmüştür. Bu deneysel çalışmada betonun basınç dayanımı, girdi çarpma enerjisi ve CFRP şeritlerin sarma boşluğu değişkenler olarak alınmış ve 20 MPa ve 30 MPa beton basınç dayanımlarına sahip iki seri test numunesi olarak üretilmiştir. Sabit ağırlıklı 5,25 kg ağırlığındaki çekiç, giriş çarpma enerjisini değiştirmek için 500 mm ve 750 mm olmak üzere iki farklı yükseklikten düşürülmüştür. CFRP şeritler 25 mm sabit genişlikte olup, kirişlere 50 mm, 75 mm ve 100 mm aralıklarla yapıştırılmıştır (Şekil 2.3). Farklı test serilerinin her biri, herhangi bir güçlendirme yapılmayan bir referans test numunesine sahiptir ve bu kontrol numunesi, CFRP ile güçlendirilmiş diğer kirişlerle karşılaştırılmıştır [21].



Şekil 2.3. Anıl ve ark. deney elemanlarının güçlendirme detayları [21]

Hız ve yer değiştirme değerleri, test numunelerinden ölçülen ivme kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma parametrelerinin ve CFRP ile güçlendirme tekniğinin test numunelerinin ivmeleri, hızları ve yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çarpma testinin bilgisayar simülasyon ortamında simülasyonu için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış ve simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, kesme kusurlu betonarme kirişlerin çarpma davranışlarının CFRP şerit ile güçlendirmeden olumlu yönde etkilendiğini göstermiştir. Kirişlere uygulanan CFRP, betonarme kirişlerin rijitliklerini arttırmış, süneklik seviyelerini ise azaltmıştır. CFRP şeritlerinin aralıklarındaki azalma, test numunelerinden ölçülen ivme, hız ve yer değiştirme değerlerini azaltmıştır. Böylece yazarlar, CFRP U-sargılar ile güçlendirilmiş kesme yetersiz betonarme kirişler üzerinde çarpma yükü testi yapmış ve şeritlerin kesme güçlendirme etkilerini doğrulamıştır. Deney ve simülasyon sonuçları incelendiğinde beton basınç dayanımı, çarpma hızı ve CFRP şerit aralığı gibi değişkenlerin beton kirişlerin çarpma davranışları üzerindeki etkisinin deneysel ve ANSYS analizlerinde benzer eğilimlere sahip olduğu görülmüştür [21].

Pham ve ark. çalışmalarında farklı sargı şemaları ile FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma davranışını ve FRP'nin kesme dayanımına katkısını hem statik hem de çarpma yükleri altında araştırmıştır. Kirişler etriye olmayacak şekilde tasarlanmıştır, böylece FRP'den gelen kesme katkısı uygun şekilde değerlendirilebilmiştir. Bu çalışmada 1.500x150x250 mm boyutlarındaki 13 adet etriyesiz betonarme kirişten 4 kiriş statik yükler altında test edilirken, diğer dokuz kirişe çarpma testi uygulanmıştır. Çarpma testleri belirli bir yükseklikten kirişlerin orta açıklığına bir ağırlık düşüren bir ağırlık düşürme test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlık, 203,5 kg (2 kN) ağırlığındaki sağlam bir çelik silindirden yapılmıştır. Kirişlerden 11 tanesi, farklı sarma şekillerinin etkinliğini araştırma amacıyla FRP sarma işlemini iki tarafına veya U-sargılama şeklinde; 0° veya 45° açı ile sargılama; 75 veya 150 mm aralıklarla; bir veya 2 katman FRP sargılama şeklinde güçlendirilme uygulanmış, 2 kiriş ise statik ve çarpma deneyleri için referans kiriş olarak kullanılmak üzere güçlendirme yapılmamıştır (Şekil 2.4) [22].



Şekil 2.4. Pham ve ark. deney elemanlarının güçlendirme sarım şekli [22]

FRP ile güçlendirilmiş kirişler hem statik hem de çarpma yüklerinde referans kirişe kıyasla daha yüksek yük kapasitesi ve daha düşük yer değiştirme sergilediğini ve betonarme kirişlerin FRP güçlendirmesinin yük kapasitesinde önemli bir gelişme sağladığını ve kiriş sertliğini arttırdığını gösterdiğini belirtmişlerdir [22].

Deneyisel sonuçlar, aynı miktarda FRP kullanılarak, 45° açılı FRP sargıların hem yük kapasitesi hem de yer değiştirme açısından dikey FRP U sargılara göre daha iyi performans sağladığı ve bir betonarme kirişi FRP ile tamamen sarmak, aralıklı FRP şeritleri ile sarmaktan daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, betonarme kirişlerin göçme modları, statik yükleme altında sünek eğilme kırılmasından, çarpma yükü altında gevrek kesme kırılmasına değiştiği görülmüştür. Çarpma yükleri altında FRP'nin bağlanma gerinimi, statik yükler altında olduğundan biraz daha küçük bulunmuştur. Eğimli FRP U-sargıları ile güçlendirilen kirişler, dikey FRP U-sargıları ile güçlendirilen kirişlere göre daha yüksek statik/ çarpma dirençleri vermiştir. Maksimum çarpma kuvveti anındaki kesme kuvveti, maksimum reaksiyon kuvveti anındaki kesme kuvvetinden çok daha büyük ve FRP'nin çarpma testlerindeki bağdan ayrılma gerilimi, statik testlerden biraz daha düşük bulunmuştur. Yazarlar, çarpma yüklerine karşı kesmede betonarme kirişleri güçlendirmek için FRP'nin kullanılabileceğini önermişlerdir [22].

Fujikake ve ark. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma tepkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Düşme yüksekliğinin, çarpma sayısının ve CFRP güçlendirme planının kirişler üzerindeki tepkisini bir düşme çekici kullanarak yapılan çarpma testi ile araştırmışlardır. Deneyisel çalışmada 1.700x170x160 mm boyutlarında 22 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişlerden 4 tanesi referans kiriş olarak test edildiği için güçlendirme uygulanmazken, kalan diğer 16 kirişi güçlendirmek için CFRP iki farklı şekilde; tek yönlü levhalar ve tek yönlü pultrüzyonlu laminatlar kullanıldı. Kirişlerin 16'sı her biri dört adet olacak şekilde dört gruba ayrılıp, dört farklı tipte CFRP güçlendirme şeması uygulanmıştır. Birinci ve ikinci gruba 0,222 mm kalınlığında ve 150 mm genişliğindeki CFRP levhalar kirişlerin alt kısmına yapıştırılmış; ikinci gruba CFRP levhasına ek olarak kiriş eksenine dik olacak şekilde alt CFRP levhanın uçlarına 0,111 mm kalınlığında ve 250 mm genişliğindeki bir CFRP levha yerleştirilmiş; üçüncü gruba ve dördüncü gruba 1,0 mm kalınlığında ve 50 mm genişliğindeki CFRP laminatlar kirişlerin alt kısmına yapıştırılmış; üçüncü gruba CFRP laminata ek olarak 16 mm çapında çelik ankraj civataları ve 9 mm kalınlığındaki çelik kapak plakaları eklenmiş; dördüncü gruba CFRP laminata ek olarak CFRP laminatların her iki ucuna 0,111 mm kalınlığında ve 250 mm genişliğindeki CFRP U-sargı levhaları yapıştırılmıştır (Şekil 2.5) [6].

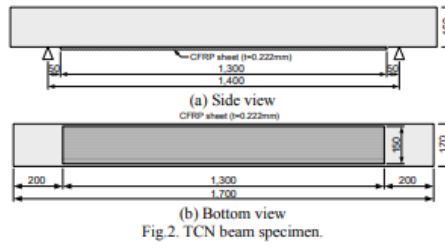


Fig. 2. TCN beam specimen.

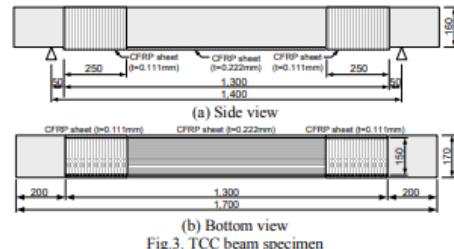


Fig. 3. TCC beam specimen

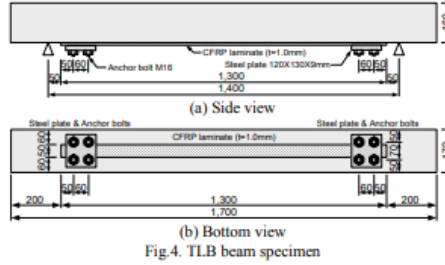


Fig. 4. TLB beam specimen

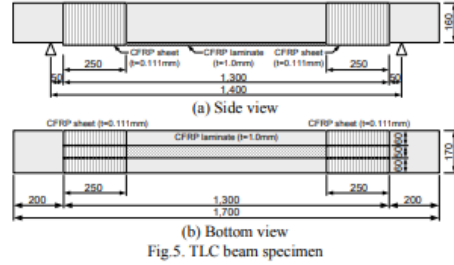


Fig. 5. TLC beam specimen

Şekil 2.5. Fujikake ve ark. deney elemanı güçlendirme detayları [6]

Ağırlık düşürme testleri 90 mm yarıçaplı 300 kg ağırlığındaki çekiç ile belirtilen yüksekliklerden kirişin üst yüzeyinin orta noktasına serbestçe bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tek yükleme ve yinelemeli yükleme olmak üzere iki yükleme türü uygulanmıştır. Tekli yükleme testinde, çekiç 100, 200 veya 400 mm yükseklikten yalnızca bir kez serbestçe düşürülürken; yinelemeli yükleme testinde, çekiç aynı kirişe defalarca düşürülmüştür. İlk düşme yüksekliği 50 mm iken, daha sonra düşme yüksekliği her 200 düşürmeden sonra iki katına çıkarılmıştır. CFRP levhalar maksimum 3.400 MPa gerilme mukavemetine ve 245 GPa elastik modüle sahipken, CFRP laminatlar maksimum 2.400 MPa gerilme mukavemetine ve 156 GPa elastik modüle sahip ve test sırasında betonun basınç dayanımı 41,9 MPa bulunmuş. CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin çatlak genişliği, güçlendirilmemiş betonarme kirişlere kıyasla %10'dan daha az bir oranda önemli ölçüde azaldığı ve betonarme kirişlerin pultrüzyonlu CFRP laminatlarla güçlendirilmesi için ankraj cıvatalı ve çelik kapak plakalı uç ankrajlar nispeten büyük çarpma yüklerine karşı oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Deney sonuçları, kirişlerin alt kısmına bağlanan CFRP levhaların her iki ucuna uygulanan uç ankrajlar, alt CFRP levhaların ayrılmasının önlenmesine yardımcı olduğu ve böylece uç ankrajlı CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin nispeten büyük çarpma yüklerine dayanabildiğini, CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin güçlendirilmemiş kirişlerin bozulmasına neden olan yüksekliğin 2 katına dayanabildiği ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma yüklerine karşı direncinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir [6].

Pham ve ark. 2017 yılındaki çalışmalarında, FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve çarpma yükleri altındaki davranışını farklı yükleme koşullarına ve farklı kesitlere sahip, dikdörtgen kesitli ve modifiye kesitli olmak üzere iki kiriş grubu üzerinde araştırmıştır. Deney programı, statik yüklerde test edilen altı kirişi ve çarpma yüklerine karşı test edilen yedi kirişi içerirken, 2 kirişe herhangi bir güçlendirme uygulanmamış, diğer kirişleri güçlendirmek için boyuna tabaka şeklinde (bazıları tek bazıları çift katman olarak kirişlerin alt kısmına bağlanmış) ve U-sargılı şeritler (4 kirişe her iki uca olacak şekilde 2 adet, 4 kiriş ise eşit aralıklarla 13 adet şerit kirişlerin üç tarafına dikey olarak bağlanmış) şeklinde CFRP kullanılmıştır. Modifiye kesitli kirişler, dikdörtgen çelik kalıp ve kavisli polistiren köpük kalıp içeren özel bir kalıpta dökülmüş olup, statik kesme kapasiteleri, statik eğilme kapasitelerinin yaklaşık dört katı olacak şekilde bükülme sırasında kırılacak şekilde tasarlanmıştır. Dikdörtgen kirişlerin boyutları 2.200x250x150 mm; modifiye kesitli kirişler ise dikdörtgen kirişlerle aynı uzunluğa sahip, ancak kesit, CFRP ile bağlanmadan önce kavisli bir alt yüzeye sahip olacak şekilde değiştirilmiştir. Dört kirişten oluşan bölüm, karbon fiberle güçlendirilmiş polimer U-sargıların stres konsantrasyonunu azaltmak ve uzunlamasına fiberle güçlendirilmiş polimer şeritler üzerinde sınırlama etkisi sağlamak amacıyla kavisli bir alt yüzeye sahip olacak şekilde değiştirildiği belirtilmiştir [23].

Statik testler, altı kirişin test edilmesini ve bunların monoton olarak artan bir yüke verdiği tepkilerin ölçülmesiyle gerçekleştirilirken, ağırlık düşürme çarpma testleri, çarpma test aparatı kullanılarak kirişlerin orta açıklığına belirli bir yükseklikten 203,5 kg ağırlığındaki sağlam bir çelik silindir ağırlık düşürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deforme olmuş çubukların ve düz çubukların nominal çekme mukavemeti sırasıyla 500 ve 250 MPa, kullanılan hazır betonun 28 günlük basınç dayanımı ise 46 MPa bulunmuş. CFRP, 54 MPa çekme mukavemetine, 2,8 GPa çekme modülüne ve %3,4 çekme uzamasına sahip epoksi reçine ile betonun alt katmanına bağlanmış. Kullanılan CFRP'nin genişliği 75 mm ve tek yönlü fiber yoğunluğu 340 g/m²; nominal kalınlığı 0,45 mm ve çekme mukavemeti 1.548 MPa imiş. Maksimum çekme kuvveti ve ortalama elastik modüldeki ortalama gerinim sırasıyla %1,74 ve 89 GPa bulunmuş. Alt yüzey boyunca boyuna yönde iki kat CFRP ve enine yönde U sarılı bir CFRP şerit kullanılarak güçlendirilen kirişlerin çarpma yükü kapasitesi %1,5 artarken, yedi adet U sarılı şeritle güçlendirilen kirişlerin çarpma dayanımı yaklaşık %9 oranında arttığı gözlenmiştir [23].

Bu sonuçlar kesme dayanımının çarpma dayanımını artırdığını göstermiştir. Çarpma kuvveti altında, bir elemanın çarpma süresinin ötesinde bir süre boyunca sonik-plastik deformasyon içerisinde yoğun kuvvete ve serbest titreşim etkilerine dayanması gerektiğini belirtmişler. Deneysel sonuçlar, CFRP U-sargılarının, uzunlamasına CFRP şeridinin bağlanmasını önemli ölçüde geciktirdiği ve böylece kirişlerin kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Betonarme kirişlerde kesme kırılması kritik olup hasarın sıklıkla çarpma yüklemesi altında meydana geldiğini; burada aynı kiriş herhangi bir statik yükleme altında eğilmede hasar gördüğünü belirtmişlerdir. FRP'lerdeki bağ açma geriliminin çarpma kuvveti altında statik kuvvete göre daha düşük bulunmuş. Yazarlar, kesme kapasitesi eğilme kapasitesinin yaklaşık dört katı olmasına rağmen, beklenen etki alanında kesmede betonarme kirişlerin yerel olarak güçlendirilmesinin kesme yenilmesini önlemek için çok önemli olduğunu gözlemlemişler. Yeterince güçlendirilmemiş kirişler, çarpma kuvvetinin uygulandığı orta açıklıkları boyunca çok sayıda eğimli kesme çatlağı ve diyagonal çatlaklar geliştirebileceği için yeterli miktarda FRP şeritlerin 45° yönünde sarılmasıyla bu çatlakların en aza indirilebileceğini önerdiler. Deneysel sonuçlardan, çarpma direncinin tasarlanması için çarpma olayının çok erken aşamasındaki maksimum çarpma kuvveti ve karşılık gelen atalet kuvvetlerinin, reaksiyon kuvvetlerinden ziyade çarpma direncini tasarlamak için kullanılması gerektiğini öne sürdüler [23].

Remennikov ve ark. çalışmalarında farklı sargı şemalarının etkinliğini araştırmak için CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişleri hem statik hem de çarpma yükleri altındaki tepkileri deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada kullanılmak üzere 4 mm çelik donatıların 275 mm veya 375 mm düzenli aralıklarla yerleştirildiği, 2.400x150x100 mm kesitlerinde on iki adet betonarme kiriş üretilmiştir. Farklı sarma şekillerinin etkinliğini araştırmak için kirişler CFRP ile tek katman tamamen sarılarak, ya da bir veya iki katman U şeklinde sarılarak güçlendirilmiş ve karşılaştırma amacıyla güçlendirme uygulanmamış referans kirişlerle karşılaştırılmıştır. Betonarme kirişlerin beş tanesi yük sapma davranışı, arıza modu ve enerji emme kapasitesinin analizi için üç noktalı statik yükleme altında test edilirken, kalan yedi adet kiriş çatlak desenleri, hasar modu, dinamik orta açıklık sapması ve dinamik kuvvet açısından çarpma davranışını araştırmak için 590 kg'lık bir çekiç enerji prensipleri kullanılarak hesaplanan yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır [1].

Deneyisel çalışma sonucunda CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme yetersiz olan kirişlere kıyasla çarpma yükü altında enerji emme kapasitesinin önemli ölçüde arttığı, kirişlerin hasar modunun kesme kırılmasından eğilme kırılmasına dönüştürdüğü ve böylece CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerinin kesme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Tamamen CFRP ile sarılarak güçlendirilmiş betonarme kirişte nihai yük taşıma kapasitesinin 8 kN daha fazla olduğu bulunmuştur. U şeklinde sarma yöntemi, tamamen CFRP ile sarılmış betonarme kirişlerle karşılaştırıldığında benzer yük taşıma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür, ancak sarım şekillerinin etkilerini daha iyi anlayabilmek için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir [1].

Kim ve ark. CFRP ile güçlendirme yönteminin normal beton kirişlere etkisini araştırdıkları çalışmalarında, CFRP sargının genişliği ve uygulama aralığını değişken olarak kullanmış ve kirişlere belirli aralıklarla sarılmış CFRP şeritlerinin güçlendirme etkisi analiz edilmiştir. Deneyde kullanılmak üzere 6 adet 10 mm çapında çekme donatısı, 10 mm çapında 100 mm uzunluğunda sargı donatısı kullanılan 1.200x200x150 mm boyutlarında normal beton kirişler üretilmiş. Güçlendirme için kullanılan CFRP 20 mm veya 40 mm genişliklerinde ve 90 mm veya 70 mm aralıklarla sarılmıştır. Kirişlere, 461 kg'lık bir çekiç kırıldığı gözlemlenene kadar 300 mm yükseklikten düşürülerek ağırlık düşürme testi birden fazla kez uygulanmış ve güçlendirme etkisini araştırmak için kirişlerin çeşitli konumlarındaki betondaki sehim ve gerinim ölçülerek güçlendirme uygulanmayan referans kirişle karşılaştırılmış. Kirişte oluşacak kesme göçme mekanizmasını gözlemlemek ve kirişin etrafına 20mm ve 40mm CFRP uygulayarak kesme dayanımını incelemek için kirişin orta kısmında kesme donatısını kullanmamışlar. Güçlendirme uygulanmayan referans kirişlerde kolaylıkla kesme kırılması gözlenmiş. CFRP ile güçlendirilen kirişlerde kesme çatlakları mesnette ortaya çıktığı ve bir sonraki çarpmada çapraz olarak çarpma noktasına doğru ilerlediği gözlenmiştir. 20 mm CFRP ile güçlendirilen kirişler kırılma nedeniyle başarısız olurken, 40 mm CFRP ile güçlendirilen kirişlerin ilk çarpışmada kopmadığını gözlemlemişler. Deney sonuçlarından CFRP'nin normal beton kirişlerin etrafına uygulanmasının kesme dayanımında faydalı olduğu sonucuna ulaşmışlar ve CFRP uygulaması kirişin çarpma yüküne karşı sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir [24].

Liu ve ark. etriyesiz betonarme kirişlerin kesme çarpma davranışını araştırmak ve CFRP ile güçlendirmenin etkilerini değerlendirmek için yürüttükleri deneysel çalışmada, statik ve çarpma yükü altında etriyesiz ancak boylamasına aynı donatıya sahip 2.400x400x200 mm boyutlarında on bir adet betonarme kiriş numunesi test edilmiştir. İki numune güçlendirme yapılmayan kontrol numuneleri, kalan 9 numune ise 100, 200, 400 mm aralıklarla; 25, 50, 100 mm genişliğindeki CFRP ile, numunenin uzunlamasına eksenine dik olacak şekilde, matris olarak iki bileşenli bir epoksi reçine yapıştırıcı kullanılarak sarılmıştır. Çarpma testleri, maksimum düşme ağırlığı 1.000 kg ve maksimum düşme yüksekliği 16 m olan; çarpma kütlesi, hızı ve enerjisi dahil olmak üzere ana deneysel değişkenlerle çarpma testlerini gerçekleştirmek için iyi donanımlı bir düşme ağırlığı ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilmiş, çatlak modelleri ve başarısızlık modları, dinamik kuvvetlerin zaman geçmişleri, orta açıklık sapmaları, ivmeleri ve CFRP gerinimleri değerlendirilmiştir [2].

Tam döngü CFRP sarımının, etriye olmaması nedeniyle kesme eksikliği olan betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için etkili olduğu tespit edilmekle birlikte, statik yüke ve dinamik çarpmaya maruz kalan CFRP sarılı kirişler için farklı davranışlar gözlenmiştir. ACI spesifikasyonunun gerektirdiğinin yaklaşık yarısına eşit bir takviye oranına eşit CFRP sargısı ile güçlendirme, statik yükleme sırasında betonarme kirişin kesme kırılmasını engelleyemezken, dört kattan daha fazla çarpma yüklemesine kadar kesme kırılmasını önleyebildiği görülmüştür. Çarpma yükünden çok uzaktaki CFRP sargıları, kaydedilen daha küçük gerilmelerle kanıtlandığı üzere tam olarak devreye giremediği, çarpma alanına yakın şeritlerin genişliğinin genişletilmesinin, bu tür lokalize zımbalama kesme arızasının önlenmesinde etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak betonarme kirişler için CFRP kaplamanın etkileri, statik ve çarpma yükleme için farklı bulunmuş olup değişen çarpma hızı ve çarpma enerjisi, dinamik tepki üzerinde farklı etkilere sahip ve arıza modlarında değişikliklere neden olduğu görülmüştür. CFRP güçlendirmesinin betonarme kirişlerin çarpma direncini artırabileceği, sapmalarını önemli ölçüde azaltabileceği ve hasarı sınırlayabileceği sonucuna varılmıştır [2].

Huo ve ark. CFRP güçlendirme düzenlemesinin çarpma yükü altında etriyesiz betonarme kirişlerin göçme mekanizmaları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Beş kiriş statik yükler altında ve 10 kiriş çarpma yükleri altında test edilerek, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma yüklemesi altında kırılma modları ve kesme mekanizması elde edilmiştir. Deney sonuçlarından, tek 45° CFRP sargılarının güçlendirme etkisinin, CFRP U sargılarından ve çapraz CFRP sargılarından çok daha yüksek olduğu ve CFRP U sargıları ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin hem kesme kapasitelerinin hem de sapmalarının çapraz geçişli CFRP sargılarla güçlendirilmiş kirişlerden biraz daha iyi olduğu görülmüştür. Hasar sürecinin kirişlerin orta kesite bitişik yerel kısmının çarpma yüklemesi altında kesme kopması ile tepki kuvveti altında desteğe yakın bölümün kesme kırılması olarak ikiye ayrılabilceği gözlenmiştir. Test sonuçları, CFRP'nin düzeni ve miktarının yanı sıra çarpma enerjisinin kirişin dinamik davranışında önemli bir rol oynadığını gösterdiğini vurgulamışlardır [25].

Yılmaz ve ark. değişen genişlikte ve düzenleme şeklindeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiş iki yönlü basit destekli betonarme döşemelerin çarpma davranışını belirlemek için ağırlık düşürme testleri gerçekleştirmişler. Deneysel çalışma için 1.000x1.000x80 mm boyutlarında toplam 9 adet betonarme döşeme üretilmiştir. Döşemelerden biri referans olarak test edilmek üzere güçlendirilmezken, geri kalan betonarme döşemeler hem bir hem de iki yönde dik ve çapraz olarak 50 ve 100 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiş. Ağırlık düşürme testlerinin yanı sıra sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çarpma kuvvetinin zaman geçmişi, iki noktanın ivmesi, levhaların merkezi yer değiştirmesi ve CFRP şeritler üzerindeki dört noktanın gerinimleri ölçülmüştür. Test sonuçlarından, 100 mm genişliğinde, iki yönde yerleştirilmiş diyagonal yönlendirilmiş CFRP şeritlerle güçlendirilerek, betonarme döşemelerin çarpma direncinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği ortaya çıktığı gibi, önerilen sonlu eleman modelinin, düşük hızlı çarpma yüküne maruz kalan CFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme döşemelerin dinamik tepkilerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceği anlaşılmıştır [26].

Naser ve ark. [27] betonarme yapıların güçlendirilmesinde fiber takviyeli polimer kompozitler konulu derleme çalışmalarında, inşaat mühendisliği uygulamalarının güçlendirilmesi ve rehabilitasyonunda FRP'nin tarihi ve son gelişmeleri hakkında son teknoloji bir inceleme sunmuşlar. FRP sistemlerinin çok yönlü ve kurulumu kolay olduğu için eğilme, kesme, burulma ve eksenel güçlendirme uygulamalarında kullanışlı olduğunu ve bu kompozitlerin en büyük katkısının mevcut yapıların kullanım süresini uzatma potansiyeli olduğu sonucuna varmışlardır. FRP'lerin betonarme yapıların güçlendirilmesinde sürekli entegrasyon açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu, çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılabildiğini ve esasen modern betonarme yapıların geleneksel tasarımında da devrim yarattığını vurgulamışlardır. Ancak diğer inşaat malzemeleri gibi FRP kompozitlerin de tam potansiyelleriyle kullanılmalarını engelleyen sınırlamalar olduğunu ve FRP ile güçlendirilen yapıların performansının, FRP malzeme ve sistemlerinin çevredeki yükleme ve çevre koşulları altındaki performansı ile sınırlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu sınırlama ve zorluklar FRP malzemeleri ve güçlendirme sistemlerinin yorulma, sismik ve çarpma yüklemesine maruz kalmanın yanı sıra yüksek sıcaklık, tuzlu ortam, donma ve çözülme döngülerine maruz kalmasıdır. FRP kompozitlerinin üstün özellikleri ve modern yapı tasarımının ayrılmaz bir parçası olabileceğini ancak FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin, döşemelerin ve boşluklu duvarların davranışına ilişkin mevcut veri tabanının, yeni testlerden ve sayısal araştırmalardan elde edilen sonuçlarla daha da zenginleştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır [27].

Kishi ve ark. statik olarak nihai duruma ulaşan ve eğilme kırılmaları sergileyen etriyeli betonarme kirişlerin çarpma dayanımını iyileştirmek için FRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişler üzerinde düşük hızlı çarpma yükü testleri uygulayarak FRP levhaların kirişlerin çarpma dayanımı, çarpma dayanım özellikleri ve kırılma davranışı üzerindeki güçlendirme etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada 3.000x250x200 mm boyutlarında 12 adet numune kullanılmış. Karşılaştırmalı analiz için bir FRP levhası ile güçlendirilmeyen bir referans kirişi oluşturulmuş, kalan 11 kirişte hem AFRP hem de CFRP levhalar kullanılmış ve malzeme hacimleri, yaklaşık olarak eşit eksenel sertliklere sahip levhalar üretecek şekilde ayarlanmıştır. Üst ve alt liflere 19 mm çapında iki eksenel donatı dökülüp ve donatılar 9 mm kalınlığa kaynak yapılmış [28].

Tam ankraj sağlamak ve parçanın kirişin çarpma tepki özellikleri üzerindeki etkisini azaltmak için destek noktasından serbest kenara olan mesafeyi korumak için kirişin uçlarında çelik plakalar, 10 mm çapında etriyeler 100 mm aralıklarla yerleştirilmiş. FRP levhası gerdirmeye tarafındaki yüzeye yapıştırılmış ve destek noktası ile levhanın ucu arasında 50 mm bırakılmıştır. Çarpma kuvveti, çeşitli yüksekliklerden 300 kg'lık bir çelik silindirin (ağırlığın) kirişin orta açıklığına düşürülmesiyle oluşturulmuş olup, deney her bir kiriş için tek bir yükleme yöntemi kullanılarak yürütülmüş ve levhanın bağı çözülene kadar ağırlığın düşme yüksekliği arttırılmış. Kirişlerin statik yükleme altındaki kırılma modlarını doğrulamak ve kirişlerin statik ve çarpma yüklemesi altındaki yük taşıma özelliklerini karşılaştırmak için statik yük testleri de yapılmıştır. FRP levhalarla eğilme güçlendirmesi yapılarak kirişlerin çarpma -dayanıklılık kapasiteleri iyileştirildiği; sacların aksel rijitlik değeri eşit olduğunda sac malzemelerden bağımsız olarak sacların güçlendirme etkilerinin benzer olduğu; maksimum ve artık sapmalar, FRP levhaların bağı ayrılana kadar artan girdi çarpma enerjisi ile yaklaşık olarak doğrusal olarak dağıtıldığı sonucuna varılmış [28].

Nigani ve ark. yüksek lisans tez çalışmasında, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin çarpma ve statik yükleme altındaki yapısal davranışı üzerindeki etkiyi araştırmıştır. Çalışmada statik testler ile çeşitli ağırlık düşürme çarpma testleri uygulanmış ve test sonuçları analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Araştırmanın esas amacı çarpma yüklemesine maruz kalan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deformasyon kapasitesinin ve enerji emiliminin yapısal tepkisini incelemektir. Çarpma yükünün yoğunluğu ve güçlendirme alanının etkisini araştırmak için farklı miktarlarda FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler, farklı düşme yüksekliklerinden oluşan düşme ağırlığı ile test edilmiş. Ağırlık düşürme testlerinde kirişlerin tepkisi yüksek hızlı kameralar tarafından yakalanmış ve elde edilen veriler Dijital Görüntü Korelasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada 1.400x100x100 mm ebatlarında, 6mm çapında simetrik yerleşimli 4 adet uzunlamasına donatılı 19 adet betonarme kiriş statik ve dinamik olarak test edilmiştir. Kirişlerin 18'i her biri altı adet olacak şekilde üç gruba ayrıldı ve 6 kirişten oluşan bir gruba 1 kat FRP, ikinci gruba 3 kat FRP ile güçlendirme uygulanırken, son gruptaki 6 kirişe referans kiriş olarak kullanılmak üzere güçlendirme uygulanmamış [29].

Güçlendirme için kullanılan aramid levha 1.200 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğinde imiş. 18 kirişin yarısı kopana kadar sadece üç noktalı eğilme kullanılarak statik teste tabi tutulurken; kirişlerin diğer yarısına farklı düşme yüksekliklerinde çarpma testi ve ardından kalan kapasiteyi belirlemek için statik üç noktalı eğilme testi uygulanmış. Son kiriş olan 19. kirişe, destek durumunun sertlik tepkisine göre karşılaştırılması için silindirlerin üstünde düz çelik kareler kullanılarak farklı bir destek ile yalnızca statik test uygulanmış. Tüm dinamik testler kirişler yalnızca bir kez 200 mm yarıçaplı 20 kg ağırlığındaki yuvarlak uçlu silindirik çelik çubuk ile ağırlık düşürme testine tabi tutulmuş, ancak kirişlere bağlı olarak 3 m, 3,5 m ve 4 m gibi farklı düşme yüksekliklerine maruz bırakılmıştır. Statik testlerde üç nokta eğilme testi kullanılarak yük kirişin merkezine uygulanmıştır. Tüm statik testler için deformasyon hızı ilk 10 mm'lik sehim için 2 mm/dak ve daha sonra donatı kopmasına ulaşınca kadar 10 mm/dak olarak ayarlanmış [29].

Test sonuçlarından FRP ile güçlendirmenin yük kapasitesinin artmasına ve statik yükleme için maksimum deformasyona yol açtığı görülmüştür. Dönme kapasitesi 1 kat FRP ile güçlendirilen kirişlerde bir miktar artmış iken 3 kat FRP ile güçlendirilen kirişlerde ise bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Artan miktarda FRP ile güçlendirilen kirişlerde artan bir etki elde edildi ve FRP ile güçlendirme uygulamasının bir sonucu olarak çarpma kuvvetinin arttığı gözlenmiştir. Yazarlar deneysel sonuçlardan, FRP ile güçlendirmenin, çarpma testlerinde olumlu etki gösterdiği ve FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yapısal davranışı üzerinde umut verici bir etki yarattığı yani, çarpma yüklemesi sırasında orta nokta sapmasında ve plastik deformasyonda önemli bir azalma görüldüğü sonucuna varmışlardır [29].

Shakir Abbood ve ark. FRP kompozitlerinin inşaat sektöründe güçlendirme malzemeleri olarak kullanılmasına ilişkin derleme çalışmalarında, FRP kompozitlerin tasarımı ve bunları oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin basınç, kesme, eğilme ve çekme dayanımı açısından kısa bir değerlendirme de sunmuşlardır. İnşaat mühendisliği sektöründeki rekabetin genellikle, istenmeyen ağır yüklere ve agresif çevre koşullarına dayanabilen, minimum bakım gerektiren ve uzun hizmet ömrüne sahip, düşük maliyetli, düşük yoğunluklu malzemelerin gerektirdiği sonucuna varmış ve ileri kompozit malzemelerin pek çok farklı yapıda takviye olarak kullanımının son yıllarda kabul edilebilir düzeyde geliştiğini vurgulamıştır [30].

Kompozit malzeme olarak "elyaf takviyeli polimerler" FRP kullanımının, köprüleri, binaları, tünelleri, siloları, tankları ve yer altı altyapıları gibi çeşitli yapısal uygulamalar için güçlü bir güçlendirme tekniği ve yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı son yıllarda birçok araştırmacının da ana odak noktası olduğunu belirtmişlerdir. FRP malzemeleri arasında AFRP, yüksek maliyetine rağmen basınç dayanımının düşük olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmadığı, E-GFRP'nin en ucuz ve en çok tüketilen kompozit olarak kabul edildiği, BFRP'nin E-GFRP'den farklı olarak üretim eksikliği nedeniyle daha yüksek maliyetli olduğu ve CFRP'nin ise üstün mukavemete sahip ve FRP kompozitleri arasında yorulma ve sürünme arızalarına karşı yüksek direnç gösterdiği ve bu nedenle de CFRP'nin yüksek maliyetli olduğu sonucuna varmışlardır. Derlemede yer verdikleri bilgilere dayanarak, FRP'lerin hafiflik, yorulma direnci, yüksek çekme mukavemeti, korozyon önleyici ve ısı yalıtımı gibi avantajları nedeniyle yüksek performanslı malzemeler olarak inşaat mühendisliği alanında FRP'ye artan bir ihtiyaç olduğu ve çeşitli uygulamalar için çok sayıda kullanıldığı açıkça belirtilmiş olup, FRP tekniğinin önümüzdeki yıllarda da çeşitli yapıları içeren çok sayıda onarım ve güçlendirme projesinde tercih edilen seçenek olmaya devam edeceğine dair öngörülerini beyan etmişlerdir [30].

Eriksson ve ark. yüksek lisans tez çalışmasında, FRP ile güçlendirilmiş çarpma yüküne maruz kalan betonarme kirişlerin yapısal tepkisini araştırdılar. Bu çalışmanın odak noktası, FRP ile güçlendirmenin çarpma yüküne maruz kalan yapılar üzerindeki etkisini deformasyon kapasitesi, nihai yük kapasitesi ve enerji emilimi açısından değerlendirmektir. Deneysel çalışmada 1.400x100x100 mm ebatlarında, 6mm çapında simetrik yerleşimli 4 adet uzunlamasına donatılı 22 adet betonarme kiriş statik ve dinamik olarak test edilmiş. Kirişlerden 4 tanesi referans kiriş olarak test edildiği için güçlendirme uygulanmamıştır, geri kalan kirişler ise 1200 mm uzunluk ve 100 mm genişliğindeki FRP levhalar ile iki farklı türde epoksi kullanılarak güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma, güçlendirilmemiş, iki tip yapıştırıcı kullanılarak FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin sadece statik ya da farklı yüksekliklerden ağırlık düşürme testlerinden ve ardından kopana kadar statik yükleme testlerinden oluşmaktadır. Dinamik test, çelik silindirik bir çubuğun kirişin üst kenarından ve merkezinden 3,0, 4,0, 5,0 ve 5,7 m yüksekliklerinden 22 kirişten 16'sının üzerine düşürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Statik testler üç noktalı bükülme ile test edilmiştir [31].

Kirişlerden 6 tanesi (hasarsız kirişler) sadece statik olarak test edilirken, geri kalan kirişler kalan mukavemetlerini tespit amacıyla önceden dinamik testlerine tabi tutularak (hasarlı kirişler) daha sonra statik test edilmiştir. Testler sırasında kirişlerin tepkisi ve düşme ağırlığını yakalamak için yüksek hızlı kameralar kullanılmış ve elde edilen veriler daha sonra Dijital Görüntü Korelasyonu kullanılarak işlenmiştir. Bu alışmada FRP'nin güçlendirilmemiş kirişlere kıyasla gelişmiş bir yapısal tepki sağladığı görülmüştür. Sonuçlar, FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin daha yüksek yük taşıma kapasitesi, daha büyük deformasyon kapasitesi ve iyi bir enerji emilimi elde ettiğini göstermiştir. Yazarlar beton ve FRP arasında iyi bir yapışma sağlamak için iyi işlenmiş bir yüzeyin gerekliliğinin önemi vurgulamışlardır [31].



3. MATERYAL-METHOD

Farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını incelediğimiz deneysel çalışmada kullanılan kiriş kalıp malzemesi, donatı çeliği, beton, güçlendirme ve yapıştırma malzemeleri, çelik plak, serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği, ölçüm ve veri toplama aygıtları ve ölçüm cihazları, bağlantı kabloları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Plywood Kalıp Malzemesi

Ağaç damarlarının doğal dayanıklılığı kullanılarak elde edilen “plywood”, esneme özelliğine sahip üzeri filmle kaplı bir kontrplaktır. Plywood, tomruklar soyularak çekilen tabakalar, tabaka lifleri birbirine dik gelecek şekilde fenolatik formaldehit reçine kullanılarak yapıştırılır ve kontrplakların kenarları akrilik latex boya ile kaplanır. Hafif bir malzeme olan plywood yüzey betonun priz alma esnasında yaydığı ısı enerjisinin yalıtıcılığı sayesinde soğuk havalarda da kullanışlı olmakla birlikte yıpranmaya dayanıklı, tekrar kullanılabilen, uzun ömürlü ve oldukça ekonomiktir [32]. Günümüzde pek çok alanda sıklıkla kullanılan plywood, diğer ahşap ürünlere kıyasla su, rutubet ve çatlamaya daha dayanıklı olması, esnek, tekrar kullanılabilen, bulunması kolay ve ekonomik bir malzeme olması sebebiyle kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada kalıp malzemesi olarak plywood ahşap ürün kullanılmış olup kalıp imalat aşamasında 6 mm çapında vidalar kullanılmıştır.

3.1.2. Donatı Çeliği

Dikdörtgen kesitli betonarme kiriş deney elemanlarında boyuna donatı olarak (B420C) 8 mm çapında nervürlü inşaat demiri; sargılama donatısı (etriye) olarak soğuk çekim (S235JR) 6 mm çapında nervürsüz (düz) donatı kullanılmıştır. Deney elemanlarının yapımında kullanılan donatılar tüm deney elemanlarının üretilmesi için özdeş özellikte olacak şekilde tek seferde temin edilmiştir. Deney elemanlarının yapımında kullanılan donatıların mekanik özellikleri tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Donatıların mekanik özellikleri

Donatı	Çap (mm)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Dayanımı / Akma Dayanımı Oranı
Etriye	6	235	370	-
Boyuna	8	420	-	$\geq 1,15$ $<1,35$

3.1.3. Beton

Basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük, elastik ve homojen olmayan, gevrek bir yapı malzemesi olan beton, çimento, agreg, su ve gerekirse kimyasal katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışım oranları betonun özelliklerini belirler. Deneysel çalışmada üretilen C16/20 beton için çimento, kum, agreg ve su kullanılmıştır. Betonarme deney elemanlarındaki 1 m³ beton üretiminde kullanılan malzeme ve karışım miktarları (Tablo 3.2) belirlendikten sonra, beton üretimi Er Prefabrik Yapı Elemanları Fabrikasında beton mikser kullanılarak tek seferde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2. Bir m³ C16/20 beton tasarımı için gerekli malzeme miktarları

Malzemeler	Miktar (kg)
Çimento	210
Kum (0-4)	1165
Agrega (4-11)	420
Agrega (11-22,4)	411
Su	200
Su/Çimento	>0,65
Toplam:	2406

3.1.4. CFRP

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler; geleneksel güçlendirme sistemlerine alternatif olarak geliştirilmiş ve son yıllarda inşaat mühendisliği alanında kullanımı yaygınlaşmıştır. Çekme dayanımları yüksek bu tür kompozit malzemelerin en büyük avantajları hafif olmaları, kimyasal etkilere karşı dirençli olmaları, korozyona uğramamaları, istenilen şeklin kolayca verilebilmesi ve kolaylıkla uygulanabilmeleridir.

Karbon lifler ince oldukları için çok hacim kaplamazken, yüksek dayanıma sahip olmaları sebebiyle güçlendirme ve onarımda büyük avantaj sunarlar. Güçsüz, yapıların bir bölümünün veya tamamının yıkılışı ve yeniden inşa edilmesini gerektiren geleneksel yöntemlerden farklı olarak, karbon elyaf ile güçsüz yapının hemen üzerine uygulanabilmeleri sayesinde ekonomik ve hızlı çözümler sunmaktadır.

Deneyisel çalışmada betonarme kiriş deney elemanlarının güçlendirilmesinde, Telateks A.Ş.-METYX® Composites şirketi tarafından üretilen tek doğrultulu karbon dokuma kumaş olan CWUD300 A-CARBON 12K UD WOVEN kullanılmıştır (Şekil 3.1). Karbon kumaşın özellikleri tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneyisel çalışmada kullanılan Metyx marka CFRP özellikleri

Lif yoğunluğu	1,79 g/cm ³
Çekme dayanımı	4900 MPa
Elastisite Modülü	250 GPa
Kopmadaki Uzama	% 2



Şekil 3.1. Deneyisel çalışmada kullanılan Metyx Composites CFRP kumaş

3.1.5. Epoksi Esaslı Yapıştırıcı

Deney esnasında CFRP'yi kiriş yüzeyine dışardan yapıştırmak için Tekno Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Teknobond 330 Epoksi Esaslı Yapıştırıcı (Şekil 3.2) kullanılmıştır. İki bileşenli, solventsiz, tiksotropik özellikli, epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısı olan Teknobond 330 Epoksi Esaslı Yapıştırıcının özellikleri ve uygulama bilgileri tablo 3.4'te, teknik özellikleri ise tablo 3.5'te verilmiştir.

Teknik bilgiler, +20°C hava sıcaklığında ve % 50 rölatif hava nemi oranına göre elde edilen bitmiş ürünlerin, 27 gün sonrakip performansı için geçerli olan ve Tekno Yapı Kimyasalları Laboratuvar çalışmasında elde edilen yaklaşık değerlerdir.



Şekil 3.2. Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı

Tablo 3.4. Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı tanım, özellik ve uygulama bilgileri

Ürün Tanımı	İki bileşenli, solventsiz, tiksotropik özellikli, epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısıdır. TEKNOWRAP 300 'ün beton yüzeye yapıştırılarak uygulanmasında kullanılır.
Kullanım Alanları	• TEKNOWRAP elyaflarının kuru uygulama yöntemiyle uygulanmasında, • Islak uygulama sistemi için astar olarak, • Düzgün yüzeylere TEKNOBAR plakalarının yapıştırılmasında kullanılır.
Özellikleri ve Avantajları	• Kolay karıştırılır, mala ve doyurma rulosu ile uygulaması kolaydır. • Elle doyurma işlemi içindir. • Mekanik dayanımları yüksektir. • Düşey ve baş üstü yüzeylerde uygulanır. • Birçok yüzeye iyi aderans sağlar. • Yüksek mekanik özelliklere sahiptir. • Altına ayrı bir astar uygulaması gerekmez. • Solventsizdir.
Uygulama Talimatları	Yüzey Kalitesi: Uygulama yüzeyi her türlü toz, kir, zayıf ve oynak parçacıklardan, çimento şerbeti kalıntılarından, yağ ve gresten arındırılmış ve kuru olmalıdır. Beton alt yüzey temiz, sağlam ve yeterli basınç dayanımına sahip (en az 25 N/mm ²), çekme dayanımı (pull-off) en az 1,5 N/mm ² olmalıdır. Beton sağlam ve yeterli mukavemete haiz olmalıdır.

Tablo 3.4. Teknobond 330 Epoksi Esaslı Yapıştırıcı tanım, özellik ve uygulama bilgileri (devam)

Uygulama Talimatları	Yüzey Hazırlığı: Uygulama yüzeyi, en fazla yapışma dayanımını sağlamak amacıyla, basınçlı hava tutma vb. yöntemler kullanılarak temizlenmiş olmalıdır. Zayıf beton parçaları kırılıp yüksek mukavemetli tamir harcı ile tamir edilip eski haline getirilmelidir. Yapı elemanı üzerindeki sıva, boya kaldırılmalı, yüzeyi temizlenmeli, gerekli tamiratlar yapılmalıdır. Karıştırma: B bileşeni A bileşenine eklendikten sonra düşük hızlı, elektrikli bir karıştırıcı (en fazla 400dev./dk) ile homojen bir renk elde edene kadar 2-3 dakika karıştırınız. Uygulama Metodu / Ekipmanlar: Uygulaması yapılacak yere göre TEKNOWRAP 300 kesilerek hazır hale getirilir. Hazırlanan TEKNOBOND 330 karışımı, spatula ya da rulo ile betona sürülür. Daha sonra TEKNOWRAP 300 üzerine getirilip el ile epoksinin karbona iyice yapıştırılması sağlanır. Yapıştırma esnasında hafif tırtıklı plastik rulo ile alttaki epoksinin dışarıya çıkması sağlanır. Bu işlem tüm yüzeye homojen bir şekilde epoksi üst yüzeye çıkacak şekilde yapılır, epoksi yetersiz kalır ise tekrar Teknobond 330 çekilerek karbon lifleri epoksiye doyurulur. Karbon lifleri yanmaz ancak epoksi belli bir sıcaklıktan sonra alev alabilir. Bu nedenle karbon plaka üzerine çok ince epoksi sürdükten sonra kuru halde kum serpilir, üzerine sıva yapılır. Serpilen kumkarbon elyaf ile yapılacak sıva arasında aderansı sağlar.
Uygulama Notları / Sınırlamalar	• Sıcaklık (+)5 °C 'nin altında ise uygulanmamalıdır. • Solventsizdir, tinerle inceltilemez. • Karıştırma ve uygulama işlemlerini yaparken, cildinizi ve gözlerinizi etkilenmekten korumak için lastik eldiven ve iş gözlüğü kullanınız. • Özellikle gözler dikkatle korunmalıdır. • Gözünüze sıçradığı takdirde, yaklaşık 15 dakika bol su ile yıkayınız ve hemen bir hekime başvurunuz. • Gıda maddelerinden ve çocuklardan uzak tutunuz. • Cilde temas eden yerler ve eller su ve sabun ile yıkanmalıdır. Göz ile temas halinde doktora başvurunuz. • Uygulamadan hemen sonra, henüz sertleşmeden; Aletler; Tekno Tiner ile temizlenmelidir. Sertleşen epoksi harcı sadece mekanik olarak temizlenebilir.

Tablo 3.5. Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri

Genel Bilgiler	
Renk (Reçine ve Sertleştirici Karışımı)	Kırık Beyaz
Karışım Yoğunluğu (A+B)	1,27±0,03 kg/it
Raf Ömrü	Açılmamış orijinal ambalajında 12 Ay
Ambalaj	5 kg set
Uygulama Bilgileri	
Sarfiyat	300 gr/m ² için 1-1,5 kg/m ²
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	(+5°C) - (+35°C)
Karışım Oranı (Ağırlıkça)	3,85 birim A : 1,15 birim B
Kap ömrü	- 30 dakika
Performans Bilgileri	
Betona Yapışma	<! 3,0 N/mm ² (Betondan Kopma)
Eğilme Dayanımı	<! 25 N/mm ²
Basınç Dayanımı	<! 55 N/mm ²
Çekme Dayanımı	<! 20,0Mpa
Tam Mukavemete Ulaşma Süresi	7 gün

3.1.6. Çelik Plaka

Çekicinin deney elemanı üzerine direkt düşürüldüğü önceki çalışmaların pilot deneylerinde çarpma yükünün noktasal olarak deney elemanına aktarıldığı ve noktasal pik yükün deney elemanında delme etkisi meydana getirerek ölçüm almadan deney elemanını göçmeye götürdüğü görülmüştür. Bu sebeple çarpma sırasında deney elemanında meydana gelen içsel etkileri azaltmak ve çarpma yükünün deney elemanı üzerine uniform yayılmasını sağlamak için çelik plaka malzeme betonarme kirişlere vidalarla monte edilmiş ve böylece çelik plaka vasıtasıyla çekiç direkt olarak deney elemanı üzerine düşürülmemiş ve çekicinin her düşme hareketinde aynı noktaya çarpması sağlanarak uygulanan çarpma kuvveti, deney elemanı üzerine uniform olarak yayılmıştır. Deneyde kullanılan çelik plakanın kirişe monte edilmiş hali şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deneyde kullanılan çelik plaka ve kirişe monte edilmiş hali

3.1.7. Serbest Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği

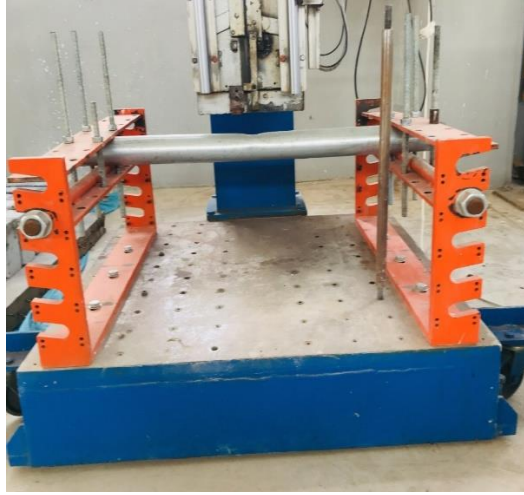
Çarpma etkisi Charpy ve İzod çarpma deneyi, çentik darbe deneyi, serbest ağırlık düşürücü deney aleti gibi yöntemlerle incelenebilmektedir. Bu tez çalışmasında uygulanabilme kolaylığı açısından serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği kullanılmıştır.

Serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğinin çalışma prensibi enerjinin dönüşümü ve korunumu üzerine kuruludur. Çalışmada kullanılan deney düzeneği, belirli bir yükseklikten bırakılan kütlenin sahip olduğu potansiyel enerjinin çarpma anında deney elemanı tarafından absorbe edilen çarpma kinetik enerjisine dönüşmesi yaklaşımı temel alınarak tasarlanan şekil 3.4’te görülen serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğidir.



Şekil 3.4. Serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği

Deney sırasında, serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğinde yer alan çarpma etkilerine karşı dayanıklı çelik malzemeden üretilmiş mesnet bağlantı aparatları (Şekil 3.5) ile deney elemanları sabitlenmiştir. Bu sayede serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğine farklı boyut ve şekillerde deney elemanları yerleştirilebilmiş ve deney elemanlarının deney esnasında, çarpma etkisiyle dönmeleri ve yanal ötelenmeleri engellenmiştir.

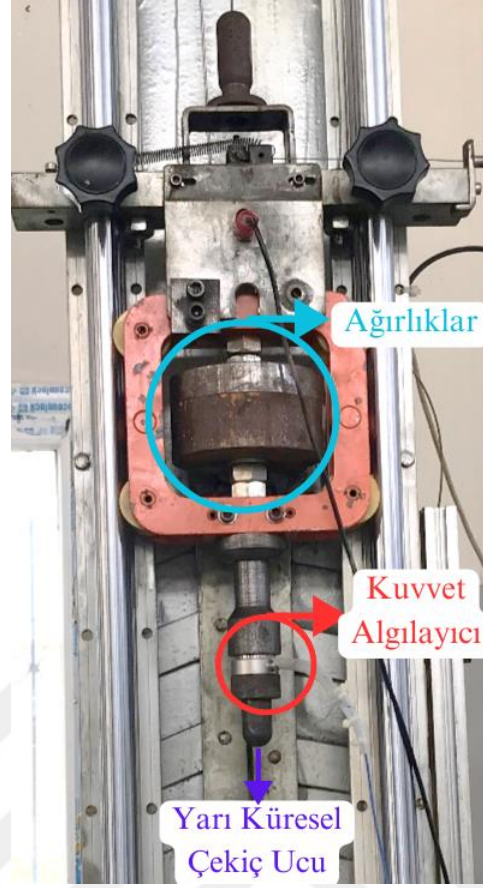


Şekil 3.5. Mesnet bağlantı aparatları

Serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğinde serbest düşmeye bırakılan kütle (ağırlık) çekiç olarak adlandırılır. Deney düzeneği çekicin ağırlığının değiştirilmesine olanak vererek farklı ağırlıklar kullanılarak farklı deneyler yapılabilmektedir. Çekicin iç kısımda bulunan vidalama sistemi, çekiçe ilave ağırlık takıldığında vidalama sistemi sıkılarak çarpma sırasında ağırlıkların yer aldığı çekicin hareket etmesini önlenmektedir.

Deneyisel çalışmada çarpma kuvveti çekiç üzerinden ölçülmüştür. Kuvvet algılayıcı çekice monte edilerek, sabitlenmiş ve böylece betonarme kirişlerin maruz kaldığı çarpma kuvveti değişiminin ölçülmesi sağlanmıştır. Çekiç toplam kütlesi çelik ağırlıklar kullanılarak deney düzeneği için maksimum toplam kütle olan 12 kg olarak ayarlanmıştır. Deney çalışması boyunca çekiç kütlesi sabit tutulmuş, iki farklı yükseklikten iki farklı çarpma enerjisi elde edilmiştir. Betonarme kiriş ile temas eden çekiç ucu yarı küresel şeklindedir (Şekil 3.6).

Serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği, çekicin yüksekliğinin de değiştirilmesine olanak vermektedir. Böylece çekiç farklı yüksekliklerden düşürülerek deney elemanları üzerine etkiyen çarpma kinetik enerji ve çarpma momentumu farklılıklarının deformasyonun etkilerinin inceleyebilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.6. Çekiç, çekiç ağırlıkları, kuvvet algılayıcı, yarı küresel çekiç ucu

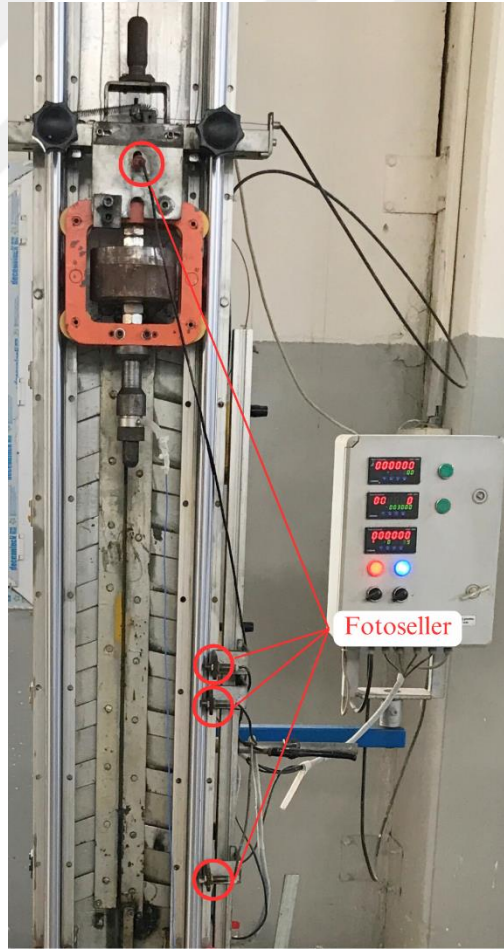
Çarpma deneyi esnasında meydana gelebilecek sürtünmeleri minimum seviyeye getirmek adına çekicin sürtünen yüzeyleri azaltılmış ve dört köşesine darbelere, yüklere ve yorulmalara karşı direnci iyi olan yüksek aşınma mukavemetine sahip kestamit malzemesi kullanılarak yapılan tekerleklerle yatağına oturtulmuş ve iki tarafından millerle bağlanmıştır. Miller çekicin aynı ekseninde serbest düşme yapmasını sağlamıştır. Çekiç, deney elemanlarına monte edilen çelik plak sayesinde deney elemanı üzerine direkt düşürülmemiştir.

3.1.8. Optik Fotoseller

Genellikle dokunma hareketi olmadan hareketleri algılayan fotoseller, makinelerde ve fabrikalarda çeşitli ürünleri güvenli olarak algılama ve dokunmasız makine hareketlerini algılama yeteneğine sahiptirler. Yüksek algılama özellikleri ve performansları ve giderek küçülen tasarımları nedeniyle optik fotoseller birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedir.

Büyük indüktif ve kapasitif fotosellerde hedef cisim ile fotosel arasındaki en uzun mesafe 60 ila 100 mm arasında değişirken, en küçük boyutlu olan optik fotoseller bile birkaç metrelik bir alanı kontrol edebilmektedir. Kullanım alanlarına göre cisimden karşılıklı, yansımali ve yansıtıcı fotoseller olmak üzere üç tip fotosel bulunmaktadır.

Deneyisel çalışmada, cisimden yansımali fotoseller kullanılmıştır ve şekil 3.7'de gösterildiği gibi, deney düzeneğine monte edilmiştir. Diğer fotosel türlerine göre şeffaf cisimlerin daha iyi algılanabilmesi, monte edilecek tek fotosel olması, yanlış ayarlamalar ve yansıtıcı kirlenme olmaması bu tür fotosellerin en önemli avantajlarıdır. Serbest ağırlık düşme deney düzeneğinde kullanılan fotoseller, serbest düşmeye başlayan çekicin harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen süreyi ölçmekte ve istenilen yüksekliğe ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.7. Optik fotoseller

Bir tanesi hareketli çekiç üzerinde ve yükseklikleri belirlenmiş 3 tane fotosel olmak üzere toplam 4 tane fotosel bulunmaktadır. Çekicin üstünde bulunan fotosel, çekicin harekete başladığı zamanı; kızağın en üstünde bulunan fotosel, çekicin geçtiği andaki zaman değerini; en altta yer alan fotosel ise, çekicin harekete başladığı andan, çarpma anına kadar geçen zamanı ölçmektedir; kızağın ortasındaki fotosel ise çekicin sıçrama hareketini önlemektedir. Fotoseller sayesinde serbest düşme hareketi sırasında, sürtünme veya diğer etkilerden dolayı oluşan kayıplar ve çekicin zamana bağlı hareketinin belirlenmesi sağlanmaktadır.

3.1.9. Ölçüm Aygıtları

Farklı yerleşime sahip CFRP'nin betonarme kirişler üzerindeki çarpma etkisini anlamak için yapılan deneylerde ivme ölçümü için piezoelektrik ivmeölçerler, kirişler üzerine düşürülen ağırlığın kirişlerde oluşturduğu çarpma yükü büyüklüğü için kuvvet algılayıcı ve deplasman ölçümü için TDG firmasının LVDT cihazı kullanılmıştır.

3.1.9.1. İvmeölçer

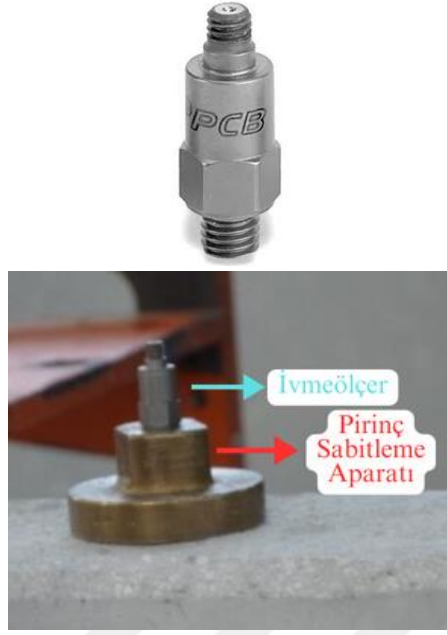
Mutlak hareket, titreşim ve şok ölçümlerinde kullanılan ivmeölçerler, büyüklüğü ve doğrultusu belli, bir vektörel büyüklük olan ivmeyi ölçen cihazlardır ve ölçüm tekniklerine bağlı olarak piezoelektrik ve kapasitif ivmeölçerler olarak ikiye ayrılırlar.

Piezoelektrik ivmeölçerler, yüksek empedanslı yük çıkışını düşük empedanslı voltaj sinyaline dönüştürerek analiz veya kayıt yapmak için kullanılmaktadır. Bu ivmeölçerler yüksek frekans değerlerini ölçebilmeleri, sarsıntı ölçümlerine uygun olmaları ve gürültüden etkilenmemeleri ile diğer ivmeölçerlere göre daha avantajlıdırlar. ICP sensörleri, sinyalleri bozmadan koaksiyel ya da şerit kablolar aracılığıyla çalışır ve ayrı bir sabit akım kaynağından güç alırlar. Paslanmaz çelik kapaktan oluşan sensörler darbe ölçümleri yapabilen bir sensöre dönüşmekte ve yüksek frekanslı çınlamayı azaltmak için poliimid film bant kapak yüzeyini kaplamaktadır. PCB'nin ICP® sensörleri, metalden metale çarpma, yüksek sıcaklık ve çarpma deneylerinde kullanmak için uygundur.

Deneyisel çalışmada, şekil 3.8’de görülen PCB Group firmasına ait piezoelektrik ICP tipi ivmeölçerlerden iki adet Model 350B04 kullanılmış olup teknik bilgileri tablo 3.6’da belirtilmiştir. İvmeölçerlerin takılması için 6 mm çapında vida kullanılmıştır.

Tablo 3.6. ICP 350B04 ivmeölçer teknik özellikleri

Özellik	Değer
Performans	
Hassasiyet (± 30 %)	0,10 mV/(m/s ²)
Ölçüm Aralığı	± 49000 m/s ² pk
Frekans Aralığı (± 1 dB)	0,4 - 10000 Hz
Frekans Aralığı (-3 dB)	0,2 - 25000 Hz
Elektronik Filtre Köşe Frekansı (-3 dB)	13 kHz
Mekanik Filtre Rezonans Frekansı	23 kHz
Rezonans Frekansı	≥ 100 kHz
Geniş Bant Çözünürlüğü	0,20 m/s ² rms
Düzensizlik	$\% \leq 2,0$
Çaprazlama Hassasiyet	$\% \leq 7$
Çevresel	
Aşırı Yük Sınırı	$\pm 490,000$ m/s ² pk
Çalışma Sıcaklığı	-18...+66 °C
Depolama Sıcaklığı	-40...+93 °C
Taban Gerilme Hassasiyeti	0,02 (m/s ²)/ $\mu\epsilon$
Elektriksel	
Uyarma Voltajı	20 - 30 VDC
Sabit Akım Uyarma	2 - 20 mA
Çıkış Empedansı	≤ 200 Ohm
Çıkış Ön Gerilim Voltajı	8 - 14 VDC
Boşaltım zamanı	1,0 – 2,0 saniye
Hazır Olma Zamanı	<10 saniye
Fiziksel	
Algılama Elemanı	Seramik
Algılama Geometrisi	Kesme
Koruyucu Malzeme	Titanyum
Kapama	Hermetik
Boyut (Altıgen x Boy)	9,5 mm x 25,9 mm
Ağırlık	4,5 gr
Elektrik Bağlantısı	10- 32 Koaksiyal soket
Elektrik Bağlantı Pozisyonu	Üst
Bağlantı Yivi	1/4- 28 Erkek tipte



Şekil 3.8. ICP 350B04 ivmeölçer ve montaj şekli

3.1.9.2. Kuvvet Algılayıcı

Dinamik bir algılayıcı olan kuvars kuvvet algılayıcıları, pres ve germe deneylerinde numunelerdeki gerilmeleri ve darbe yüklerini ölçmektedir. Araştırma ve geliştirmede titreşim, basınç, kuvvet, akustik, yük ve tekrarlanan deneylerde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Dinamik sıkıştırma, itici güç, tepki, gerilim ve darbe kuvveti ölçümleri, bu dinamik algılayıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Mekanik empedans, düşürme, penetrasyon ve mukavemet deneyleri gibi çarpma testlerinde kuvvet algılayıcıları kullanılmaktadır. Numunedeki küçük kuvvet dalgalanmalarını algılayabildiği gibi küçük statik yüklemelerde oluşan büyük dalgalanmaları da ölçebilmektedir. Yüksek rijitliğe sahip olmaları nedeniyle uzun ömürlü ve dayanıklıdır.

Dinamik basınç ölçümleri için tasarlanmış olan halka kuvars kuvvet algılayıcıları halka şeklinde olduğu için ismini şeklinden almaktadır. Platform, duvar, makine araçlarında sıkıştırılıp bağlantı içine entegre olabilmektedirler. Bu tip kuvvet algılayıcıları, soğuk şekil verme, talaşlı imalat işlemleri sırasında ortaya çıkan dinamik basma, çekme gerilme ölçmeleri için uygun olup malzeme ve dayanım alanında yapılan birçok testte kullanılabilmektedirler.

Deney aşamasında, şekil 3.9’da görülen PCB Group firmasına ait PCB 205C Model ICP türü halka kuvvet sensörü kullanılmış olup teknik bilgileri tablo 3.7’de belirtilmiştir. Deneysel çalışmada çarpma kuvveti çekiç üzerinden ölçülmüştür. Kuvvet algılayıcı çekice monte edilerek (Şekil 3.6), sabitlenmiş ve böylece betonarme kirişlerin maruz kaldığı çarpma kuvveti değişiminin ölçülmesi sağlanmıştır.

Tablo 3.7. ICP 205C kuvvet algılayıcı modeli teknik özellikleri

Özellik	Değer
Performans	
Hassasiyet ($\pm 30\%$)	18,0 mV/kN
Ölçüm Aralığı	266,9 kN
Maksimum Statik Kuvvet	311,4 kN
Geniş Bant Çözünürlüğü	4,45 N-rms
Düşük Frekans Tepkisi	0,0003 Hz
Üst Frekans Limiti	50 kHz
Düzensizlik	$\% \leq 1,5$ FS
Çevresel	
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-54...+121 °C
Hassasiyet Sıcaklık Katsayısı	$\leq 0,18\%$ /°C
Elektriksel	
Boşaltım zamanı (oda sıcaklığında)	≥ 2000 saniye
Uyarma Voltajı	20 - 30 VDC
Sabit Akım Uyarma	2 - 20 mA
Çıkış Empedansı	≤ 100 Ohm
Çıkış Ön Gerilim Voltajı	8 - 14 VDC
Spektral Gürültü (1 Hz)	0,44 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spektral Gürültü (10 Hz)	0,14 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spektral Gürültü (100 Hz)	0,032 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spektral Gürültü (1 kHz)	0,00857 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Çıkış Polaritesi	Pozitif
Fiziksel	
Ön Yükleme	53,379 kN
Sertlik	7 kN/ μm
Boyut (Çap x Yükseklik x Cıvata Çapı x Algılama Yüzeyi)	40,13 mm x 12,95 mm x 20 mm x 34,93 mm
Boyut (ID) (Delik Çapı)	21,08 mm
Boyut (ID) (Sensör)	40,13 mm
Ağırlık	40,13 gr
Malzeme	Paslanmaz çelik
Kapama	Hermetik
Elektrik Bağlantısı	10- 32 Koaksiyal soket
Elektrik Bağlantı Pozisyonu	Yan



Şekil 3.9. ICP 205C kuvvet algılayıcı

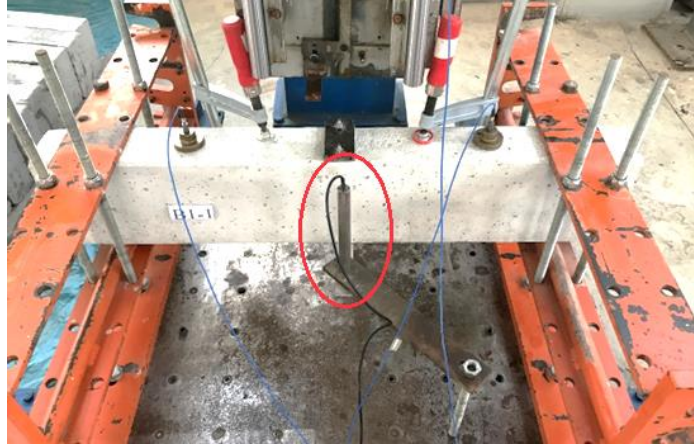
3.1.9.3. Doğrusal Değişkenli Fark Transformatörü

Doğrusal değişkenli fark transformatörü (LVDT) diğer bir deyişle yer değişimi algılayıcısı nesnenin doğrusal hareketini, ona karşılık gelen bir elektrik sinyaline dönüştüren elektromanyetik dönüştürücüdür ve yer değiştirmeyi ölçmek için kullanılmaktadır.

LVDT bir çift ikincil sarım ve ikincil sarımlar arasına sıkıştırılmış birincil sarımdan oluşmaktadır. LVDT'nin hareketli elemanı olan çekirdek geçirgenliği yüksek manyetik malzemeden yapılmıştır.

Deneyisel çalışmada CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma yükü etkisi altında oluşan deplasmanlar TDG firmasının LVDT cihazı ile ölçülmüştür. LVDT, betonarme kirişe serbest ağırlık düşürücü deney çekici düşürüldüğünde hareket edebilen bir mekanizmaya sahip olduğu için kirişte meydana gelen deplasmanları kaydedebilmektedir.

Çarpma kuvveti etkisi altında oluşan deplasmanı ölçmek amacıyla her bir deney elemanının orta alt bölgesine mengeneler yardımıyla uzun plaka yerleştirildikten sonra plakanın üzerine LVDT şekil 3.10'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Yer değişimi algılayıcı (LVDT) yerleşimi

3.1.10. Veri Toplama Aygıtları

3.1.10.1. DEWE-43 A modeli

Ağırlık düşürücü deney düzeneğine bağlanan ivmeölçerden ve kuvvet algılayıcısından zamana göre alınan verilerin özel bir bilgisayar yazılımı ile sayısallaştırarak bilgisayar ortamına aktırılması gerekmektedir. Veri toplama aygıtları deneylerde kullanılan ölçüm aygıtlarında ölçülen değerleri alarak bilgisayar verilerine dönüştürerek bilgisayar ortamına aktarmaktadır.

Deneyisel çalışma sırasında yapılan deneyin dinamik yükleme olması nedeniyle, USB bağlantı aparatının olması ile farklı ortamlarda da deney yapılabilmesine olanak sağladığı için şekil 3.11’de görülen DEWESoft firmasının üretmiş olduğu DEWE-43 A modeli kullanılmıştır ve teknik bilgileri tablo 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.11. DEWE-43A veri toplama aygıtı

Tablo 3.8. DEWE-43A teknik özellikleri

Analog Girişler	
Kanal sayısı	8
Girişler	Gerilim, tam köprü
ADC tipi	Kenar yumuşatma filtreli 24 bit sigma-delta
Örnekleme hızı	200 kHz/ch
Giriş tipi	Diferansiyel
Gerilim Modu	
Aralıklar	$\pm 10V$
DC Hassasiyet	
1 V Menzili	% 0,05 - + 0,2 mV
100 mV Menzili	% 0,05 - + 0,1 mV
10 mV Menzili	% 0,05 - + 0,1 mV
Dinamik Aralık	107 dB@ $\pm 10 V$
Gürültü Sinyali	
0,1 kS/s ile 51,2 kS/s	105 dB
51,2 kS/s ile 102,4 kS/s	100 dB
102,4 kS/s ile 200 kS/s	75 dB
Drift kazan	Tipik 10 ppm/K, maks. 40 ppm/K
Ofset Kayması	Tipik 2 $\mu V/K$ + 5 ppm aralık/K, maksimum 5 $\mu V/K$ + 10 ppm aralık/K
Aşamalı Kanal Uyumsuzluğu	<0,1° @ 5 kHz
Faz uyumsuzluğu	0,6° @ 1 kHz
Giriş Empedansı	20M Ω 47pF (diferansiyel) 10M Ω 33pF (ortak mod)
Maksimum ortak mod voltajı	$\pm 13V$
Aşırı gerilim koruması	$\pm 70 V$ giriş koruması
Uyarma Gerilimi	
Uyarma voltajı	$\pm 5 V \pm \% 0,1$ köprü sensör beslemesi, 70 mA sınırı
Uyarma Kayması	± 50 ppm/K $\pm 100 \mu V/K$
Sensör beslemesi	12 V, 350 mA (Şunlar arasında paylaşılır: 8xAl, 8xCounters, 2xCAN)
Sayaç/Dijital girişler	
Kanal Sayısı	8 sayaç / 24 dijital giriş, tamamen analog ile senkronize
Modlar	Sayma, dalga biçimi zamanlaması, kodlayıcı, tako, dişli sensörü
Sayaç zaman tabanı	102,4 MHz
Zaman tabanı doğruluğu	Tipik: Dakikada 5 sayfa, Maksimum: Dakikada 20 sayfa
Maks. Bant genişliği	10 MHz
Giriş Filtresi	500 ns, 1 μs , 2 μs , 4 μs , 5 μs ve 7,5 μs
Sayaç çözünürlüğü	32 bit
Giriş Uyumluluğu, Seviye	TTL/CMOS (Düşük: <0,8 V, Yüksek >2 V)
Giriş sonlandırma, empedans	+3,3 V'a kadar 100 k Ω çekme
Giriş Koruması	$\pm 30 V$ sürekli
Sensör beslemesi	+5 V, +12 V

Tablo 3.8. DEWE-43A teknik özellikleri (devam)

CAN veri yolu	
Bağlantı noktası sayısı	2
Arayüz türü	CAN 2.0B, 1 MBit/sn'ye kadar
Özel uygulamalar	CCP, OBDII, J1939, CAN çıkışı
Galvanik izolasyon	Yalıtılmış
Veri yolu pin arıza koruması	$\pm 36V$
ESD koruması	8 kV
Arayüzler ve seçenekler	
USB	USB-B mini, USB 2.0 arayüzü
Senkronizasyon	2x SIRIUS® SYNC
Maks. Senkronizasyon kablosu uzunluğu	100 m (Master/Slave), 200 m (IRIG)
Güç	
Güç kaynağı	9-36V DC
Galvanik izolasyon	İZO-GÜÇ İzoleli
Sensör güç kaynağı	Toplam 10W'a kadar: 12 V, toplam limit 350 mA (Şunlar arasında paylaşılır: 8xAI, 8xCounters, 2xCAN) 5 V, toplam limit 700 mA (Şunlar arasında paylaşılır: 8xCounters, 2xCAN) +/-5 V Hariç, Ch. 70 mA sınırı
Güç tüketimi	6 W, maksimum 18 W
Çevresel	
Çalışma sıcaklığı	-20 ile 60 °C arası
Depolama sıcaklığı	-40 ile +85 °C arası
Nem	50 °C'de % 5 ila 95 yoğunlaşmayan bağıl nem
IP derecelendirme	IP50
Fiziksel	
Boyutlar (en - boy - genişlik)	225x80x45 mm
Ağırlık	0,720 kg

3.1.10.2. TESTBOX 2010

TESTBOX 2010 dinamik veri toplama cihazı, ivmeölçer (MEMS, Kuvvetle Dengelenmiş, ICP, MET), açölçer, load cell (yük hücresi), strain gauge (gerinim ölçer), deplasman ölçer, termokupl gibi voltaj çıkışı veren sensörlerden yüksek hızlı ve yüksek çözünürlüklü olarak sinyal işlemlerini yapabilmektedir ve teknik bilgileri tablo 3.9'da verilmiştir. 24 bit ölçüm çözünürlüğüne sahip eş zamanlı 100Hz'den 2kHz'e kadar ayarlanabilir örnekleme yapabilmektedir. Analog sinyal işleme katında Anti-Aliasing filtre bulunmaktadır. Ayrıca dijital FIR filtreye sahiptir.

TESTBOX 2010 dinamik veri toplama cihazının uygulama alanları yapı sağlığı izleme, çevresel titreşim/mekaniksel titreşim, sarsma tablası testleri, operasyonel modal analiz, sismik izleme, jeolojik – jeofizik araştırmalar, mekanik, maden ve yağ mühendisliğidir. Geniş sensör çeşitliliği ve hassas ölçümler için gerekli olan tüm dahili işlevselliği sunmaktadır.

Deneyisel çalışmada deplasman ölçümü için TDG firmasının üretmiş olduğu şekil 3.12’de gösterilen TESTBOX 2010 cihazı ve Testlab network yazılımı kullanılmıştır.

Tablo 3.9. TESTBOX 2010 veri toplayıcı özellikleri

Ölçüm Çözünürlüğü:	24 Bit
İletişim Ara Yüzü:	Ethernet
Kanal Sayısı:	4/8/16 kanal tek kasa
Kanal Ölçümü:	Single Ended / Diferansiyel (Yüksek performans)
Senkronizasyon:	Gerçek eş zamanlı
Veri Toplama Hızı:	4 ksps (4000 örnek/s) (4 kanallı versiyonlarda opsiyonel olarak çıkartılabilir.) 2 ksps (2000 örnek/s) (Standart) Kanal – Kanal sayısından bağımsızdır.
Filtreleme:	Anti-Aliasing / Analog Alçak Geçiren / Dijital FIR
Dinamik Giriş Aralığı:	140dB’e kadar.
Ölçüm Aralığı (Programlanabilir):	± 15 V Max. (1/8 Kazanç seviyesinde) ± 15 mV Max. (128 Kazanç seviyesinde)
Kanal Kazançları:	1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 kat-her kanal bağımsız ayarlanabilir.
Sensör Besleme Gerilimleri:	+5V, +12V, -12V
Güç Girişi:	220VAC Max. 40W / 12VDC Max. 40W
Sensör Konektörü:	9 pin yuvarlak IP67 bayonet push-pull konektör
Çalışma Sıcaklığı:	10°C-35°C - Önerilen 25°C
Saklama Sıcaklığı:	0°C-50 °C
Kutu ve Boyutlar:	Askeri çanta (Nato Cage Code A7423) / Rack 12”L x10.625” W x 5.6875” H-4 Kanallı versiyon Çanta Tipi 16.125” L x13.375” W x 8.0625” H-8 ve 16 Kanallı versiyon Çanta Tipi 19" Lx3.47" Wx2.6" H-8 ve 16 Kanallı Rack Tipi
Dahili Hafıza:	USB bellek uyumluluğu- 128 GB’a kadar arttırılabilir.
Dijital Altyapı:	ARM Cortex mikrodenetleyici, Gömülü Linux işletim sistemi



Şekil 3.12. TESTBOX 2010 cihazı

3.1.11. Ölçüm Cihazları Bağlantı Kabloları

Deneylerde ölçüm cihazlarından alınan verilerin belirli bir mesafede bulunan veri toplayıcısına, herhangi bir veri kaybı olmadan güvenle iletilmesini ölçüm cihazı ve veri toplayıcısına uygun uçları olan bağlantı kabloları sağlamaktadır. Deneysel çalışmada şekil 3.13'te gösterilen, özellikleri tablo 3.10'da verilen PCB Group firması tarafından üretilen 002C50 model düşük gürültülü koaksiyel kablolar kullanılmıştır. Bu kabloların özelliği radya frekanslarında kullanılan bir kablo türü olan koaksiyel kablodur.

Tablo 3.10. PCB 002C50 model kablo özellikleri

İletken sayısı	1
Kablo tipi	Koaksiyel
Sıcaklık aralığı	-90 ile +204 °C
Empedans (± 2 Ohm)	50 Ohm
Kapasitans (iletken den iletken e (21 °C))	95 pF/m
Kablo dış çapı	1,9 mm
Ağırlık	9,23 gr/m



Şekil 3.13. PCB 002C50 model kabloları

3.2. Deney Elemanları

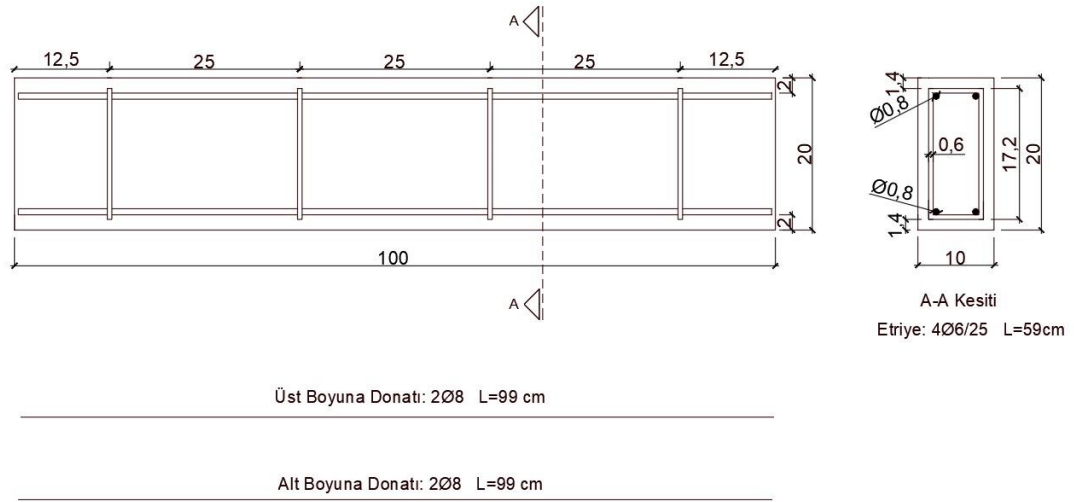
Deneyisel çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma davranışının incelenmesi amacıyla 2 tanesi güçlendirilmemiş deney elemanı olmak üzere toplamda 14 adet 1.000x100x200 mm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Bütün kirişlerde, 8 mm 4 adet boyuna donatı ile 6 mm donatı çeliğinin 25 mm aralıklarla yerleştirilmesiyle elde edilen enine donatılar kullanılmıştır. Üretilen tüm betonarme kirişlerin; boyutları, beton sınıfı, kullanılan enine ve boyuna donatı çeliği boyut ve miktarları sabit tutulmuştur. Aynı özelliklerle üretilen betonarme kiriş elemanları, farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile 1 ve 1,5 m olmak üzere iki farklı yükseklikten aynı çekiş kütlesi etkisi altında test edilmiştir. Deney elemanlarında çarpma etkisi göçme meydana gelene kadar uygulanmış, davranışlar gözlenmiş ve ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

3.2.1. Kiriş Deney Elemanlarının Hazırlanması

3.2.1.1. Kiriş Deney Elemanlarının Kesit Özellikleri

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı laboratuvarında, serbest ağırlık düşürme deney düzeneği dikkate alınarak deneye tabi tutulacak betonarme kiriş elemanlarının geometrik ebatları planlanıp tasarlanmıştır.

Deneyisel çalışmada, kesme dayanımı zayıf 1.000 mm boyunda ve 100×200 mm kesitinde dikdörtgen kesitli betonarme kiriş tasarlanmıştır. Betonarme kiriş deney elemanları, kiriş alt ve üst bölgesinde 2 şer adet Ø8 çapında boyuna donatı ve etriyeler arası mesafe 25 cm olacak şekilde 4 adet Ø6 çapında etriye kullanılması planlanmıştır. Deneyisel çalışmada kullanılan betonarme kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Betonarme kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı

3.2.1.2. Kiriş Deney Elemanı Kalıplarının Üretimi

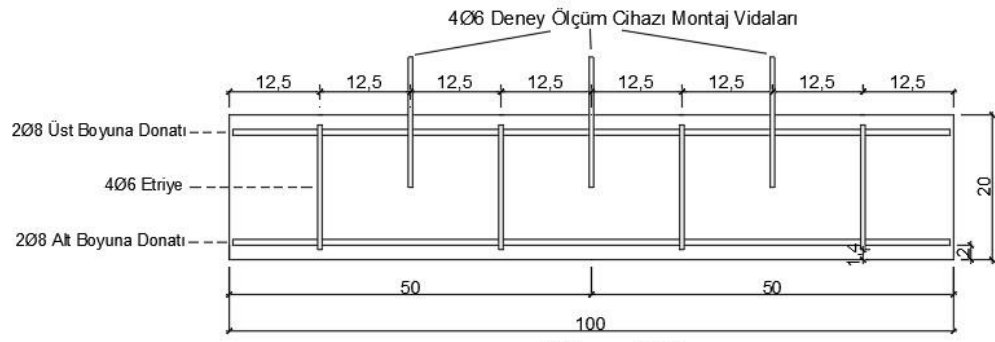
Betonarme kiriş deney elemanlarının üretilmesinde kullanılmak üzere, 3 adet 18 mm x 1.250 mm x 2.500 mm boyutlarındaki plywood malzeme kullanılmıştır. Kiriş deney elemanlarını temiz ve pürüzsüz bir şekilde kalıplardan çıkarabilmek için kullanılan plywood panel, deney elemanlarının ön, arka, alt ve yan yüzeyleri için plywood kalıp malzemesi uygun ölçülerde laser kesim ile kesilmiştir.

Kesilen parçalar birbirlerine vidalama ile birleştirilerek kiriş deney elemanı kalıbı haline getirilmiştir. Tek seferde beton dökümü yapılabilecek şekilde toplam 7 adet ikişerli kiriş kalıp imalatı yapılmıştır. Üretilen kalıplar şekil 3.15’te gösterilmiştir.

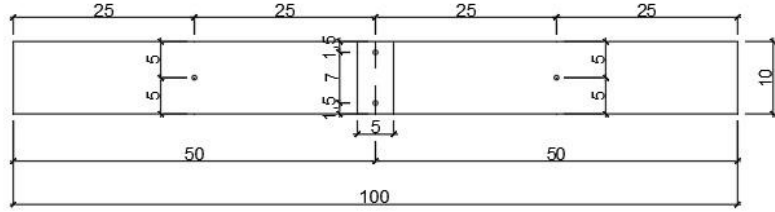


Şekil 3.15. Kiriş deney elemanları için üretilen kalıplar

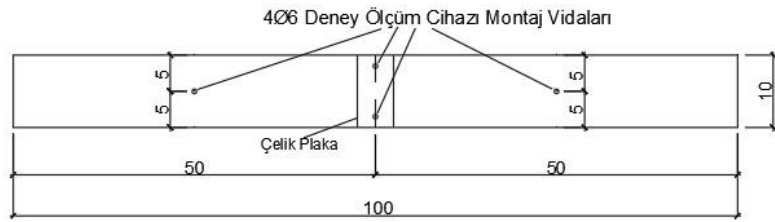
Çarpma deneyi sırasında ivmeölçerlerin yerleştirilecekleri bölgelere (sağ ve sol) ve çekicinin çarptığı bölge olan kirişin orta bölgesine yerleştirilecek çelik plakanın sabitlenmesi için 6mm deney ölçüm cihazı montaj vidaları kullanılmış olup vidaların deney elemanlarına yerleştirilecekleri alanlarda beton dökümü sonrasında sabit durmalarını sağlamak için kalıpların uygun bölgelerine vidalama ile ekleme yapılmıştır. Vidaların yerleşim çizimi ve kalıplardaki görüntüsü şekil 3.16'da gösterilmiştir. Aynı şablon tüm deney elemanları için kullanılmış ve bütün deney elemanlarında ölçümlerin aynı noktadan alınması sağlanmıştır.



a. Kiriş yan görünüş



b. Kiriş üstten görünüş-1



c. Kiriş üstten görünüş-2



d.

Şekil 3.16. Deney elemanı ve deney ölçüm cihazı montaj vidaları yerleşim görünüşü, a. yan görünüş, b. üst görünüş-1, c. üst görünüş-2, d. deney ölçüm cihazı montaj vidalarının kalıplardaki görünüşü

3.2.1.3. Donatı Hazırlama

Betonarme kirişlerin her birinde üstte ve altta 2 şer adet olmak üzere toplamda 4 adet boyuna donatı ve 6 mm çapında 25 cm aralıklarla nervürsüz (düz) enine donatı kullanılmıştır. Etriye aralığının 25 cm olması uygulamadaki uygunsuz durumu temsil etmektedir. Kirişlerde meydana gelebilecek korozyonu engellemek amacıyla deney elemanlarının çekme yüzeyine 20 mm pas payı aparatları boyuna donatılara takılacak şekilde kullanılmıştır.

3.2.1.4. Kalıplarının Temizlenmesi ve Yağlanması

Beton dökümü öncesinde, kiriş deney elemanı kalıpları ile birlikte 7 ve 28 günlük beton basınç deneyleri için 150x150x150 mm boyutlarında, 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet beton basınç küp numune kalıbı hazır bulundurulmuştur.

Kalıplarda bulunan toz, temiz bir bez yardımı ile temizlendikten sonra, deney elemanlarının ve küp numunelerinin kalıplardan daha rahat çıkarılabilmesi ve kalıplardan çıkarılırken kalıplara yapışmalarını önlemek için kiriş deney elemanı kalıpları ve küp numune kalıplarının iç yüzeyleri beton döküm işlemi öncesinde kalıp yağı ile yağlanmıştır.

3.2.1.5. Donatıların Kalıplara Yerleştirilmesi

Yağlama işleminden sonra hazırlanan kiriş donatıları kalıplara yerleştirilmiş ve beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Kiriş kalıplarına donatı yerleşimi şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Beton dökümü öncesi kalıp ve donatı görünümü

3.2.1.6. Beton Döküm Aşaması

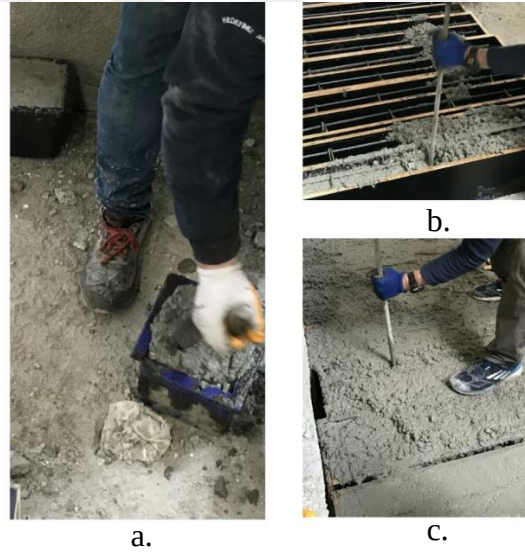
Kalıplar beton dökümüne hazır hale getirildikten sonra beton üretim işlemine geçilmiş ve C16 beton kalitesindeki beton üretimi Er Prefabrik Yapı Elemanları Fabrikasındaki mikserde gerçekleştirilmiştir.

Beton mikserinde hazırlanan beton, el arabası yardımı ile kiriş deney elemanı kalıpları ve beton basınç küp numune kalıplarının olduğu yere taşınmadan önce el arabası temizleme işlemi yapılmıştır. El arabası ve kürek yardımıyla 14 adet kiriş deney elemanı ve 6 adet beton basınç deney küp numunesi için beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılacak olan her bir kirişin beton kriterlerinin özdeş olması amacıyla beton döküm işlemi tek seferde kısa bir zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Beton döküm işlemi şekil 3.18’de gösterilmiştir



Şekil 3.18. Beton döküm işlemi

Beton dökümü işlemi sonrasında kalıpların içerisindeki beton homojenliği sağlanması ve beton içinde oluşan boşlukların en aza indirilmesi amacı ile kalıpların farklı noktalarında segregasyona izin verilmeden çelik çubuk ile şişleme yapılarak sıkıştırma işlemi uygulanmış, betonun düzgün yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Çelik çubuk ile şişleme sıkıştırma işlemi: a. küp numunede, b. ve c. kiriş deney elemanlarında

Şişlemeden sonra deney elemanlarının yüzeylerinin düzgün olması için her bir deney elemanının üst bölgesine mala yardımı ile beton yüzey düzeltme işlemi olan mastarlama işlemi uygulanmıştır. Sıkıştırma ve mastarlama işlemleri tamamlanan deney elemanları, kalıbın dış kenarlarına, sıkıştırma çubuğu darbelerinden geriye kalan boşluklar doluncaya kadar tokmak ile vurularak betonun kalıplara daha iyi yerleşimi sağlanmıştır. Mala ile mastarlama ve tokmaklama işlemleri şekil 3.20’de verilmiştir.



a.



b.



c.

Şekil 3.20. a. Tokmaktama işlemi, b. ve c. mala ile yüzey düzeltme işlemi

3.2.1.7. Deney Ölçüm Cihazı Montaj Vidalarının Yerleştirilmesi

Beton dökümü sonrası çarpma etkisinin uniform yayılmasını sağlamak amacıyla deney kiriş deney elemanlarının tam ortasına çelik plaka konulabilmesi ve konulan çelik plakayı sıkıştırmak için beton taze haldeyken 6 mm çapında çelik plaka montaj vidaları dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Çelik plakanın her iki tarafına da ivmeölçer cihazlarını bağlamak için 6 mm çapındaki vidalar aynı şekilde yerleştirilmiştir. Beton döküm ve vida yerleştirme işlemi tamamlanmış 14 adet betonarme kiriş deney elemanı şekil 3.21’de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Deney ölçüm cihazı montaj vidaları yerleştirilmiş deney elemanları

3.2.1.8. Deney Elemanlarının Kalıplardan Çıkarılması

Kiriş deney elemanlarına beton dökümü sonrasında günlük sulama kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Betonun yüzeyindeki suyun buharlaşması sonucunda çimentonun hidratasyonu için gerekli suyun tekrar betona verilmesi işlemi “Kür İşlemi” olarak adlandırılır. Bu işlem için betonun su kaybı önlenabilir ya da yüzeyi ıslatılabilir. Kiriş deney elemanları 7 gün süresince kür işlemine tabi tutulmuştur. Kiriş deney elemanları yeterli sertliğe geldikten sonra kalıp yüzeylerindeki vidalar 7. gün söküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.22). Kiriş deney elemanları kalıp sökümü sonrasında direk ısıya ve güneş ışığına maruz kalmayacak şekilde gölge bir yerde muhafaza edilmiştir.



a.



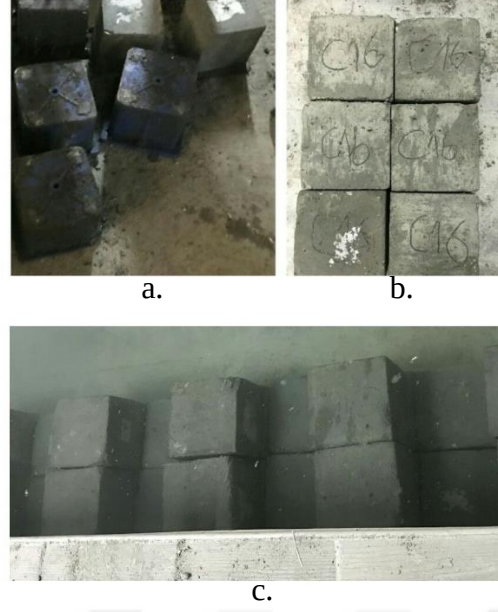
b.



c.

Şekil 3.22. a. ve b. Kalıp söküm işlemi, c. kalıp sökümü tamamlanmış hali

Beton döküm işleminden 24 saat sonra beton basınç deneyi küp numuneler kalıplardan çıkartılıp kür havuzuna konulmuş ve kırım yapılacak güne kadar kür havuzunda bekletilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Basınç deneyi beton küp numunelerinin a. kalıplarından çıkarılması, b. kalıptan çıkarılmış halleri, c. kür havuzundaki halleri

3.2.1.9. Basınç Dayanım Deneyleri

Küp numunelerinden 3 adedine 7 günlük, 3 adedine 28 günlük kür işlemi uygulandıktan sonra basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Basınç dayanım deneyi

Eksenel basınç altında test edilen 6 adet küp numunesine ait 7. ve 28. gündeki ortalama beton basınç dayanımları sırasıyla 15,15 MPa ve 21,05 MPa olarak ölçülmüş ve test sonuçları tablo 3.11’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Beton basınç dayanım değerleri

Deney Elemanı	Kırım Günü	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
C1	7 Günlük	15,39	15,15
C2		14,91	
C3		15,16	
C4	28 Günlük	21,63	21,05
C5		20,64	
C6		20,89	

3.2.2. Kiriş Deney Elemanlarının CFRP İle Güçlendirilmesi

Deney çalışmasında, 12 adet betonarme kiriş üzerinde CFRP ile farklı sarım yöntemi ile güçlendirme çalışması yapılmıştır. CFRP şeritler ve kumaşın yapıştırılmasında epoksi reçine kullanılmıştır.

3.2.2.1. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi

Çarpma deneyi 1m ve 1,5m olmak üzere 2 farklı yükseklikten gerçekleştirildiği için deney elemanları öncelikle 2 gruba ayrılmıştır. Deney elemanları isimlendirilirken özel karakterler kullanılmamıştır. Etiketdeki B: Beam (kiriş), ilk rakam 1: 1 m düşme yüksekliği uygulanan grup, ilk rakam 2: 1,5 m düşme yüksekliği uygulanan grup, - 'den sonraki rakamlar: güçlendirilmemiş ve CFRP yerleşim yerine göre 1'den 7'ye kadar sırayla verilmiştir.

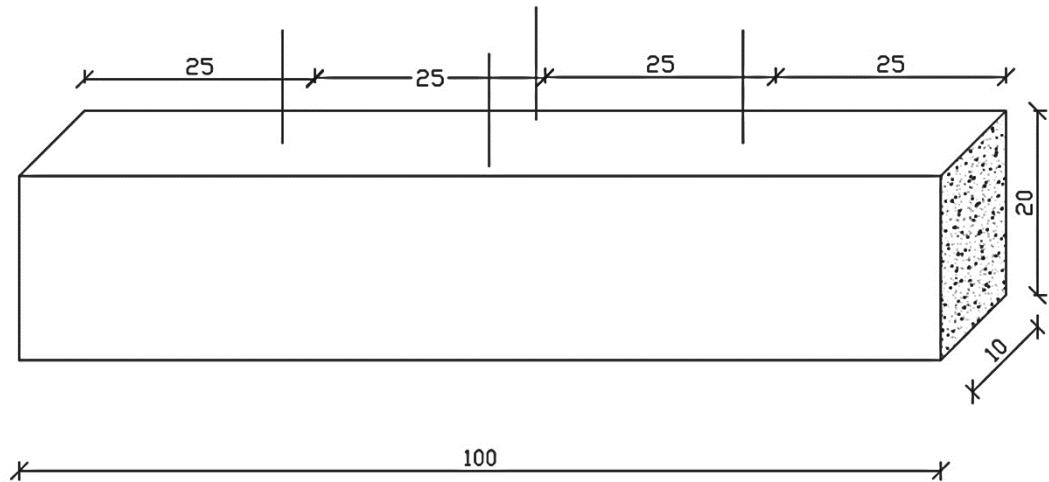
Kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesinde:

- 90° U sarım,
- 90° U şerit sarım,
- sol tarafa 45° ve sağ tarafa 135° U şerit sarım,
- sol tarafa 45° ve sağ tarafa 135° U şerit sarım ile 90° yarım U sarım,
- 45° ve 135° U şerit çapraz sarım,
- 45° ve 135° U şerit çapraz sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım şeklinde farklı yerleşim yerlerine göre sarım yöntemleri kullanılmıştır. Deney elemanlarında kullanılan CFRP şerit ve kumaş boyutları ile kiriş isimlerine göre güçlendirme şekli tablo 3.12'de gösterilmiştir.

Tablo 3.12. Kiriş ismine göre güçlendirme şekli ve CFRP özellikleri

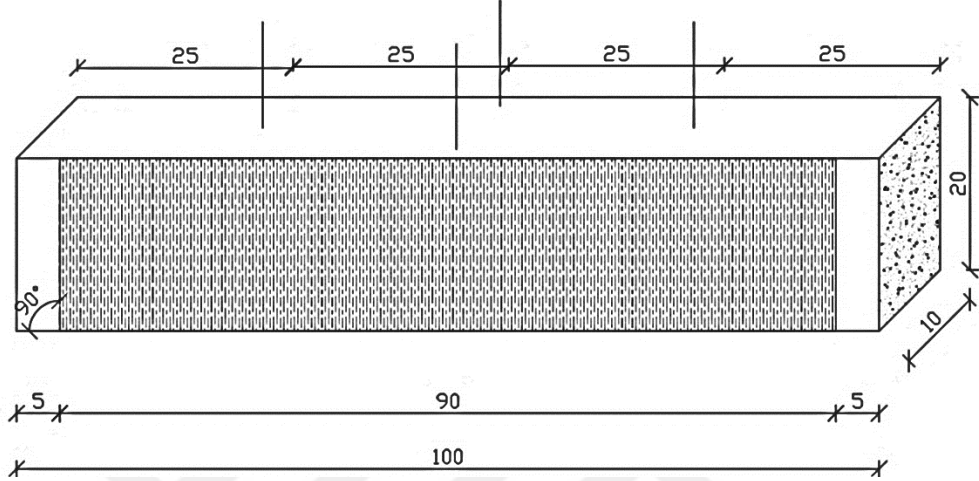
Kiriş İsmi	Düşme Yüksekliği (m)	CFRP		CFRP Doğrultu Açısı (°)	Güçlendirme Şekli
		Boy (cm)	Genişlik (cm)		
B1-1	1	-	-	-	Güçlendirilmemiştir
B1-2	1	50	90	90	90° U
B1-3	1	50	2,5	90	90° U şerit
B1-4	1	66	2,5	45/ 135	45°/135° U şerit
B1-5	1	66	30	2,5	45°/135° U şerit ve 90° yarım U
B1-6	1	66	2,5	45/ 135	45°/135° U şerit
B1-7	1	66	50	2,5	45°/135° U şerit ve 90° U şerit
B2-1	1,5	-	-	-	Güçlendirilmemiştir
B2-2	1,5	50	90	90	90° U
B2-3	1,5	50	2,5	90	90° U şerit
B2-4	1,5	66	2,5	45/ 135	45°/135° U şerit
B2-5	1,5	66	30	2,5	45°/135° U şerit ve 90° yarım U
B2-6	1,5	66	2,5	45/ 135	45°/135° U şerit
B2-7	1,5	66	50	2,5	45°/135° U şerit ve 90° U şerit

Her iki gruptan bir adet kirişe CFRP ile herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamış ve kirişler B1-1 ve B2-1 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.25).



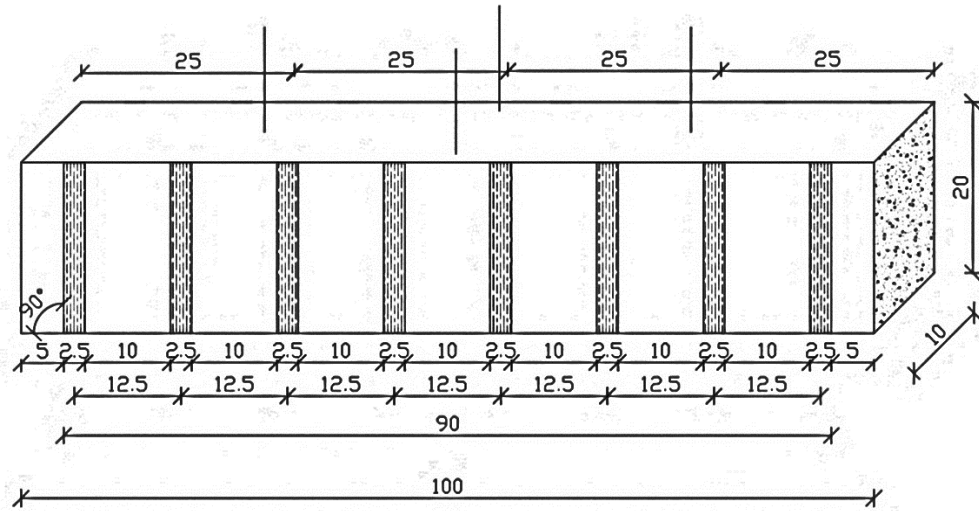
Şekil 3.25. B1-1 ve B2-1 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

90° U sarım yönteminde, kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U sarım olacak şekilde güçlendirilmiştir. CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde, genişliği 90 cm, uzunluğu 50 cm olarak tasarlanmıştır. 90° U sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-2 ve B2-2 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.26).



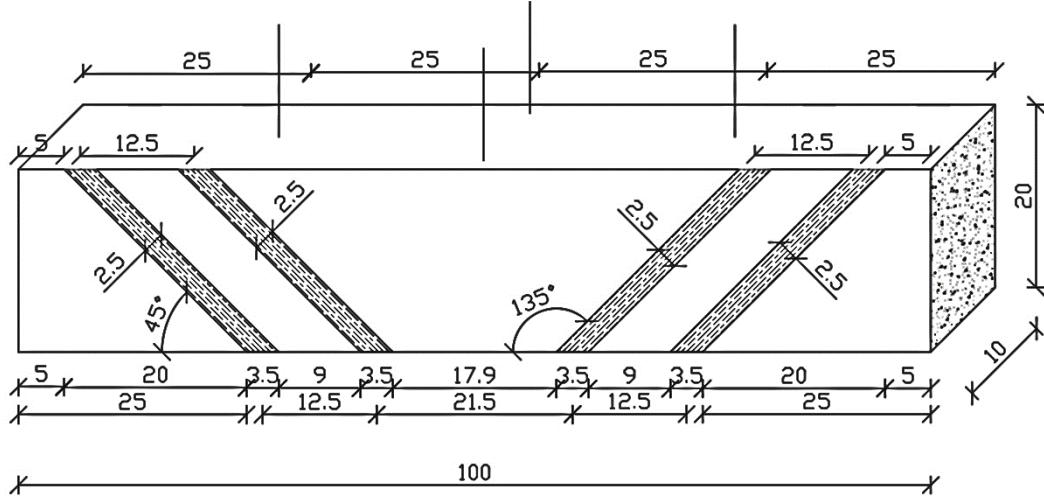
Şekil 3.26. B1-2 ve B2-2 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

90° U şerit sarım yönteminde, kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U şeritler olacak şekilde güçlendirilmiştir. Toplam 8 adet şerit ve şeritlerdeki CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde, şeritlerin genişliği 2,5 cm, uzunluğu 50 cm olarak tasarlanmıştır. 90° U şerit sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-3 ve B2-3 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.27).



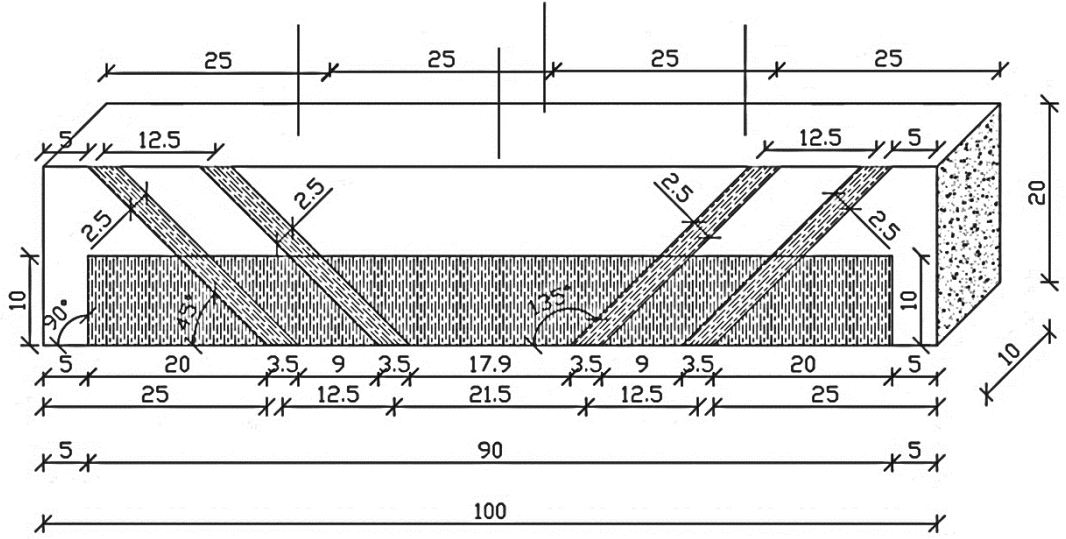
Şekil 3.27. B1-3 ve B2-3 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

Sol tarafa 45° ve sağ tarafa 135° U şerit sarım yönteminde, kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit olacak şekilde güçlendirilmiştir. U şerit sarımında kullanılmak üzere toplam 4 adet şerit, şeritlerdeki CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine solda 45° , sağda 135° olacak şekilde, şeritlerin genişliği 2,5 cm, uzunluğu 66 cm olarak tasarlanmıştır. Bu sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-4 ve B2-4 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.28).



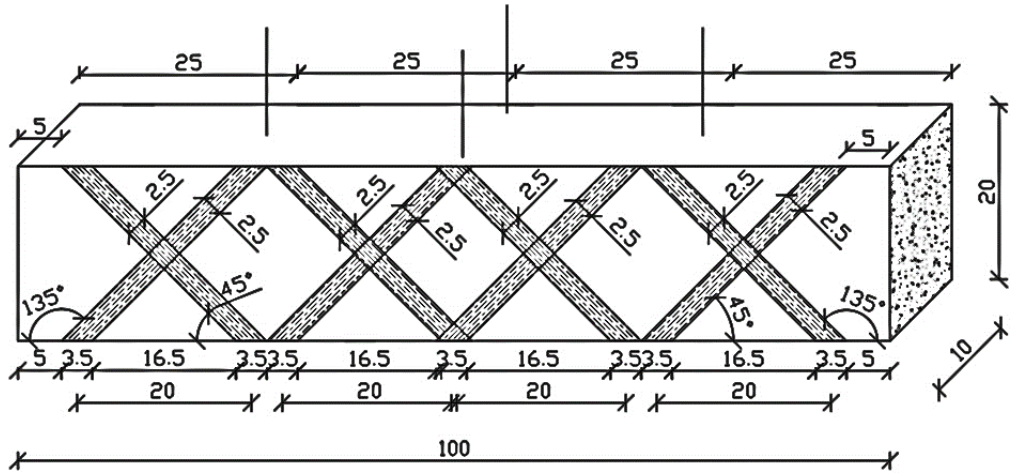
Şekil 3.28. B1-4 ve B2-4 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

Sol tarafa 45° ve sağ tarafa 135° U şerit sarım ile 90° yarım U sarım yönteminde, kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit ve bu şeritlerin üzerine yan yüzeylerin yarısı ve alt yüzeyi kaplayan 90° yarım U sarım olacak şekilde güçlendirilmiştir. U şerit sarımında kullanılmak üzere toplam 4 adet şerit, şeritlerdeki CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine solda 45° , sağda 135° olacak şekilde, şeritlerin genişliği 2,5 cm, uzunluğu 66 cm ve 90° yarım U sarımda CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde, genişliği 90 cm, uzunluğu 30 cm olarak tasarlanmıştır. Bu sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-5 ve B2-5 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.29)



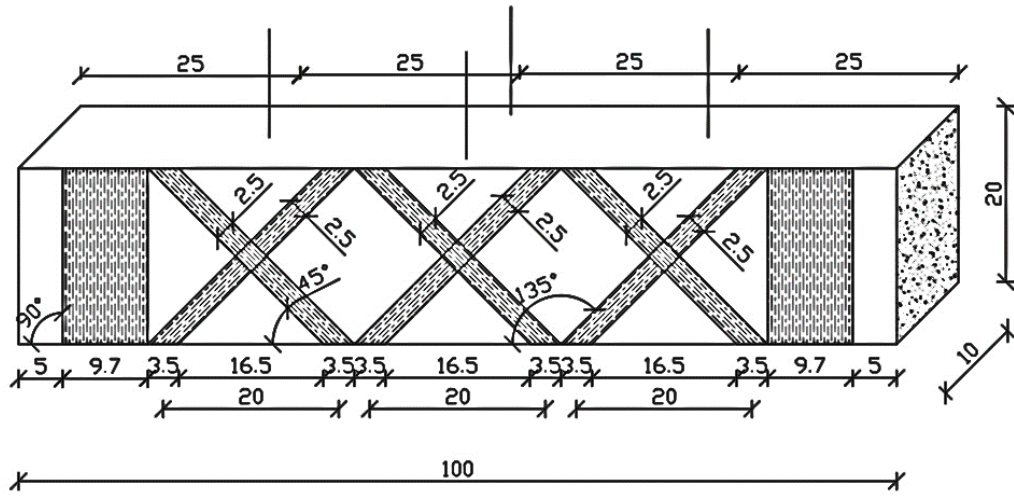
Şekil 3.29. B1-5 ve B2-5 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

45° ve 135° çapraz U şerit sarım yönteminde, kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 45° ve 135° çapraz U şerit olacak şekilde güçlendirilmiştir. Yan çapraz U şerit sarımında kullanılmak üzere toplam 8 adet şerit, şeritlerdeki CFRP elyaf doğrultusu kirişin yüzeyine 45° ve 135° olacak şekilde, şeritlerin genişliği 2,5 cm, uzunluğu 66 cm olarak tasarlanmıştır. Bu sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-6 ve B2-6 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.30)



Şekil 3.30. B1-6 ve B2-6 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

45° ve 135° çapraz U şerit sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım yönteminde, kirişin sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım kullanılmıştır. 90° U şerit sarımında CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde, genişliği 9,7 cm, uzunluğu 50 cm olarak tasarlanmıştır. Kalan açıklık bölgesinde 45° ve 135° çapraz U şerit sarım olacak şekilde yapıştırılacak şekilde güçlendirilmiştir. Çapraz U şerit sarımında kullanılmak üzere toplam 6 adet şerit, şeritlerdeki CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 45°, ve 135° olacak şekilde, şeritlerin genişliği 2,5 cm, uzunluğu 66 cm olarak tasarlanmıştır. Bu sarım yöntemi ile iki adet kiriş güçlendirilmiştir ve güçlendirilen kirişler B1-7 ve B2-7 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.31)



Şekil 3.31. B1-7 ve B2-7 isimli kirişlerin güçlendirme şekli

3.2.2.2. CFRP'nin Yapıştırılacağı Yüzey Hazırlığı

Kirişler yeterli kuruluğa ulaştıktan sonra CFRP ile güçlendirilme işlemine geçilmiştir. İki kiriş güçlendirilmemiş deney elemanı olarak ayrılmış ve kalan 12 deney elemanı CFRP ile güçlendirme öncesi yüzey hazırlığına alınmıştır. Keskin yüzeylerin CFRP ile güçlendirme üzerindeki olumsuz etkisini elimine etmek için CFRP ile güçlendirilecek olan deney elemanlarının tamamının alt köşeleri şekil 3.32'de gösterildiği şekilde boydan taşlama makinası kullanılarak yuvarlatılmıştır. Yuvarlatma işlemi bittikten sonra kirişlerin yüzeyi taşlama yöntemi ile hazırlanmış ve pürüzsüz hale getirilmiş ve çimento şerbeti yüzeyden kaldırılmıştır.



Şekil 3.32. Taşlama işlemi

Taşlama işleminden sonra beton yüzeylerinde bulunan küçük gözeneklere dolmuş olan tozlar ve gevşek partiküller, tel fırça ve temiz bez yardımıyla temizlenip silinerek yüzeye yapışan tozlar ve gevşek partiküller uzaklaştırılmıştır. Böylece CFRP yapıştırılması için deney elemanlarının yüzeyleri uygun hale getirilmiştir.

3.2.2.3. CFRP'nin Yapıştırılacağı Bölgelere Çizim Yapılması

Kiriş deney elemanlarının yüzey temizleme işleminden sonra, güçlendirme uygulanacak kirişlere CFRP kumaşların kiriş yüzeyine doğru bir şekilde yapıştırılabilmesini sağlamak için CFRP kumaşın kiriş yüzeyine yapıştırılacak bölgeleri kiriş ismi baz alınarak kalem ile çizilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. CFRP'nin yapıştırılacağı bölgelere çizim yapılması

3.2.2.4. CFRP Kumaşların Kesilmesi

Metayx Composites marka CFRP kumaş temiz masa üzerinde her bir kiriş ismi ile CFRP yerleşim ve sarım şekillerine uygun olarak makas ile kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. Deney elemanlarında kullanılan CFRP kumaş kesim örnekleri

3.2.2.5. CFRP Kumaşların Yapıştırılması

Teknobond 330 epoksi esaslı yapıştırıcı üretici firma tarafından tavsiye edilen karıştırma oranı ağırlıkça $A:B = 3,85:1,15$ olacak şekilde B bileşeni A bileşenine eklendikten sonra düşük hızlı, elektrikli bir karıştırıcı ile homojen bir renk elde edene kadar 2-3 dakika karıştırılmıştır (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. Epoksi karıştırma işlemi

Hazırlanan epoksi öncelikle kirişlerin çizili bölgelerine rulo kullanarak sürülmüştür. Daha sonra kesilen CFRP kumaş parçalarının arka yüzeylerine rulo kullanılarak epoksi iyice yedirilmiştir. Epoksi sürüm işleminden sonra CFRP kumaşlar düzgün bir şekilde kumaş altında hava kalmayacak şekilde çizili bölgelere sarılarak yapışması sağlanmış ve yapıştırılan kumaşların üstüne epoksi rulo ile tekrar sürülmüştür (Şekil 3.36). Epoksinin dayanım kazanmasını sağlamak için kirişler 15 gün boyunca laboratuvar ortamında uygun koşullarda bekletilmiştir.



Şekil 3.36. CFRP kumaşların epoksi ile yapıştırılma işlemi

3.2.2.6. Deney Ölçüm Cihazı Montaj Vidalarının Kesilmesi

Çarpma deneyi sırasında çekicinin düşeceği plakanın ve sağ ve sol ivmeölçerlerin yerleştirileceği 6 mm çelik plaka ve deney ölçüm cihazı montaj vidalarının uzun kalan yerleri kısaltılarak deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.37).



Şekil 3.37. Çelik plaka ve deney ölçüm cihazı montaj vidaların kısaltılması

Deney elemanlarının çarpma deneyi öncesi hali Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.

Şekil 3.38. Deney elemanlarının çarpma deneyi öncesi hali: a. B1-1 & B2-1, b. B1-2 & B2-2, c. B1-3 & B2-3, d. B1-4 & B2-4, e. B1-5 & B2-5, f. B1-6 & B2-6, g. B1-7 & B2-7

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yürütülen deneysel çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kiriş elemanlarının çarpma yükleri etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. CFRP kumaşın farklı yerleşim şekilleri ile düşme yüksekliği değişken parametreler olarak tutularak deneysel olarak incelenmiş olup bu değişkenler harici diğer bütün özellikler kiriş deney elemanlarında sabit tutulmuştur. Serbest düşme yüksekliği B1 deney grubundaki 7 adet deney elemanı için 1 m ve B2 deney grubundaki 7 adet deney elemanı için 1,5 m olarak belirlenmiştir.

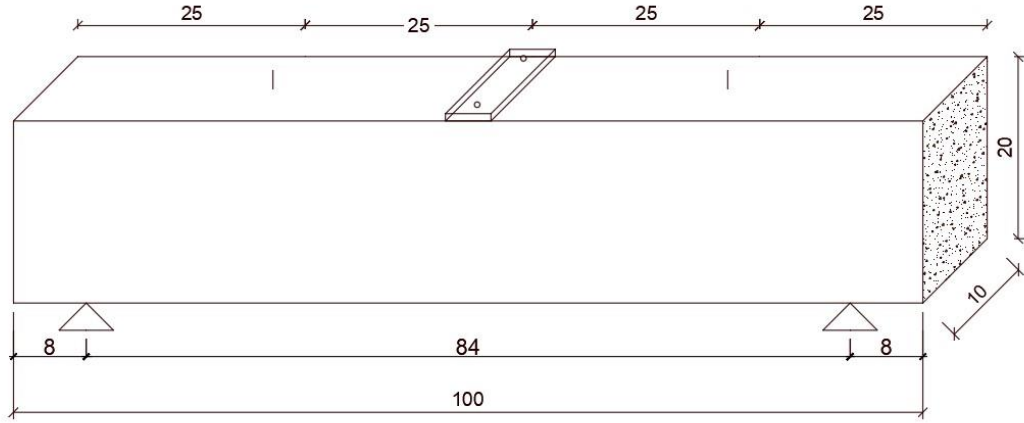
Deney elemanlarındaki çarpma etkisi serbest ağırlık düşürme deney düzeneğinde sabit 12 kg çekiç ile deney elemanlarında göçme hasar durumu gözlemleninceye kadar uygulanmış ve davranışları gözlenmiştir.

Deneye başlamadan önce serbest ağırlık düzeneğindeki serbest düşmeyi gerçekleştiren çekiçteki sürtünmeleri minimuma indirmek için tekerleklerin geçtiği platform yağlanıp temizlenmiştir.

Deney sırasında deney elemanına uygulanan çarpma etkisinin uniform yayılmasını sağlamak için beton döküm sürecinde deney elemanının tam ortasına gelecek şekilde tasarlanıp yerleştirilen 6 mm çapında çelik plaka montaj vidaları kullanılarak çelik plaka deney elemanına sabitlenmiştir. Bu sabitleme her çekiç düşmesinde çelik plakanın yerinden oynamaması ve deney sonuna kadar çekicinin aynı noktaya düşmesini sağlayacak şekilde yapılmıştır ve böylece çekicinin her çarpma anında direkt olarak deney elemanı ile değil çelik plaka ile etkileşime geçmesi sağlanmıştır.

Bu işlemin ardından deney elemanının iç yapısı hakkında bilgi almamızı sağlaması için deney elemanının merkezinin 25 cm sağında ve 25 cm solunda deney elemanı üretim sırasında yerleştirilen deney ölçüm cihazı montaj vidalarına ivmeölçerlerin monte edileceği pirinç malzemeler yerleştirilip sabitlenmiştir (Şekil 3.8). Pirinç malzemenin üzerine gelen her türlü etkiyi çok düşük bir kayıpla iletmesi bu malzemenin tercih edilmesindeki ana nedendir. Pirinç sabitleme aparatı sayesinde ivmeölçerlerin çarpma sırasında hareket etmesi engellenmiştir.

Çelik plaka ve pirinç aparatlar sabitlendikten sonra deney elemanı mesnet üzerine oturtulmuş ve çarpma etkisiyle deney elemanının yanal ötelenmesini, dönmesini, devrilmesini ya da merkez noktasının değişmesini önlemek ve deney elemanı üzerine düşen çekicinin hep aynı noktaya düşmesini sağlamak için sağ ve sol mesnetlerde dörder adet mesnet aparatları (24 mm vida) kullanılarak kirişin sağ ve sol ucundan 8 cm uzaklıkta olacak şekilde mesnetleme yapılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Deney elemanı mesnet yerleşim yeri ve geometrisi

Her bir deney elemanı deney düzeneğine yerleştirildikten sonra sağ ve sol pirinçlerin üzerine ivmeölçerler ve çekicinin uç kısmına da halka kuvvet sensörü monte edilmiştir. Halka kuvvet sensörünün montaj şekli ölçümlerin doğruluğu için önemli olması sebebiyle, firmanın ürün kitapçığında belirtildiği şekliyle, iki yapı arasına berilyum-bakır karışımı özel bir malzemeden yapılmış vida ile monte edilmiştir.

Ölçüm aletleri ile veri toplayıcı arasındaki bağlantıyı sağlayan kablolar isimlendirilmiştir: 1 numaralı kablo: sağ ivmeölçer, 2 numaralı kablo: sol ivmeölçer ve 3 numaralı kablo: kuvvet algılayıcı. Deneyler süresince bağlantı kabloları zarar görmeyecek şekilde muhafaza edilmiştir.

Deneylerde kullanılan çekiç kütlesi 12 kg olup bütün testlerde sabit tutulmuştur. Deney elemanlarına 1 m ve 1,5 m olarak belirlenen iki ayrı yükseklikten serbest olarak düşürülen sabit ağırlıklı çekiç ile göçmeye ulaşınca kadar çarpma kuvveti uygulanmıştır.

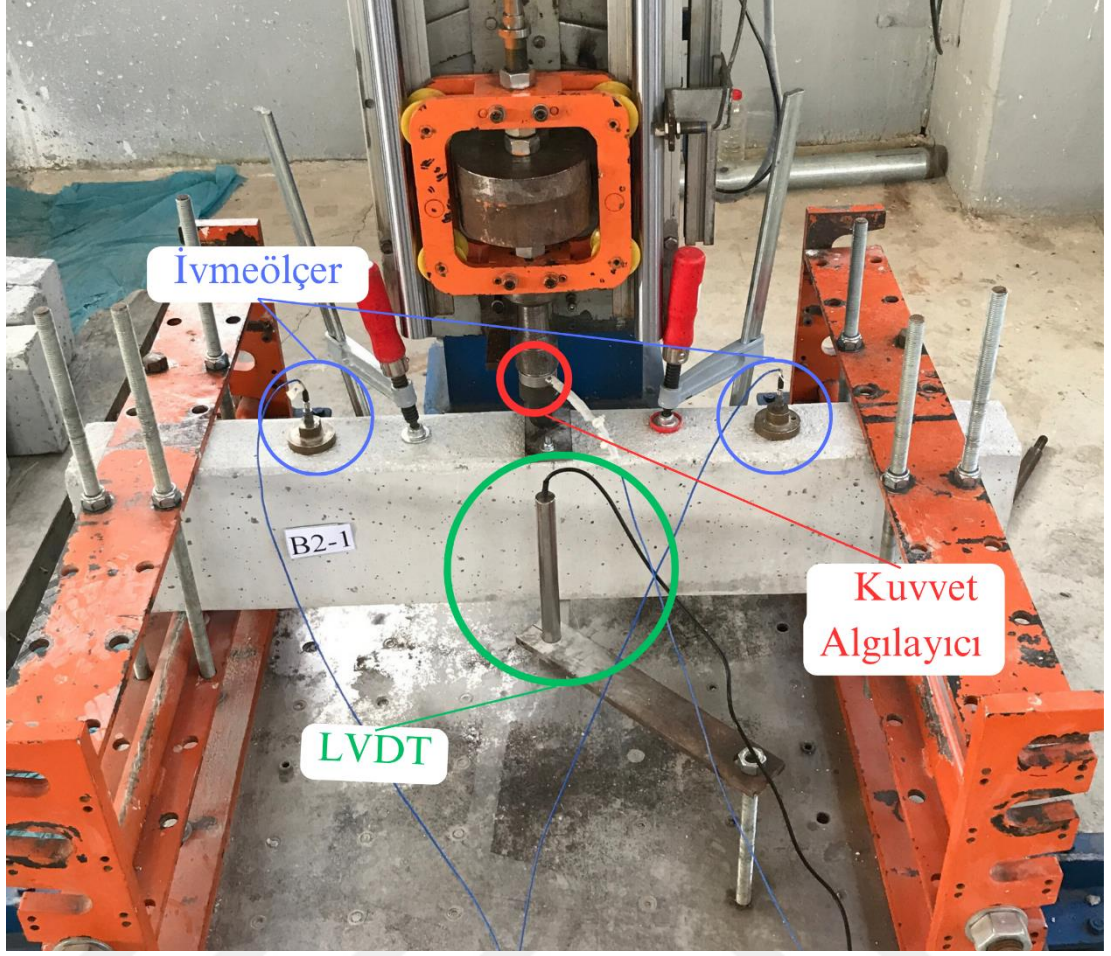
İvme ölçerler ve kuvvet algılayıcıya bağlanan fiber kablolar sayesinde kaydedilen değerler DEWE 43A veri toplayıcısına ve veri toplayıcısından da Dewesoft yazılımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Her bir kayıt işlemi öncesinde, ivmeölçerlerin ve kuvvet algılayıcının kalibrasyon ayarları yapılmıştır.

Kirişin orta bölgesindeki, çarpma kuvvetinin altında oluşacak deplasmanı ölçmek için LVDT cihazı plaka yardımıyla yerleştirilmiştir. Hareket edebilen kol plağa bağlanıp, direnç ile birim uzunluğu eşit olan lineer potansiyometrik cetvel hareketli kol ile temas ettirilmiştir. Hareketli kolun yer değiştirmesi ile cetvelin direncindeki doğrusallık, hareket esnasında kolun değişen direnci ve gerilimi plakta meydana gelen deplasman değerlerinin okunmasını sağlamıştır. Yükleme sistemine bağlı olarak TESTBOX 2010 veri toplama sistemi ile veriler kaydedilmiştir. Ayrıca, her bir yeni kayıttan önce, tüm kanallardaki başlangıç verileri sıfırlanarak deney başlatılmıştır. Hasar sonrası detaylı fotoğraf çekmek için LVDT cihaz ve aparatları çıkartılmış, yeni çarpma kaydı öncesi tekrar bağlanmıştır.

Veri toplama aygıtları, ölçüm aletleri, bilgisayar ve deney elemanı ile deneye hazır hale getirilen çarpma deney düzeneği şekil 4.2’de, ölçüm aletlerinin yerleşimi şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneye hazır hale getirilen çarpma deney düzeneği



Şekil 4.3. Çarpma deneyi ölçüm aletlerinin yerleşimi

Deneyisel çalışma kapsamında on dört adet deney elemanının çarpma kuvveti, sol ivme, sağ ivme, deplasman ölçümleri eş zamanlı gerçekleştirilmiş ve deney sonunda 2 farklı yükseklikten, çarpma kuvveti etkisi altında farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde meydana gelen hasarlar değerlendirilmiştir. Ölçüm işlemleri DEWE 43A ve TESTBOX 2010 veri toplama sistemleri kullanılarak eş zamanlı başlatılmış; kuvvet, sağ ivme, sol ivme, deplasman değerlerinin zamana göre değişim verileri eş zamanlı kaydedilmiştir. Ölçümlerden elde edilen eş zamanlı verilerin değerlendirilmesi ve görselleştirilmesi her bir deney elemanı için Python programlama dili Jupyter Notebook ile gerçekleştirilmiştir.

4.1. Deneyler

Tez çalışması kapsamında farklı yerleşim şekline sahip CFRP kumaşlar ile güçlendirilen betonarme kirişlerin çarpma yükü etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. İki adet güçlendirilmemiş deney elemanı olmak üzere toplam 14 adet betonarme kirişe serbest ağırlık düşme deneyi yapılmıştır. Her deney elemanı isimlendirilmesine uygun yükseklikten düşürülen 12 kg sabit ağırlıklı çekiç ile göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiş ve serbest ağırlık düşürücü deney düzeneği altındaki davranışları araştırılmıştır.

Deneyler sırasında her bir deney elemanında meydana gelen çatlak, ilk hasar oluşumu, göçme durumu, çekiç düşme sayısı ve elemanların genel davranışı gibi yapılan gözlemler her deney elemanı için ayrı ayrı takip edilerek kaydedilmiştir.

Kuvvet, sağ ivme, sol ivme ölçüm işlemleri DEWE 43A ve deplasman ölçüm işlemi TESTBOX 2010 veri toplama sistemi kullanılarak eş zamanlı başlatılmış ve kuvvet, ivme, deplasman değerlerinin zamana göre değişim verileri eş zamanlı kaydedilmiştir. Her bir deney elemanı için eş zamanlı ölçülen verilerin (kuvvet, sağ ivme, sol ivme, deplasman) zaman içindeki değişimleri Python programlama dili Jupyter Notebook kullanılarak ivme-zaman, kuvvet-zaman, deplasman-zaman, kuvvet-deplasman ve karşılaştırma grafikleri elde edilmiştir.

Deneyisel çalışmanın bu bölümünde kirişlere uygulanan kuvvet, meydana gelen deplasman, sağ ve sol ivme değişim verileri ve bu verilerden elde edilen grafikler ile çatlak, ilk hasar, göçme oluşumu, çekiç düşme sayısı gibi yapılan gözlemler her deney elemanı için ayrı ayrı verilmiştir.

Her bir deney elemanı için CFRP yerleşim şekli ile deneylerde uygulanan düşme yüksekliği, toplam çekiç düşme sayısı ve ilk hasar başlangıç düşme sayısı değerleri tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney sonuçları

Kiriş İsmi	CFRP Uygulama Şekli	Düşme Yüksekliği (m)	Çekiç Düşme Toplam Sayısı	İlk Hasar Başlangıç Düşme Sayısı
B1-1	Güçlendirilmemiştir	1	14	8
B1-2	90° U	1	20	12
B1-3	90° U şerit	1	24	13
B1-4	45°/135° U şerit	1	28	13
B1-5	45°/135° U şerit ve 90° yarım U	1	25	11
B1-6	45°/135° çapraz U şerit	1	36	20
B1-7	45°/135° çapraz U şerit ve 90° U şerit	1	28	14
B2-1	Güçlendirilmemiştir	1,5	8	4
B2-2	90° U	1,5	17	8
B2-3	90° U şerit	1,5	18	9
B2-4	45°/135° U şerit	1,5	14	8
B2-5	45°/135° U şerit ve 90° yarım U	1,5	14	6
B2-6	45°/135° çapraz U şerit	1,5	24	12
B2-7	45°/135° çapraz U şerit ve 90° U şerit	1,5	22	11

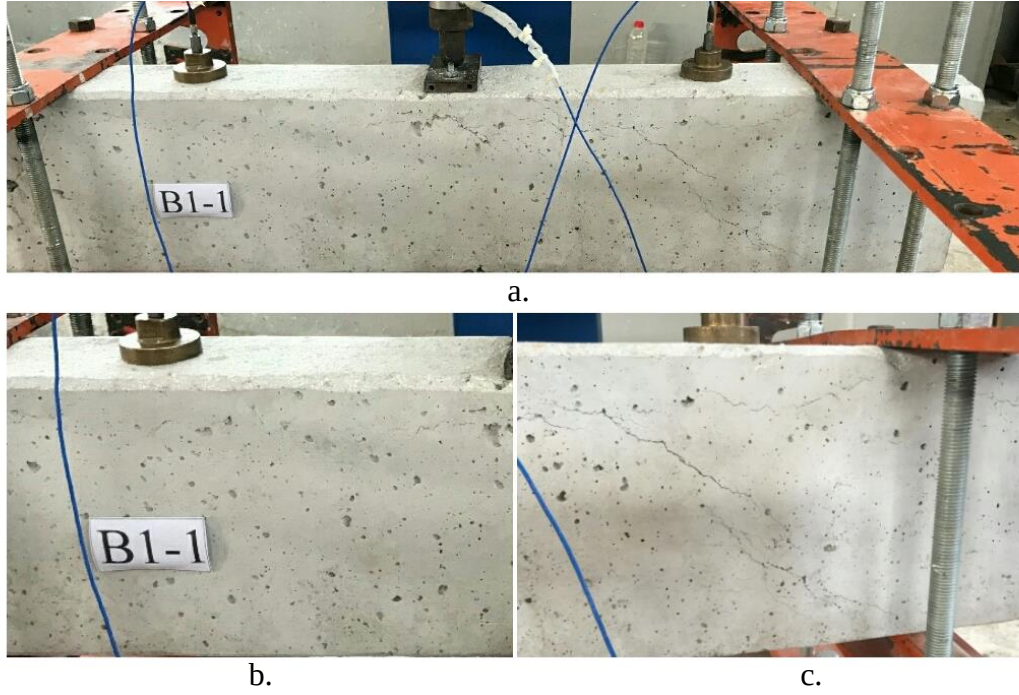
4.1.1. B1-1 Deney Elemanı

B1 grubundaki B1-1 deney elemanına herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmamış olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.4) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.4. B1-1 deney elemanı çarpma deneyi

B1-1 deney elemanına 14 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 8. düşmede almıştır (Şekil 4.5.a). Çekicinin plakaya çarptığı noktadan başlayarak sağ mesnete doğru yaklaşık 15 cm 30 derecelik çatlak oluşumu ve devamında sağ mesnet alt bölgeye doğru yaklaşık 45 derecelik çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.5.c). Orta noktadan sol mesnete doğru ise benzer çatlak oluşumu gözlenmiştir ancak sağdaki çatlaklar kadar belirgin olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.5.b).



Şekil 4.5. B1-1 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çatlaklar çok daha belirginleşmiştir. B1-1 deney elemanında 14. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.6). Plaka ile sağ ivmeölçer arasındaki beton parça kopması meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.7’de gösterilmiştir.



a.



b.



c.

Şekil 4.6. B1-1 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



a.



b.



c.

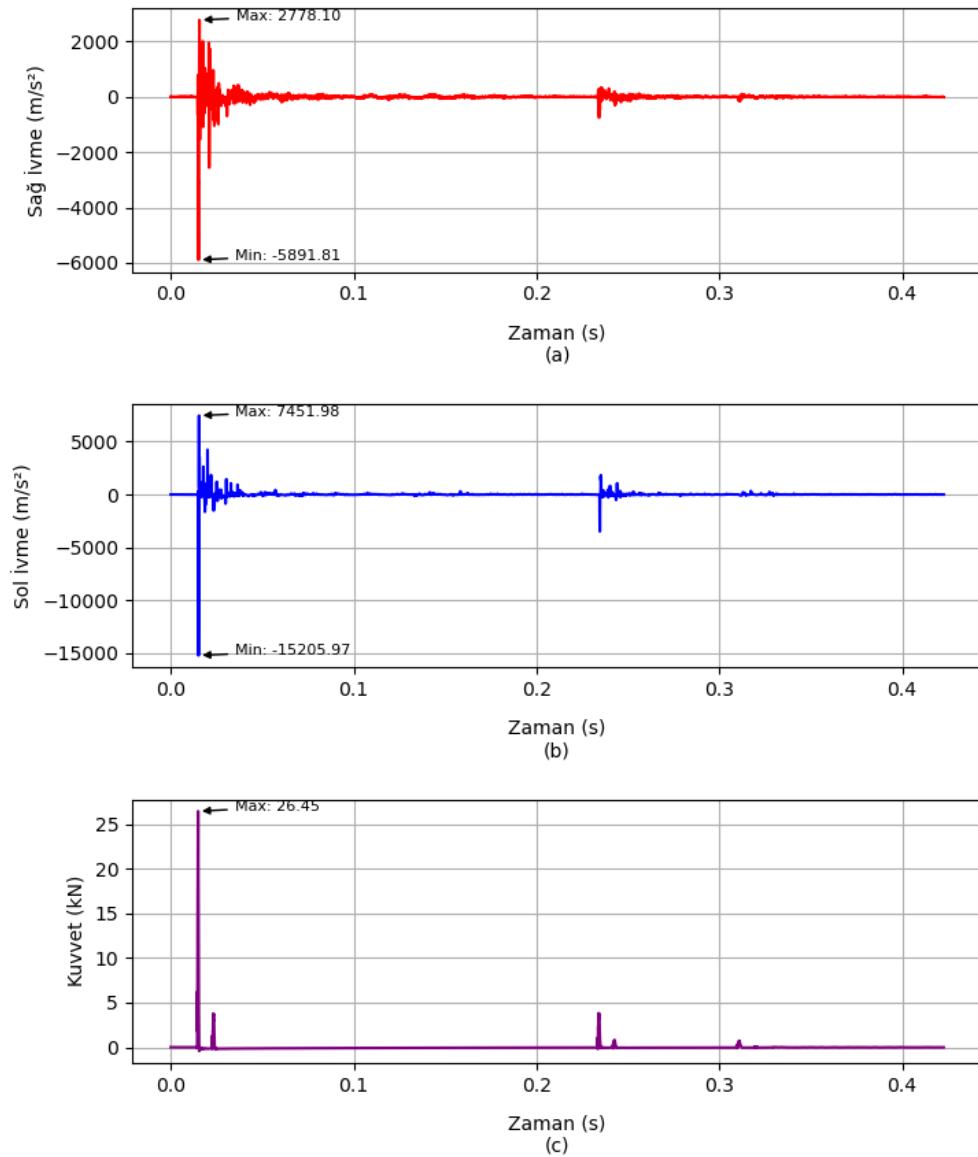
Şekil 4.7. B1-1 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-1 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.2’de verilmiştir.

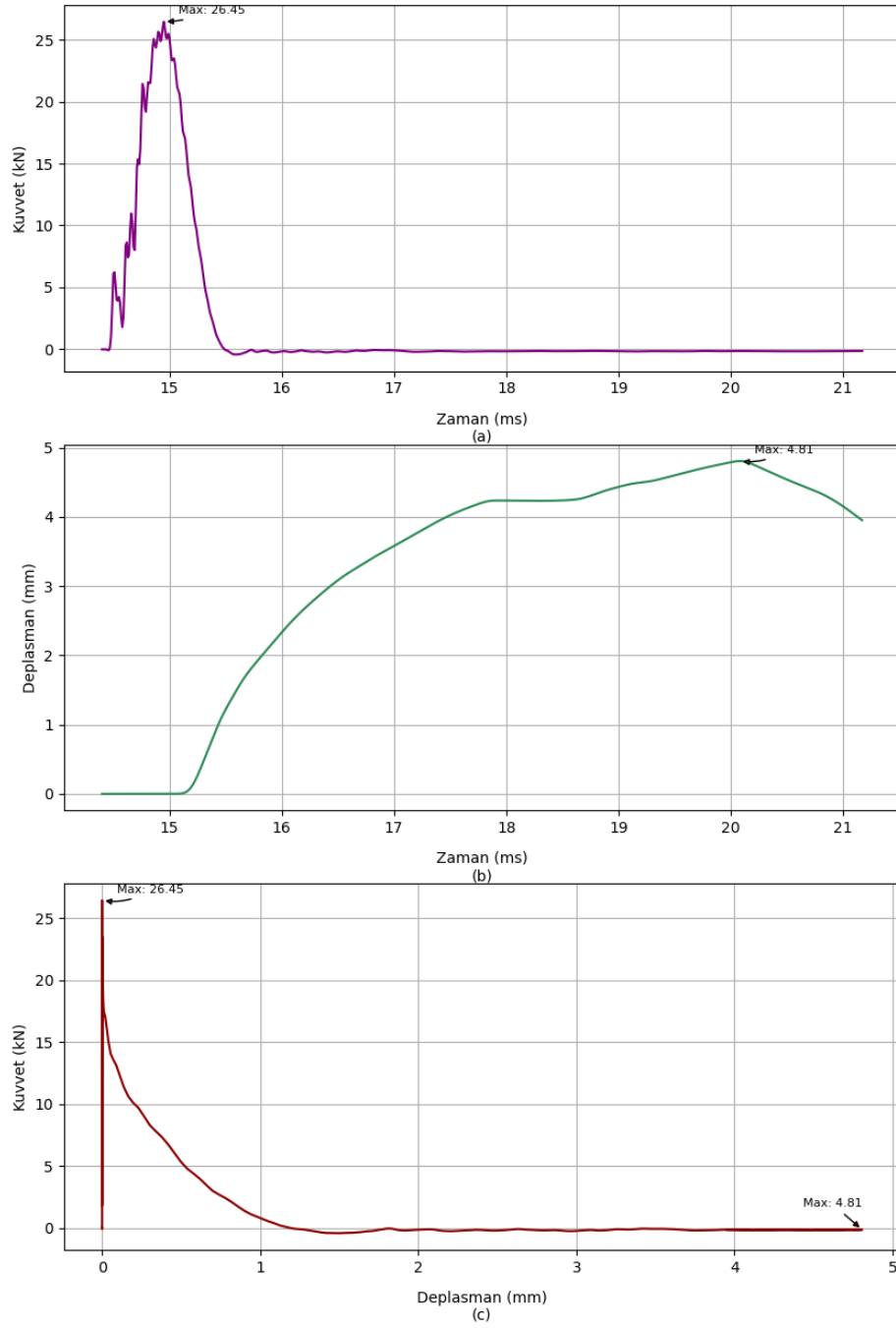
Tablo 4.2. B1-1 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2778,10	-5891,81	7451,98	-15205,97	4,81	26,45
Göçme	2813,09	-2439,93	16110,30	-16914,38	7,03	23,62

B1-1 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.8’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.9’da gösterilmiştir.

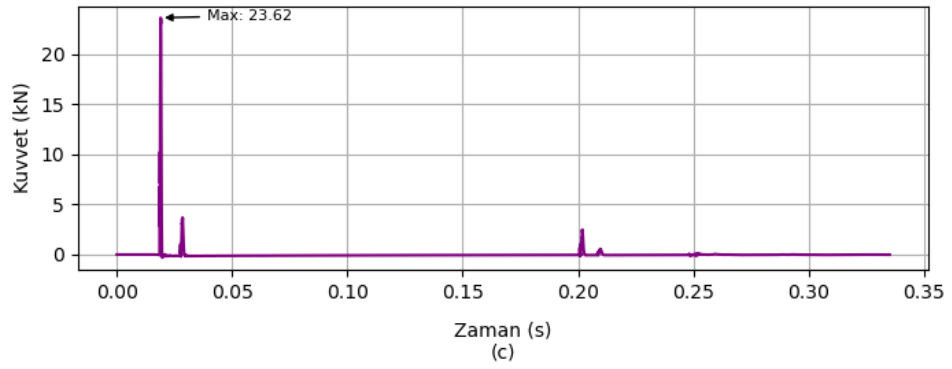
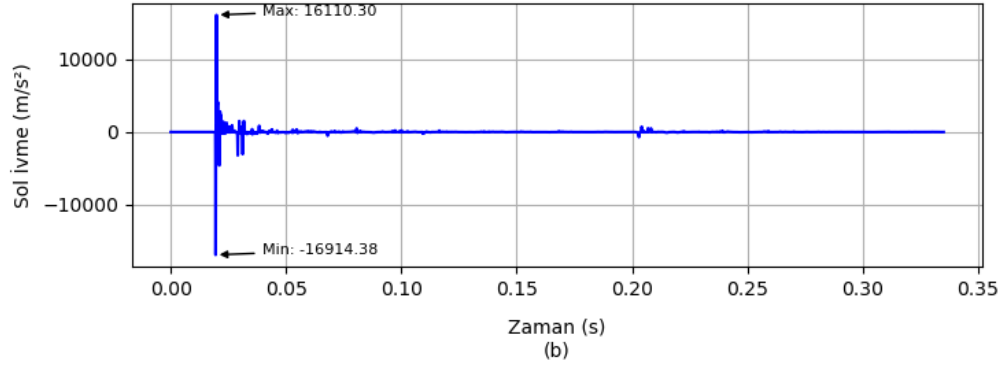
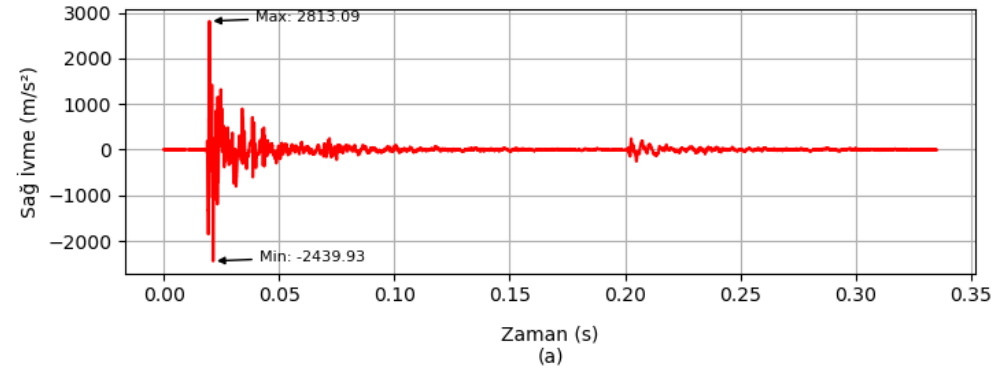


Şekil 4.8. B1-1 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

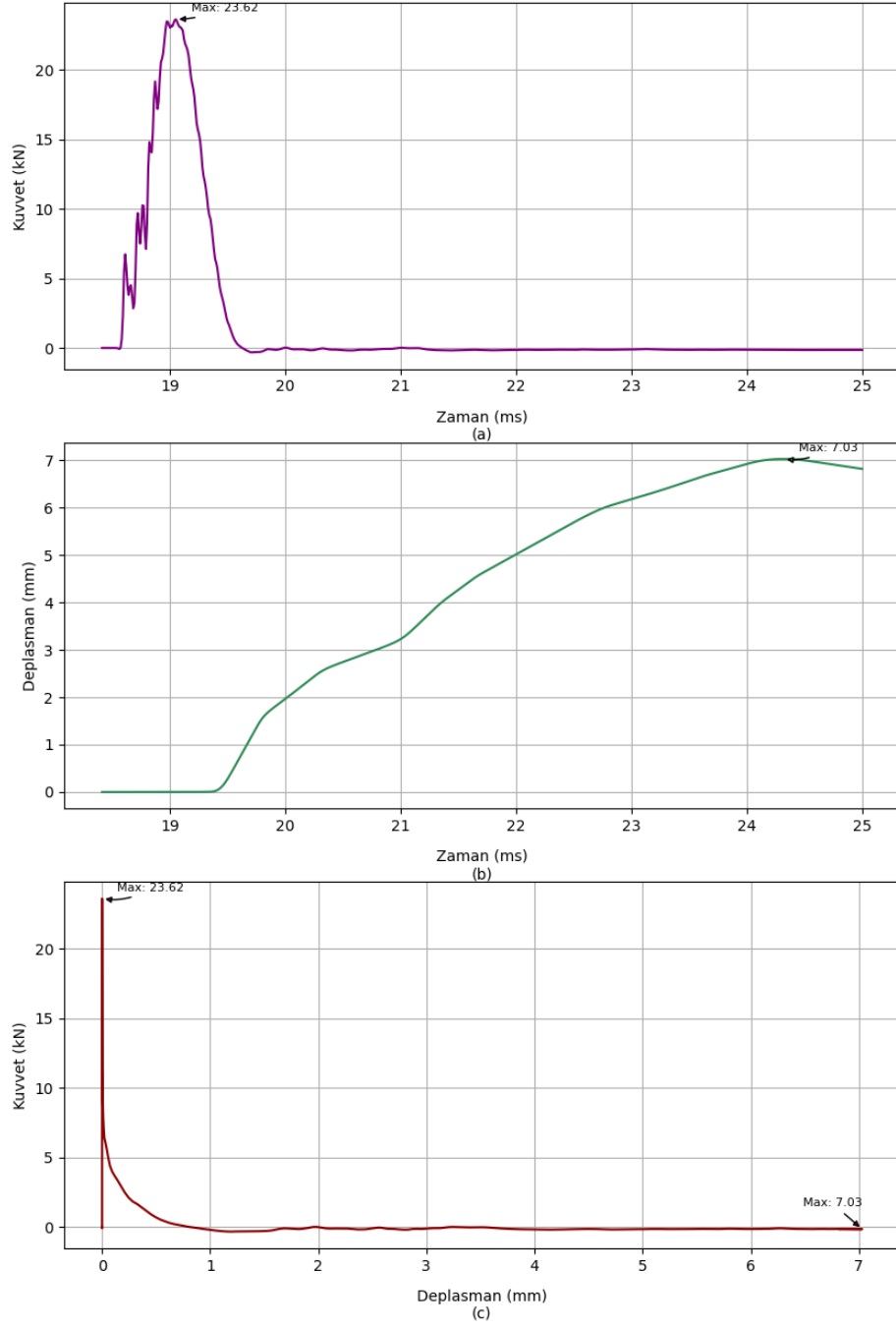


Şekil 4.9. B1-1 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-1 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.10’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. B1-1 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.11. B1-1 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

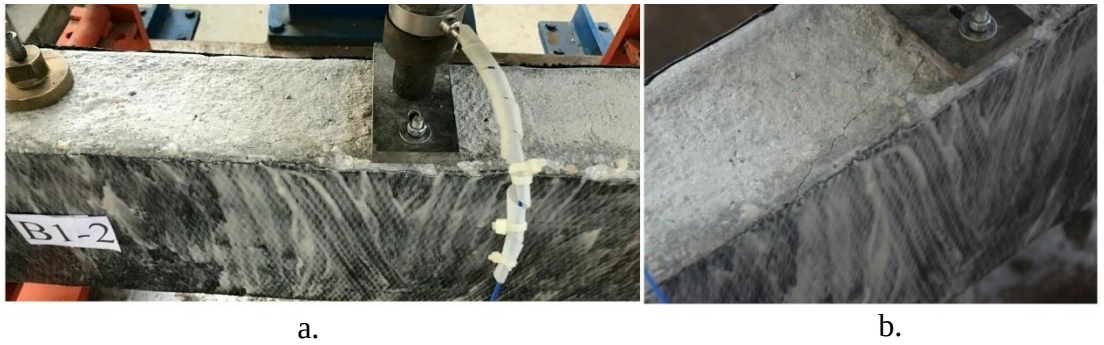
4.1.2. B1-2 Deney Elemanı

B1 grubundaki 90° U sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-2 deney elemanı CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U sarım ile güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.12) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.12. B1-2 deney elemanı çarpma deneyi

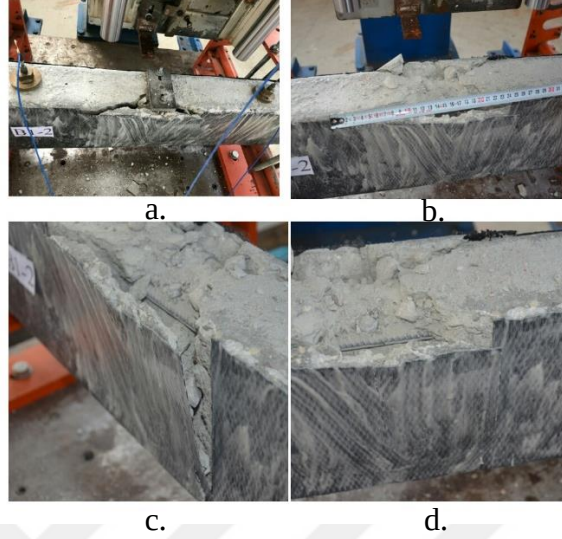
B1-2 deney elemanına 20 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 12. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın sol tarafından ön yüzdeki CFRP kumaşa doğru çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. B1-2 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

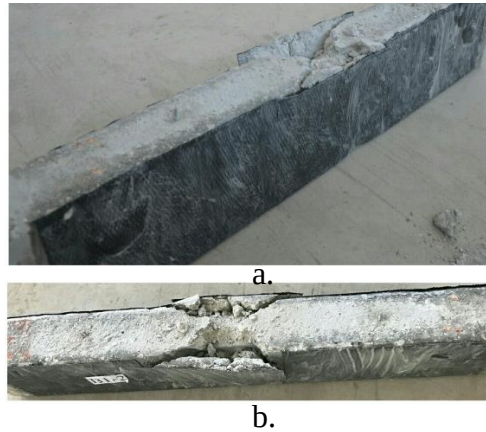
Deney sırasında oluşan ilk çatlaklar kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çok daha belirginleşmiş ve plakanın sağ tarafında da benzer çatlaklar görülmüştür. Aynı zamanda çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanının ön tarafında oluşan çatlaklar plakanın arka tarafında da görülmeye başlamıştır.

B1-2 deney elemanında 20. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.14). Göçme durumunda kiriş orta bölgesinde yaklaşık 25 cm CFRP kumaş, beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. B1-2 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu

Kirişin kesme ve alt bölgesinde herhangi bir çatlak, hasar veya CFRP yırtılması tespit edilmemiştir. Plakanın alt bölgesi ve çatlak oluşumunun meydana geldiği bölgelerde beton parça kopması meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.15'te gösterilmiştir.



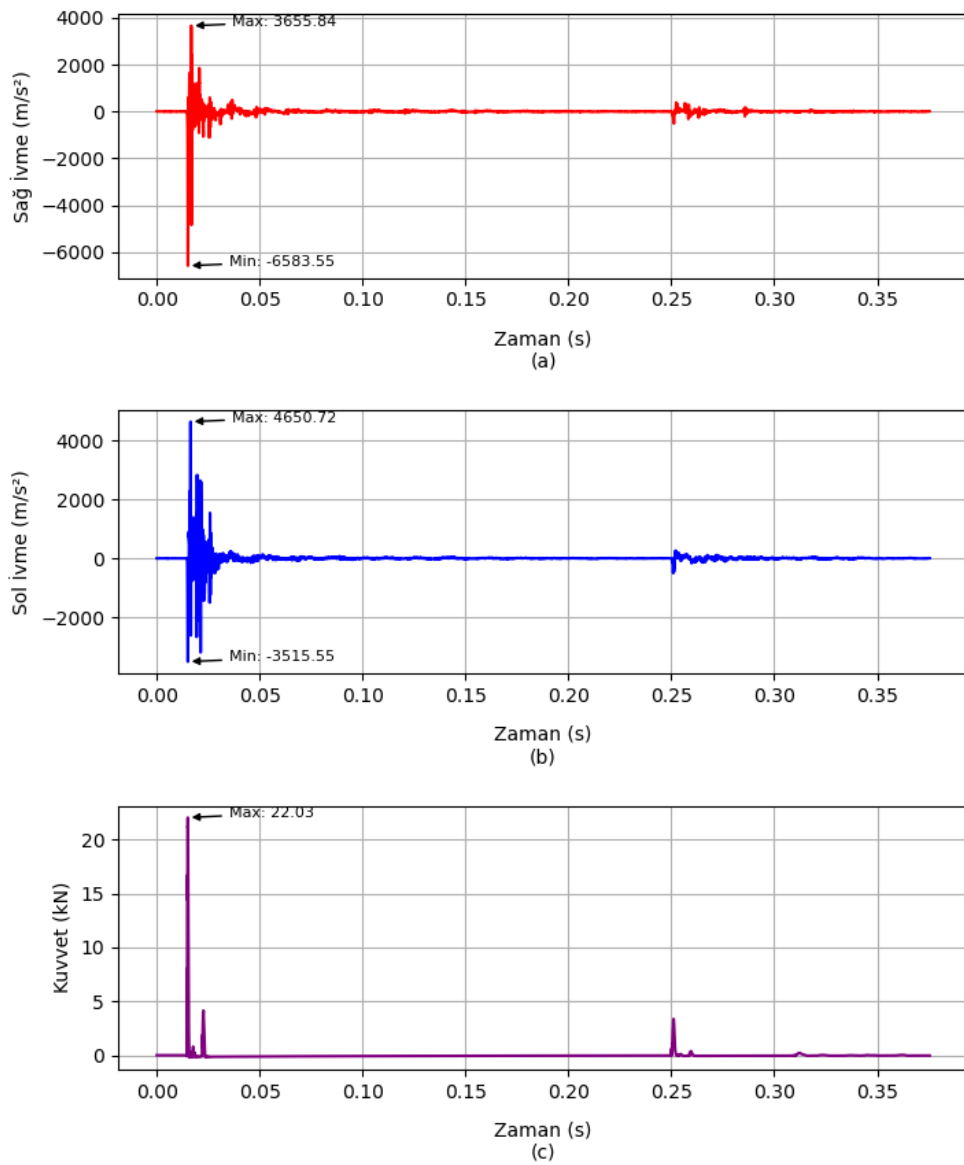
Şekil 4.15. B1-2 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-2 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.3'te verilmiştir.

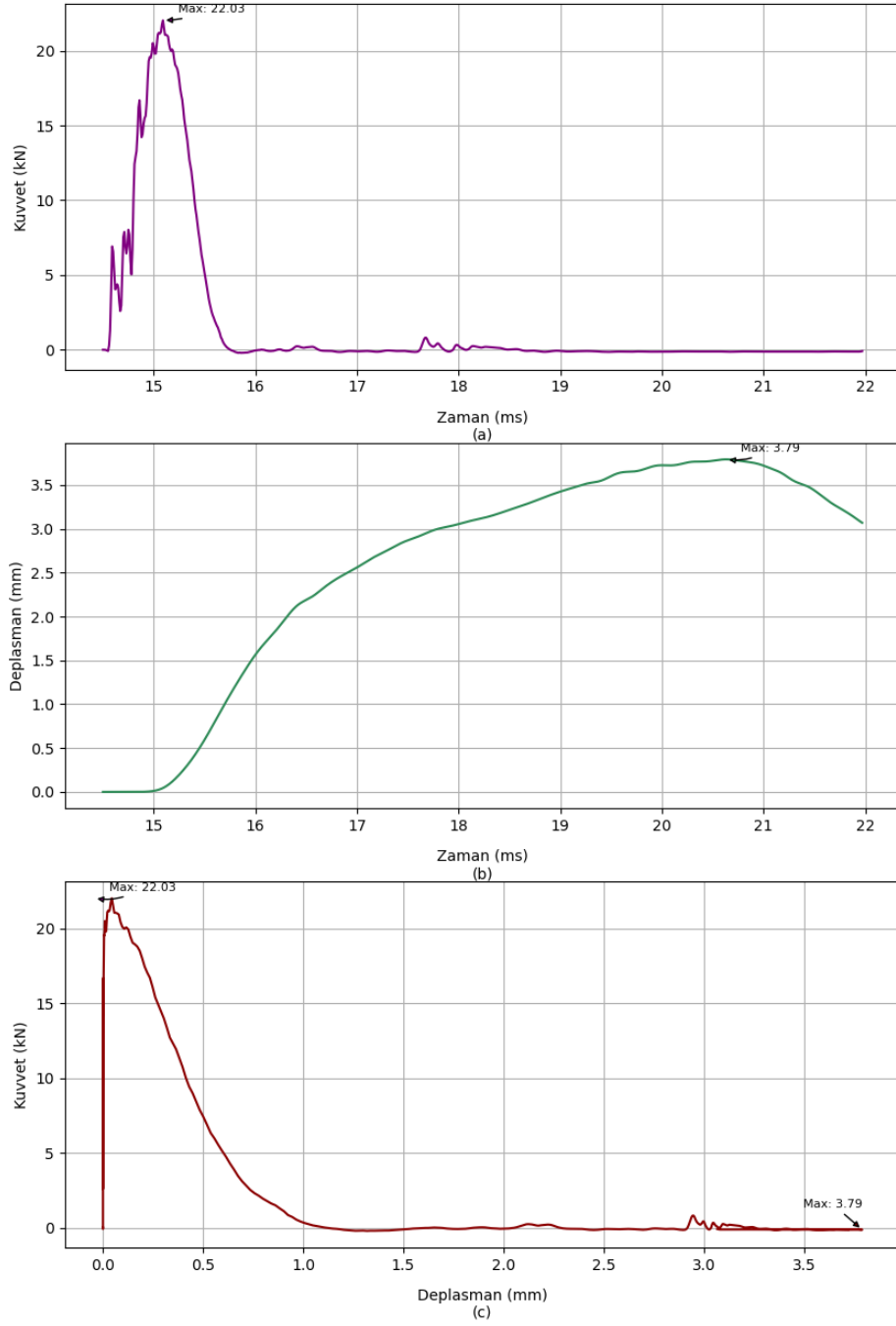
Tablo 4.3. B1-2 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3655,84	-6583,55	4650,72	-3515,55	3,79	22,03
Göçme	1238,55	-947,41	641,50	-770,40	4,43	5,83

B1-2 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.16'da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.17'de gösterilmiştir.

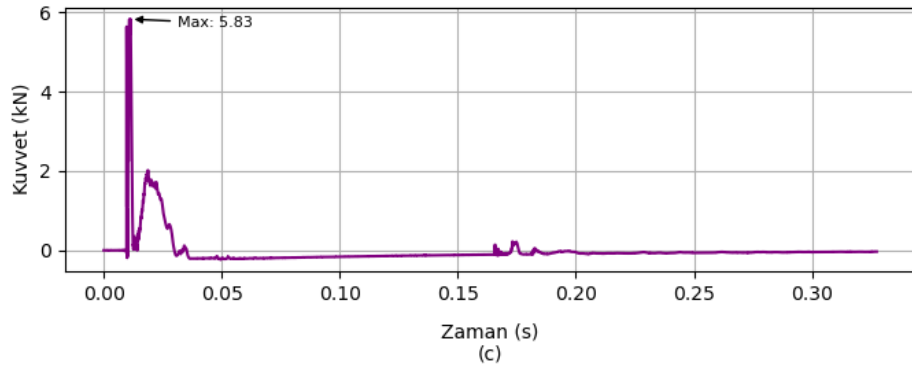
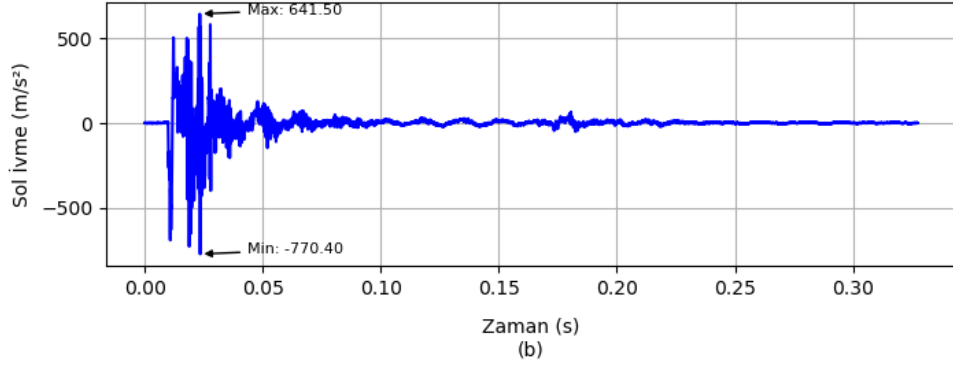
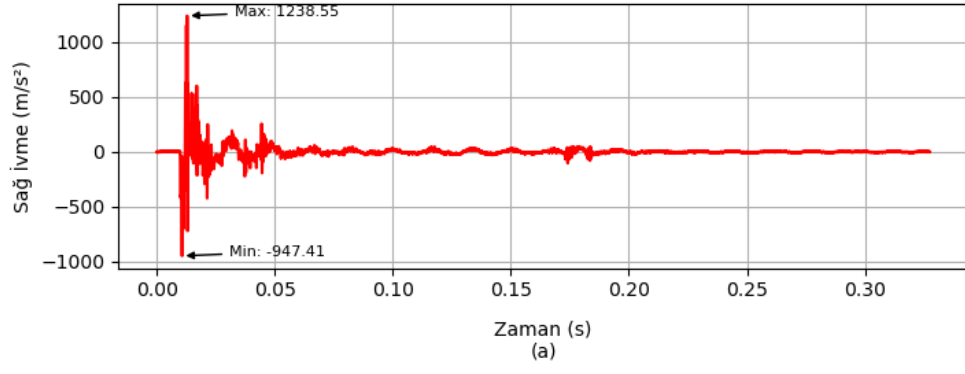


Şekil 4.16. B1-2 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

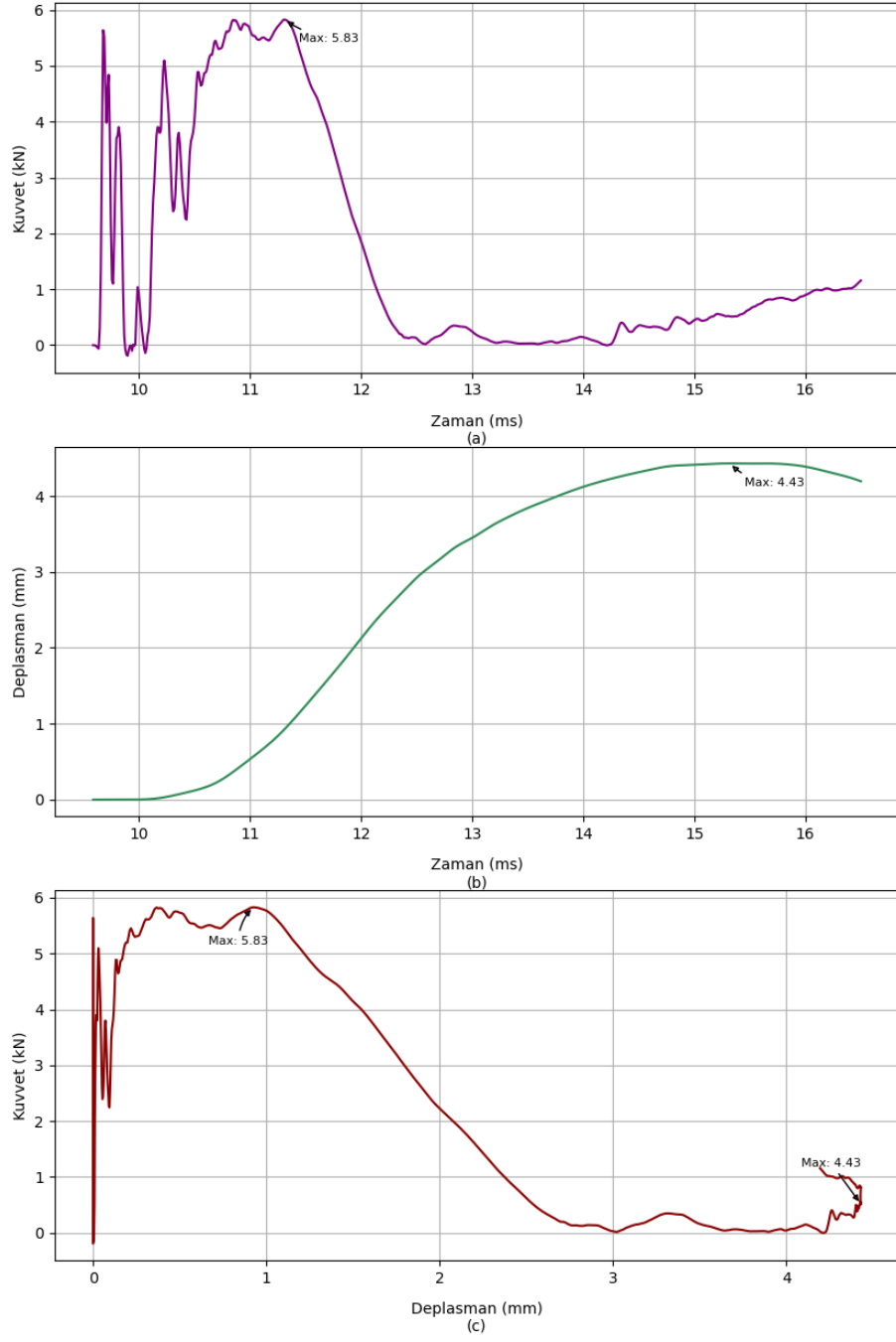


Şekil 4.17. B1-2 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-2 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.18’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.18. B1-2 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.19. B1-2 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

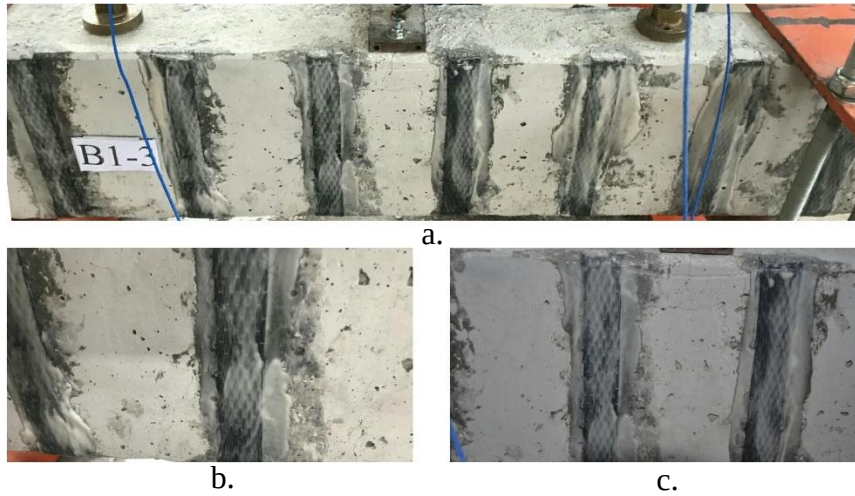
4.1.3. B1-3 Deney Elemanı

B1 grubundaki 90° U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-3 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U şerit sarım ile güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.20) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.20. B1-3 deney elemanı çarpma deneyi

B1-3 deney elemanına 24 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 13. düşmede almıştır. Kiriş ön yan yüzeyinde, çelik plakanın altında yaklaşık 3 cm dikine çatlak meydana gelmiştir; bu çatlağın kiriş sol mesnete doğru kesme çatlağı olarak devam ettiği görülmüştür (Şekil 4.21).



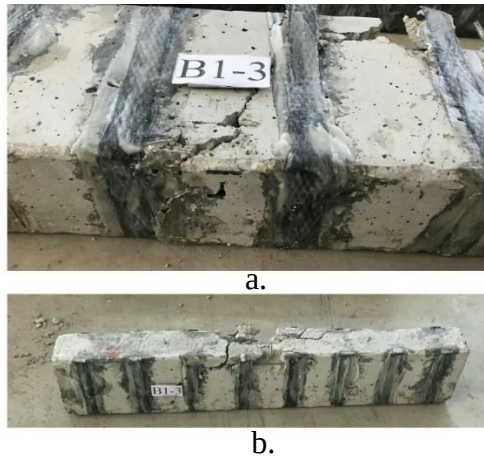
Şekil 4.21. B1-3 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanının sol tarafında oluşan çatlaklar simetriğinde de sağ mesnete doğru görülmeye başlamıştır; ancak soldaki kadar belirgin olmadığı gözlenmiştir ve aynı zamanda deney esnasında kiriş arka yüzeyinde benzer çatlaklar da oluşmuştur. B1-3 deney elemanında 24. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir. Göçme durumunda çarpma bölgesinin sol tarafında bulunan CFRP U şeritler kirişin üst yüzeyine yakın bölgelerde beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. B1-3 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu

Kirişin sol kesme ve sol alt bölgesinde betonda kırılma görülmüştür. Plakanın olduğu orta bölgede beton parça kopması meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.23'te gösterilmiştir.



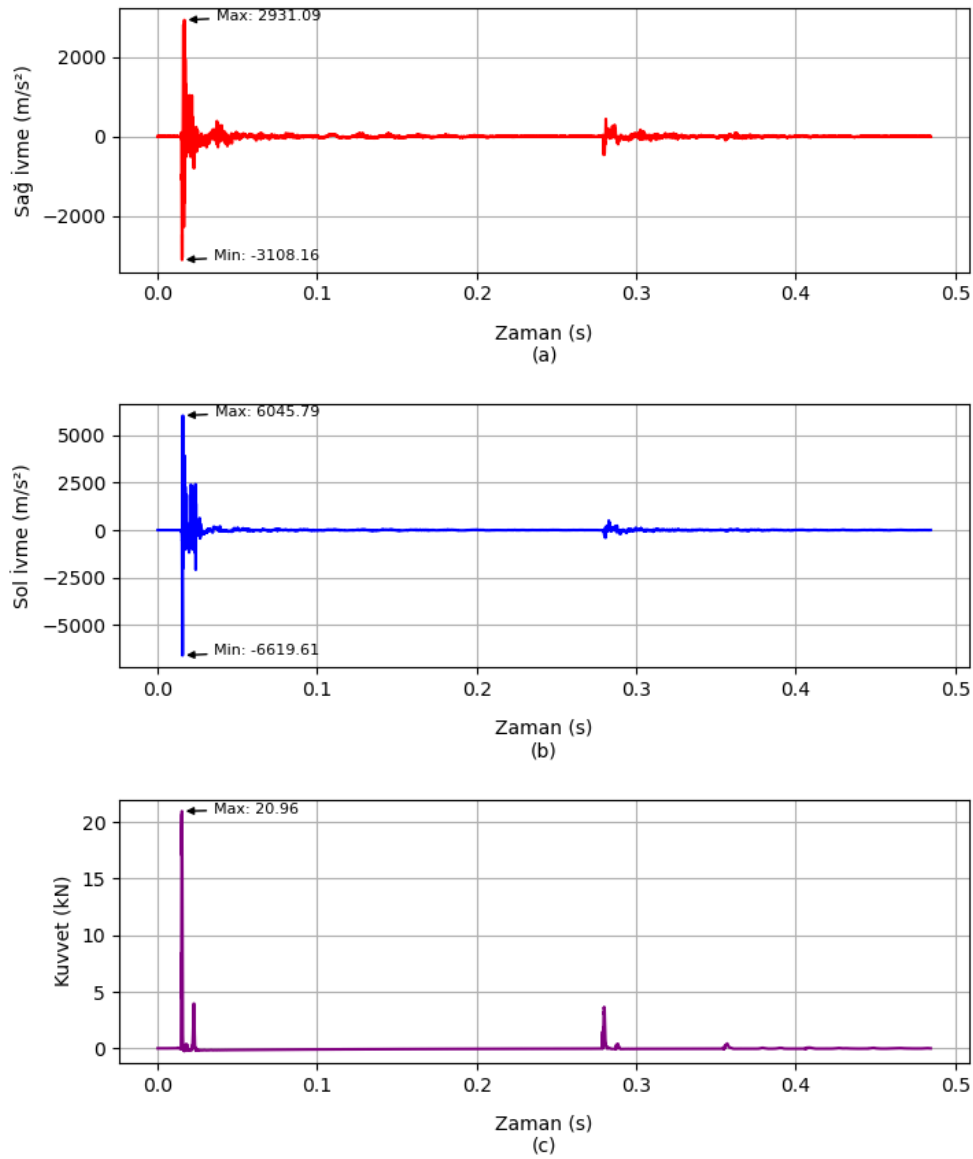
Şekil 4.23. B1-3 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-3 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.4'te verilmiştir.

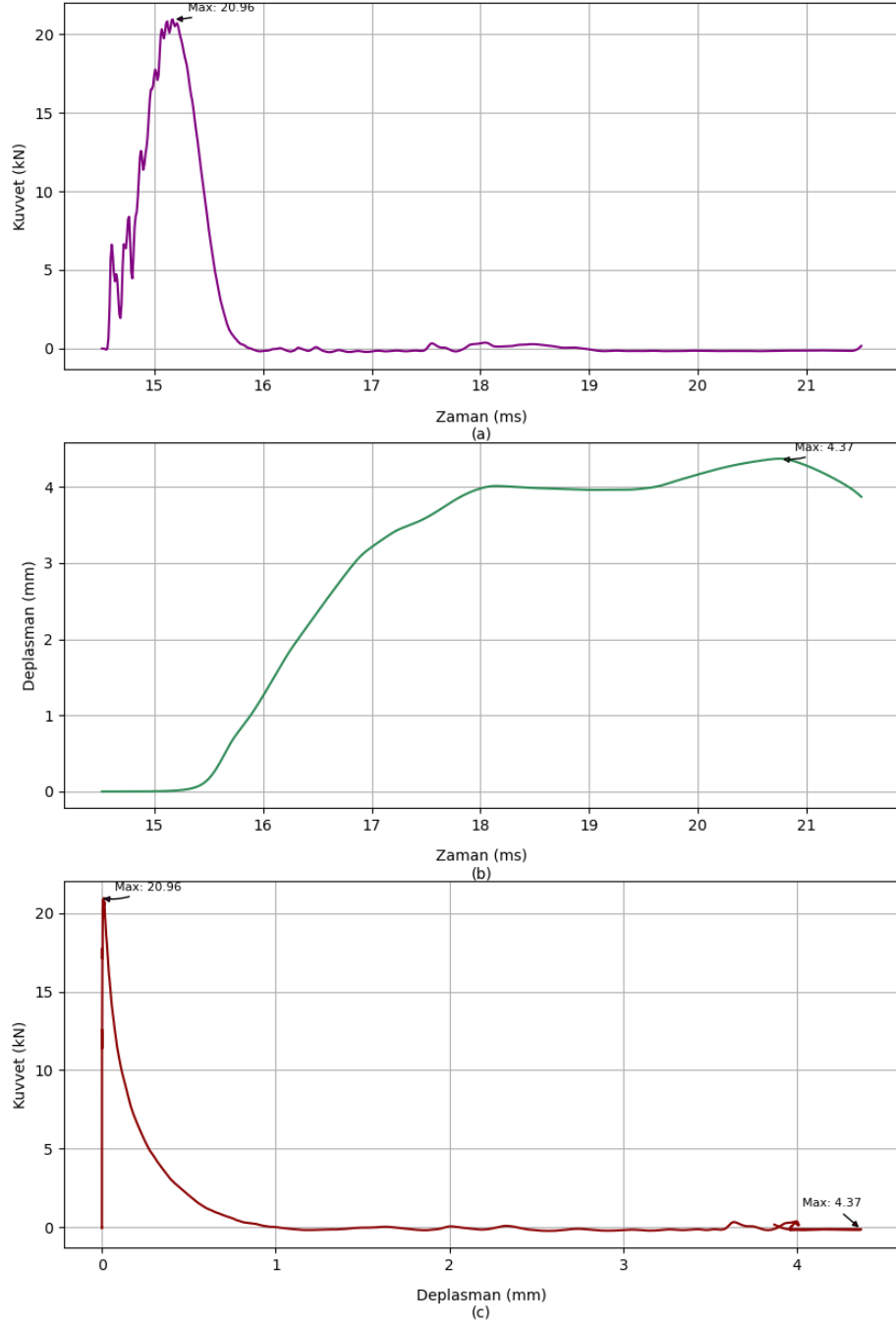
Tablo 4.4. B1-3 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2931,09	-3108,16	6045,79	-6619,61	4,37	20,96
Göçme	2754,84	-2219,40	2107,72	-1610,05	6,71	15,39

B1-3 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.24'te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.25'te gösterilmiştir.

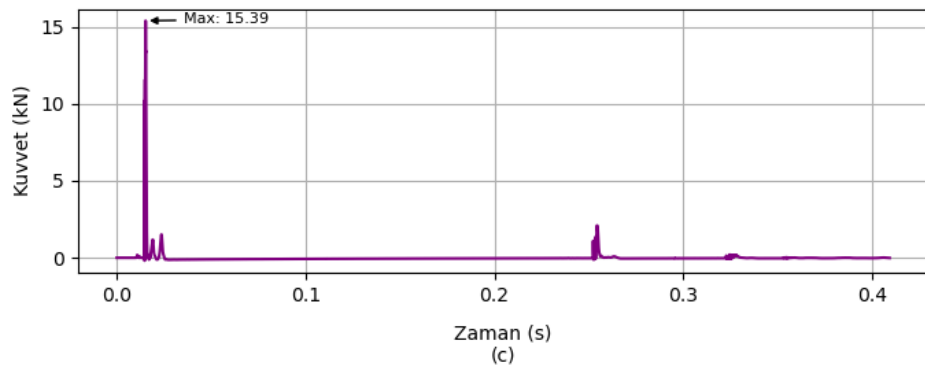
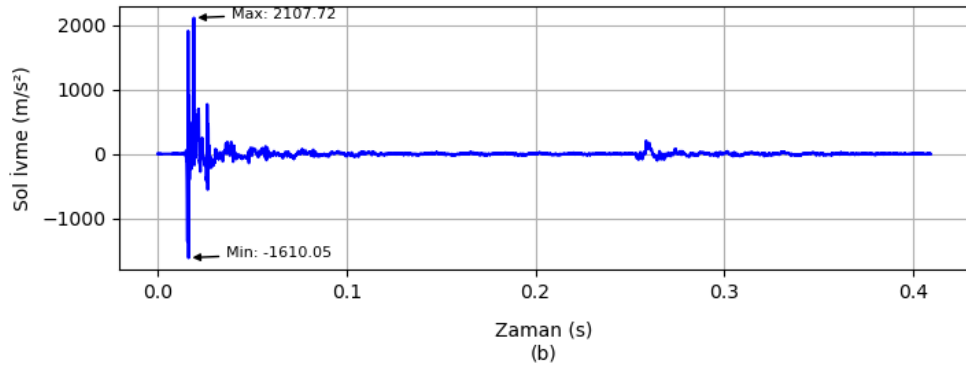
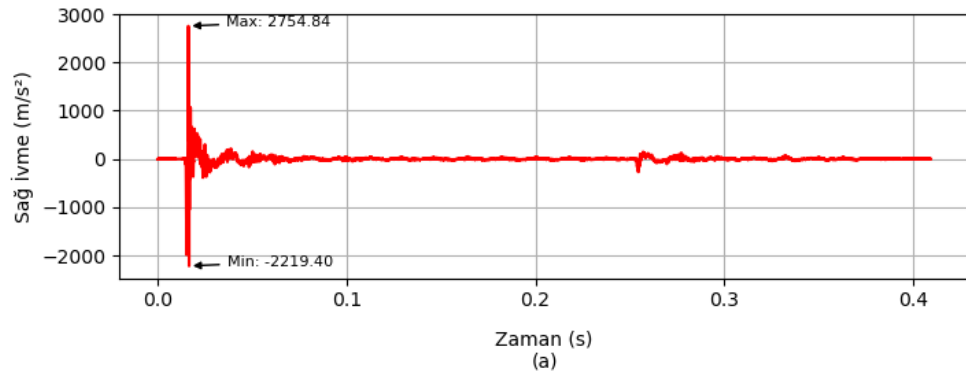


Şekil 4.24. B1-3 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

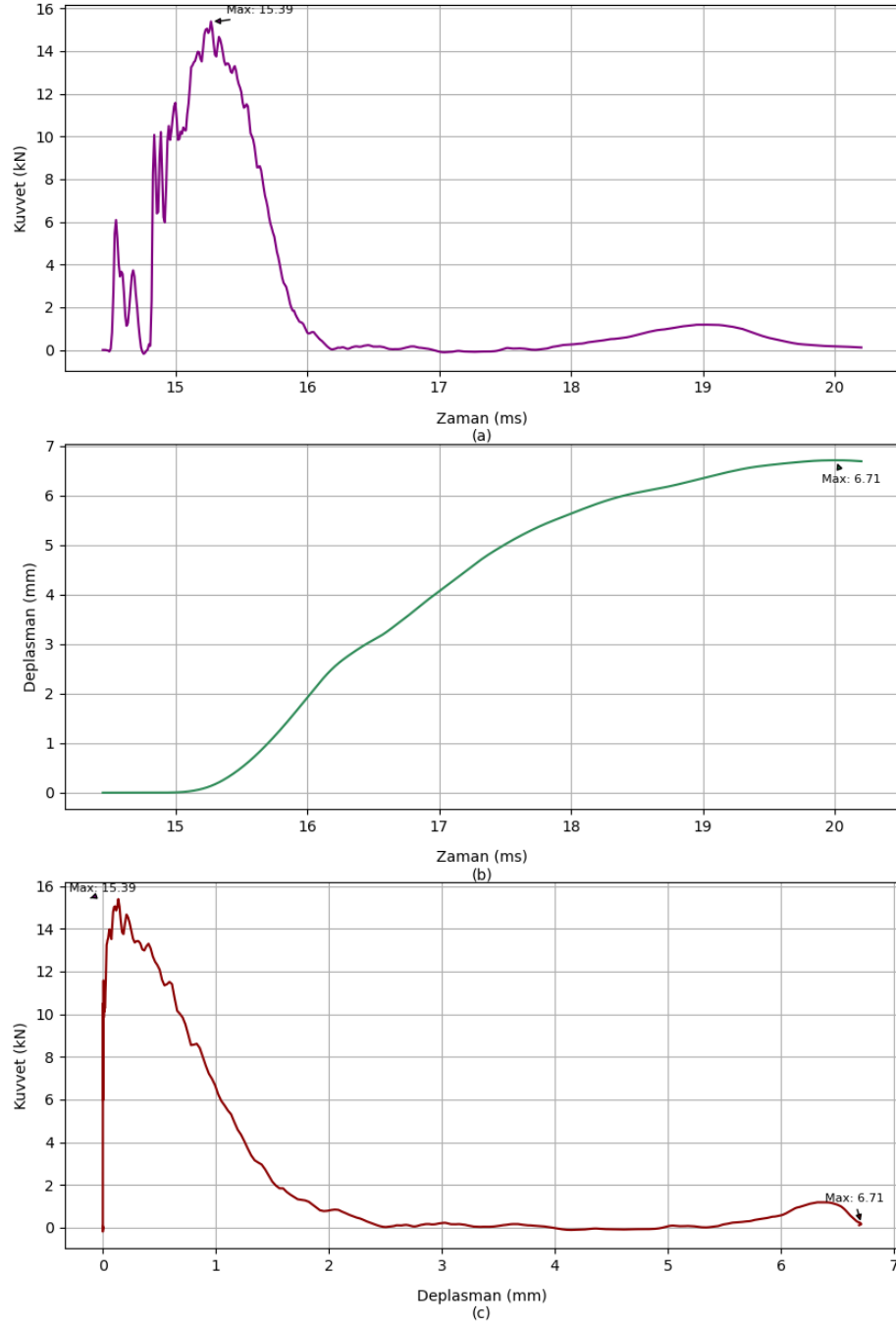


Şekil 4.25. B1-3 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-3 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.26’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.26. B1-3 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.27. B1-3 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

4.1.4. B1-4 Deney Elemanı

B1 grubundaki $45^\circ/135^\circ$ U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-4 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.28) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.28. B1-4 deney elemanı çarpma deneyi

B1-4 deney elemanına 28 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 13. düşmede almıştır. Çelik plakanın sol ön ve sol arka tarafında 45 derecelik ve alt bölgesinde 90 derecelik çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.29.a).

Deney sırasında kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe plakanın sabitlendiği ön vidayı kaplayan beton örtüsü dökülmesi meydana gelmiştir. İlk hasarda plakanın solunda görülen 45 derecelik çatlak, sol yan yüzde yer alan 45° eğimli CFRP şerite 90° açı yapacak şekilde ulaşarak çatlak oluşturmuştur (Şekil 4.29.b).



a.



b.

Şekil 4.29. B1-4 deney elemanında oluşan a. ilk hasar durumu, b. ilerleyen düşmelerde plakanın sabitlendiği ön vida boyunca oluşan beton örtüsü dökülmesi

Çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanında oluşan çatlaklarda herhangi bir değişiklik oluşmamış olup çelik plakanın bulunduğu kiriş üst orta bölgesinde ve kiriş yan yüzeylerinde beton örtüsü dökülmüş ve kiriş üst boyuna donatılarının aderans kaybı oluşması göçme hasarı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.30). Deney sonrası matris görünümü şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.30. B1-4 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



a.



b.

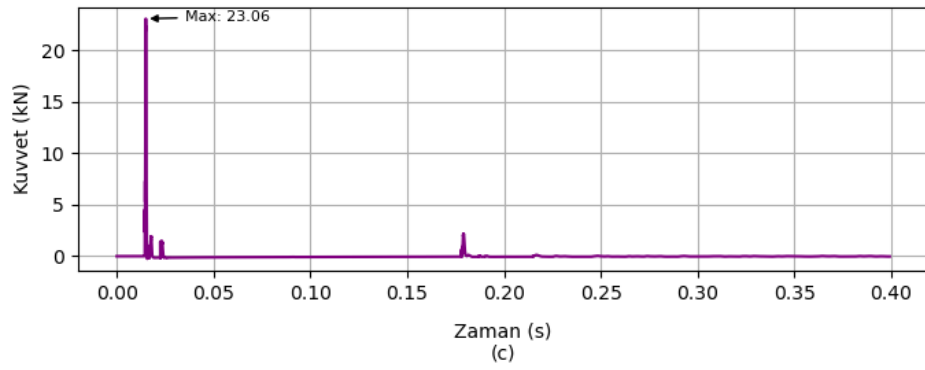
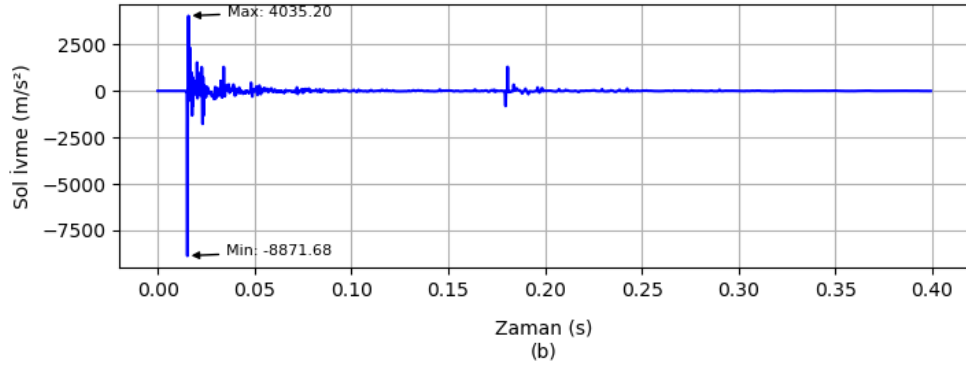
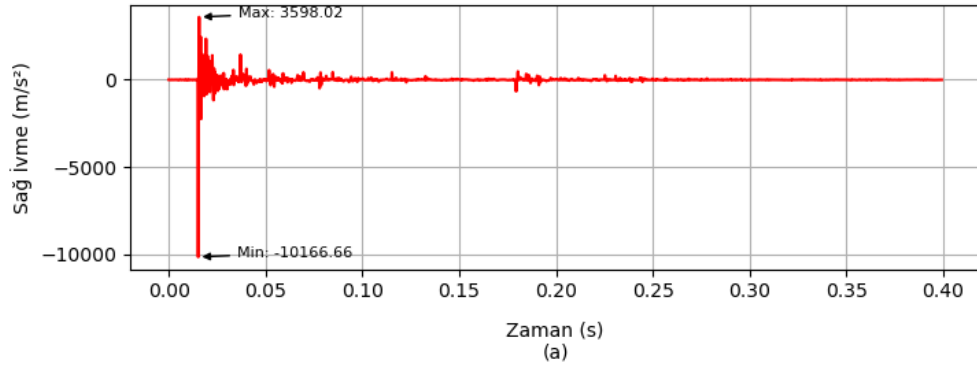
Şekil 4.31. B1-4 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-4 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.5'te verilmiştir.

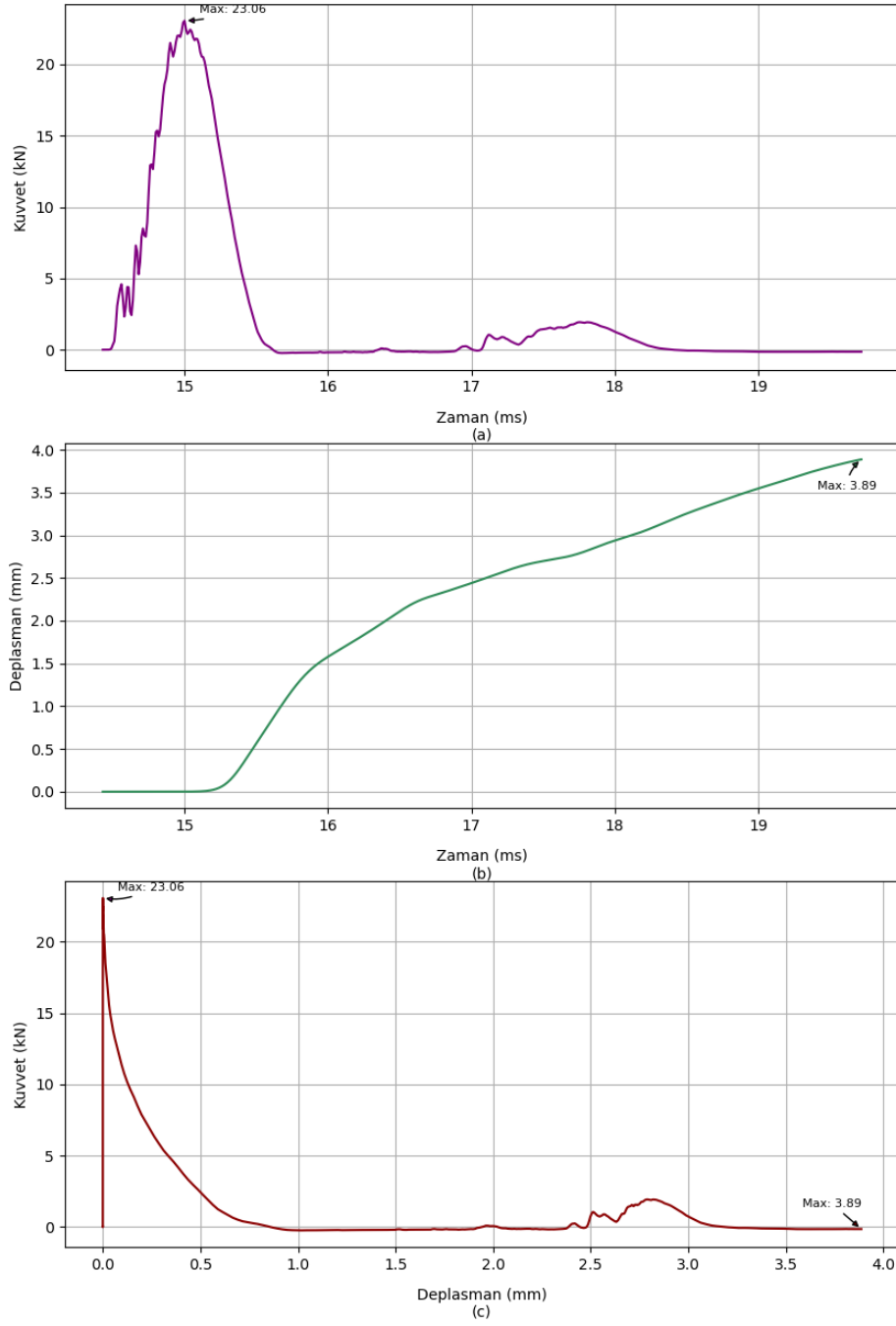
Tablo 4.5. B1-4 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3598,02	-10166,66	4035,20	-8871,68	3,89	23,06
Göçme	2552,15	-2963,97	1027,66	-1500,61	4,68	7,57

B1-4 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.32'de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.33'te gösterilmiştir.

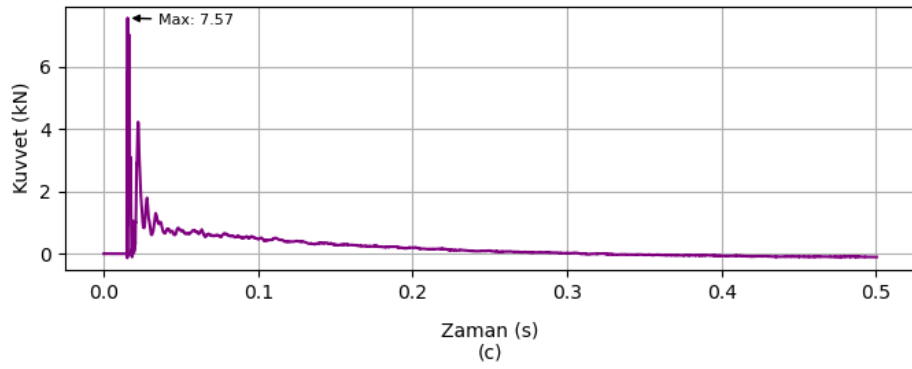
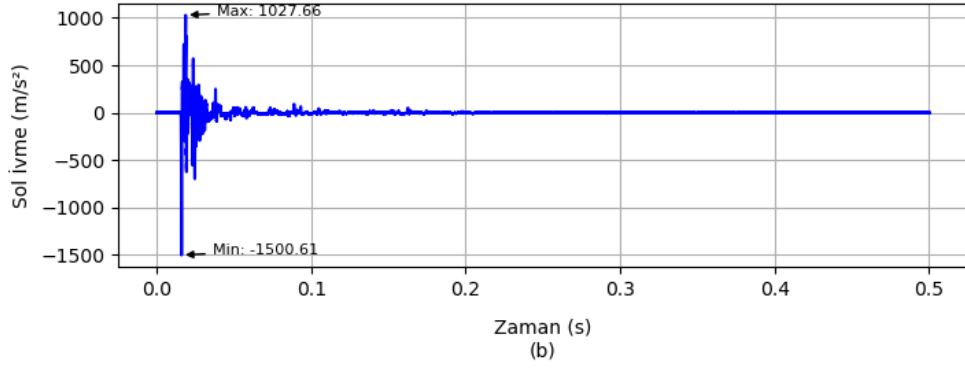
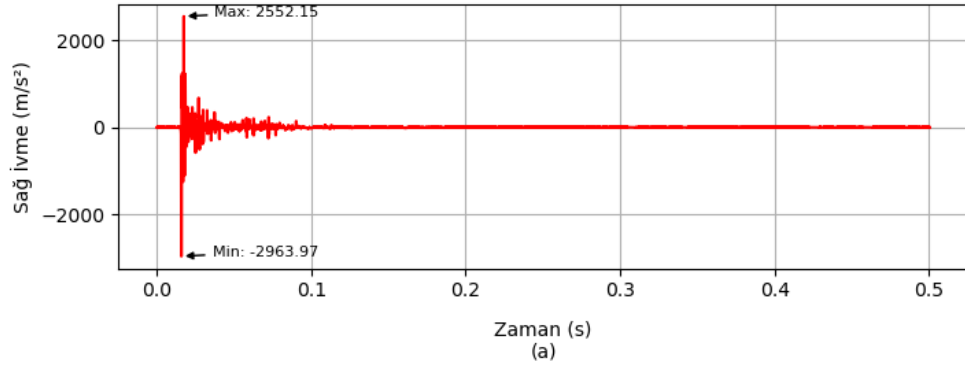


Şekil 4.32. B1-4 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

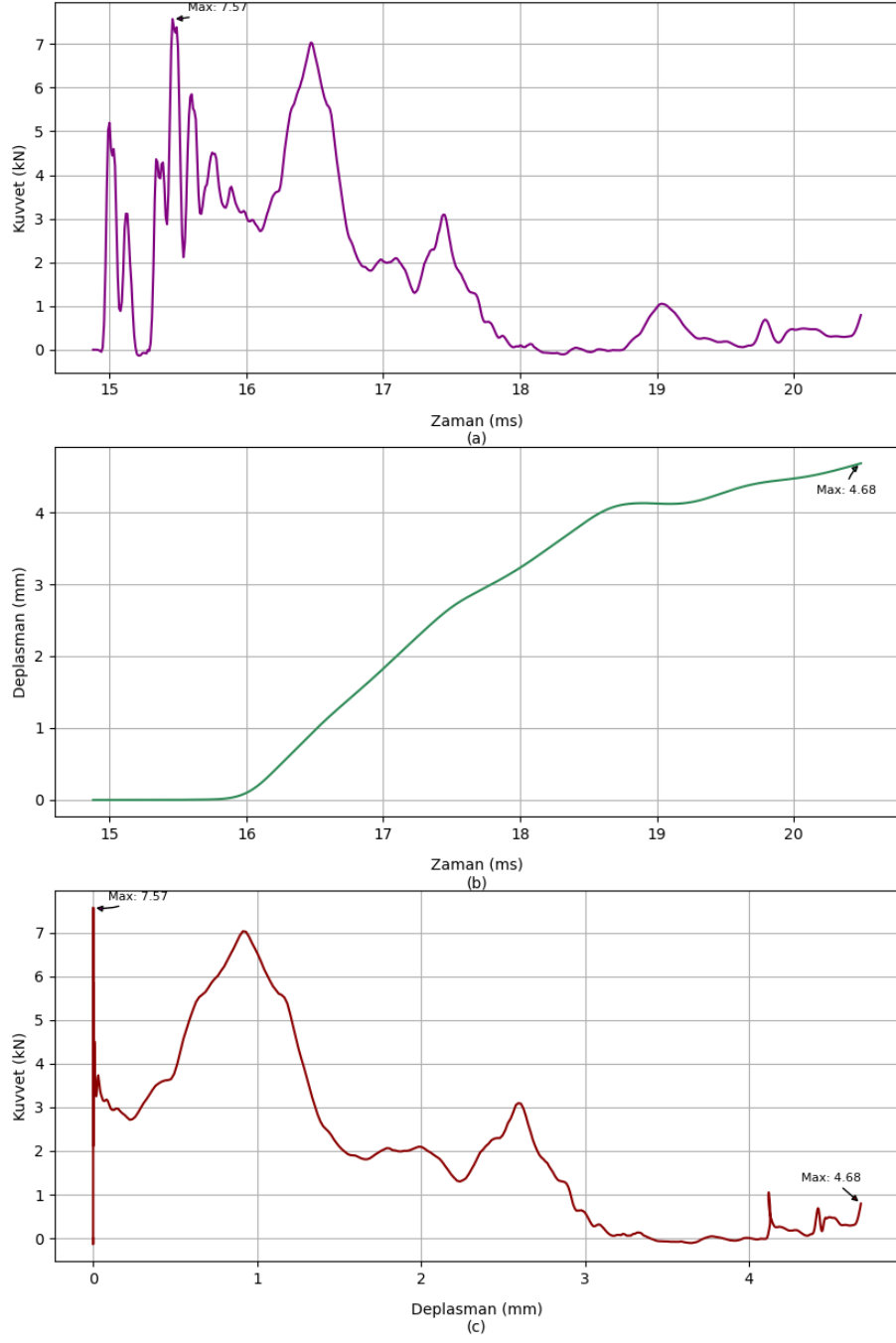


Şekil 4.33. B1-4 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-4 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.34'te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.35'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34. B1-4 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.35. B1-4 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

4.1.5. B1-5 Deney Elemanı

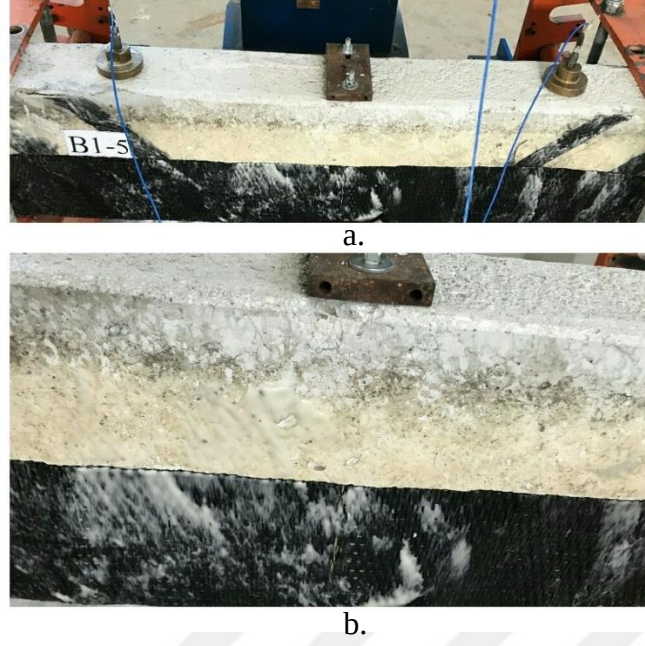
B1 grubundaki 45°/135° U şerit ve 90° yarım U sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-5 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit ve bu şeritlerin üzerine yan yüzeylerin yarısı ve alt yüzeyi kaplayan 90° yarım U sarım olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.36) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.36. B1-5 deney elemanı çarpma deneyi

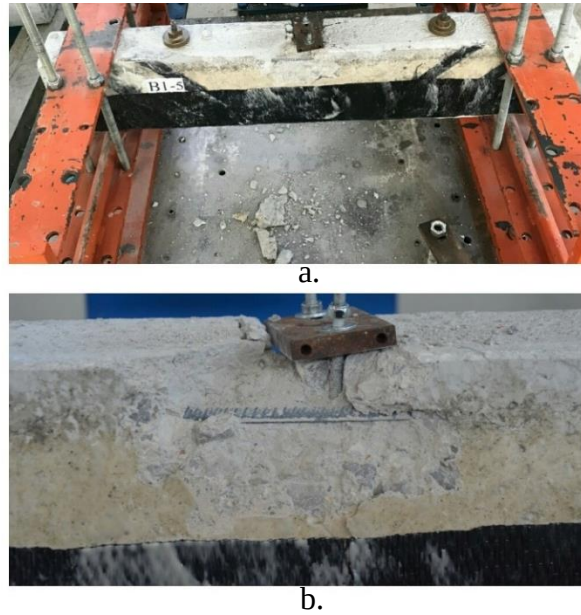
B1-5 deney elemanına 25 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 11. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın sağ ve sol tarafında 45 derecelik çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.37).

Deney sırasında kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çelik plakanın altında bulunan sol tarafa doğru hafif bir beton ezilmesi meydana gelmiştir.



Şekil 4.37. B1-5 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanında oluşan çatlaklarda herhangi bir değişiklik oluşmamış olup B1-4'dekine benzer ancak daha hafifi çelik plakanın bulunduğu kiriş üst orta bölgesinde ve kiriş yan yüzeylerinde beton örtüsü dökülmüş ve kiriş üst boyuna donatılarının aderans kaybı oluşması göçme hasarı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.38). Deney sonrası matris görünümü şekil 4.39'da gösterilmiştir.



Şekil 4.38. B1-5 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



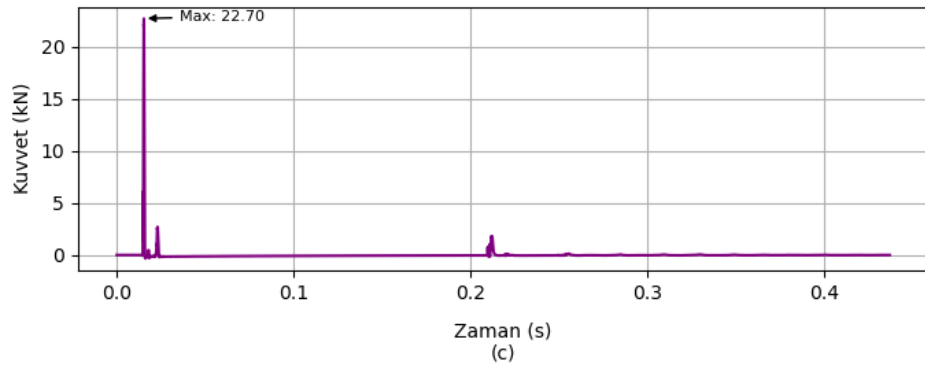
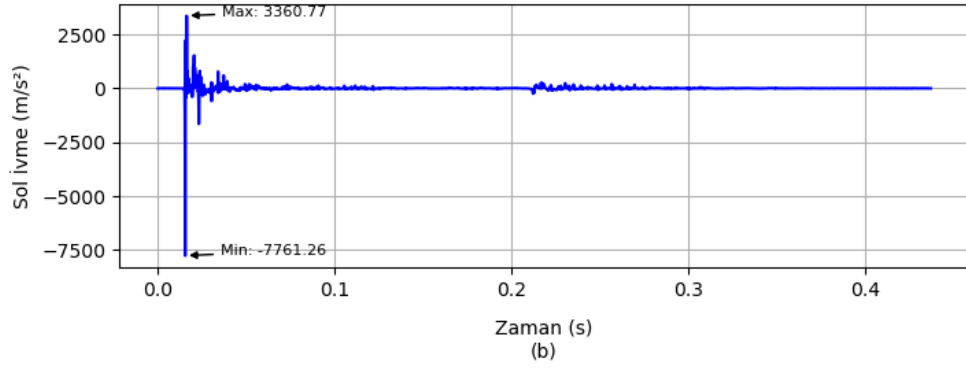
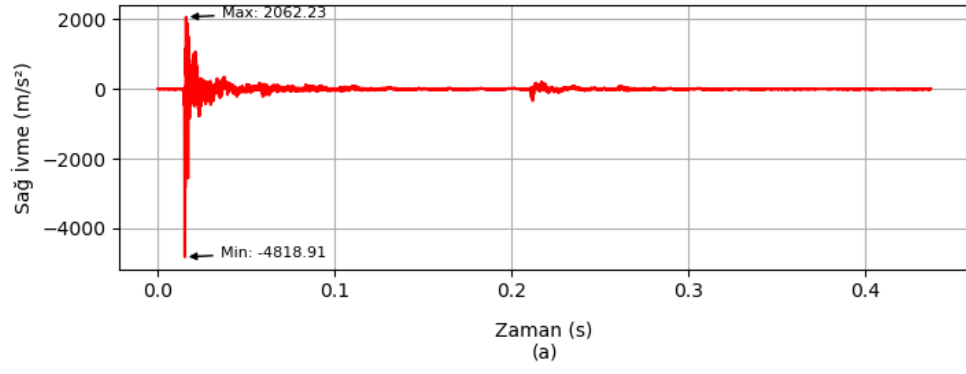
Şekil 4.39. B1-5 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-5 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.6’da verilmiştir.

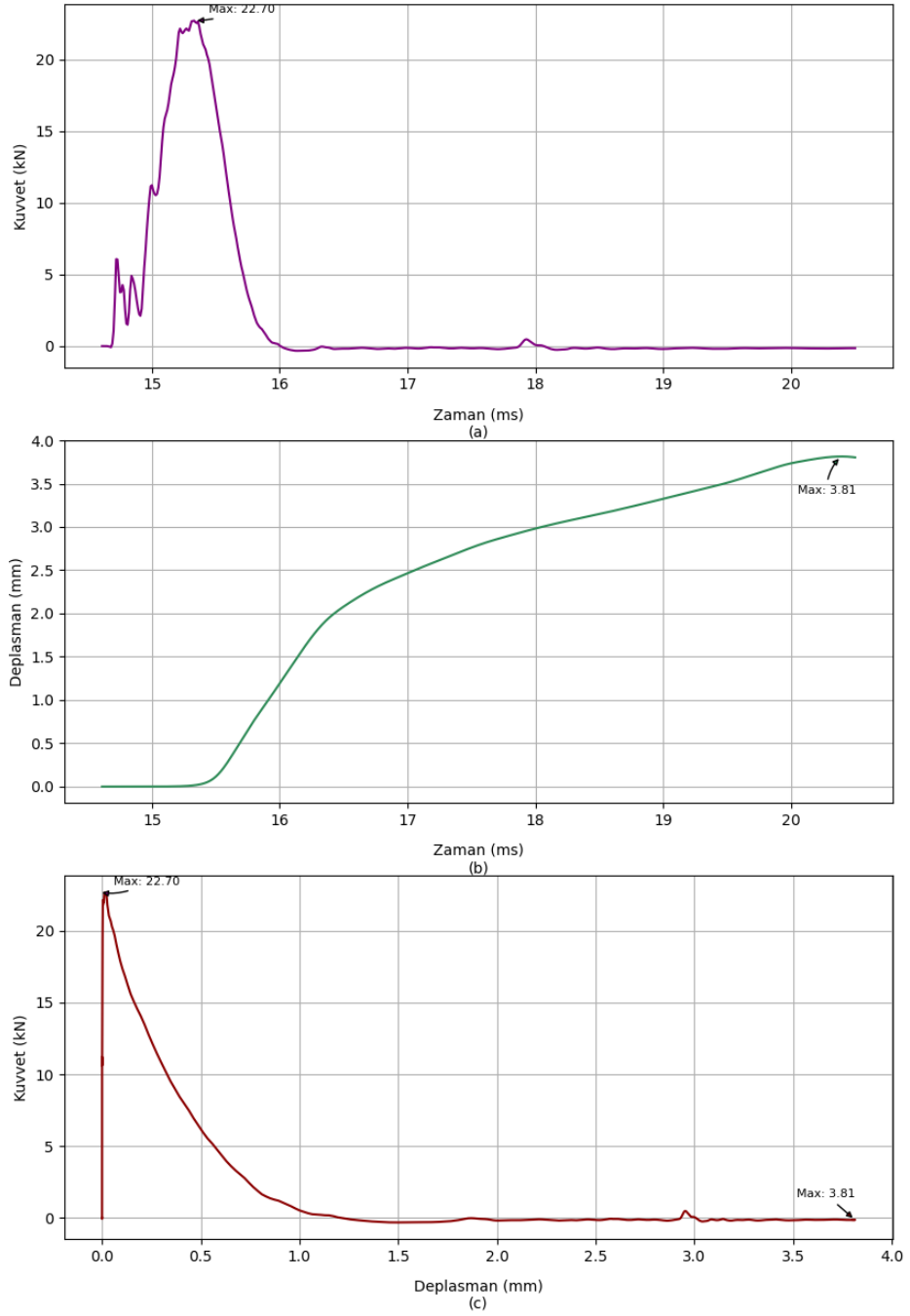
Tablo 4.6. B1-5 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2062,23	-4818,91	3360,77	-7761,26	3,81	22,70
Göçme	889,75	-809,19	3878,96	-3942,10	4,49	7,57

B1-5 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.40’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.41’de gösterilmiştir.

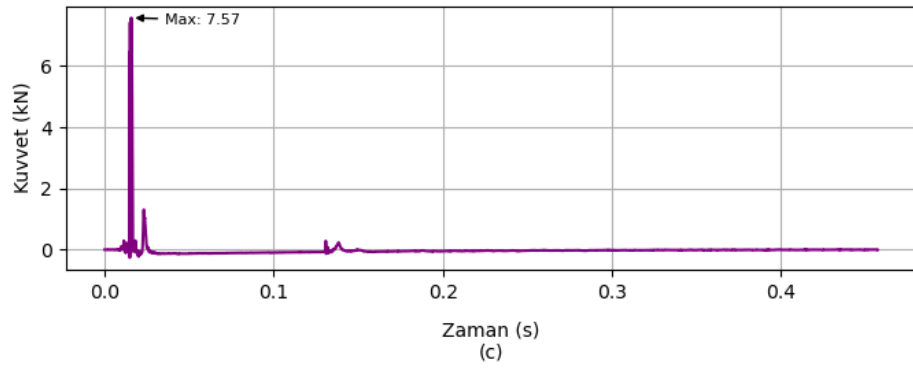
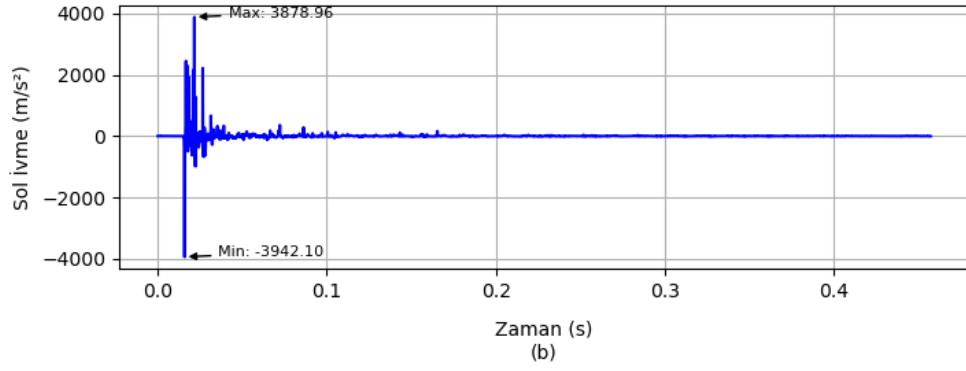
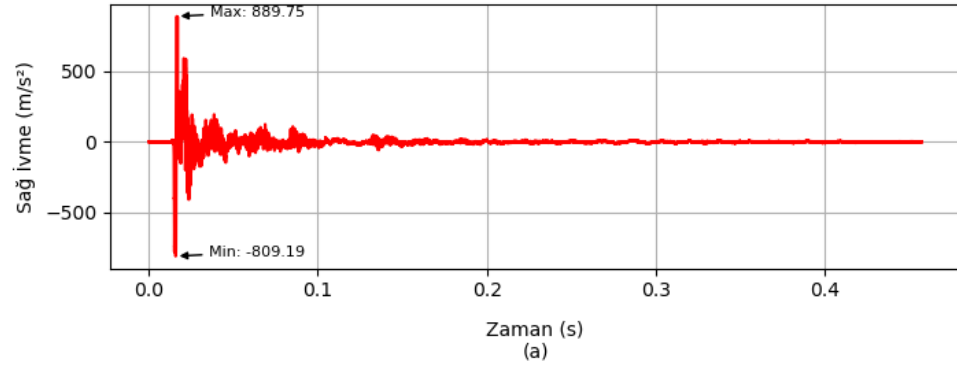


Şekil 4.40. B1-5 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

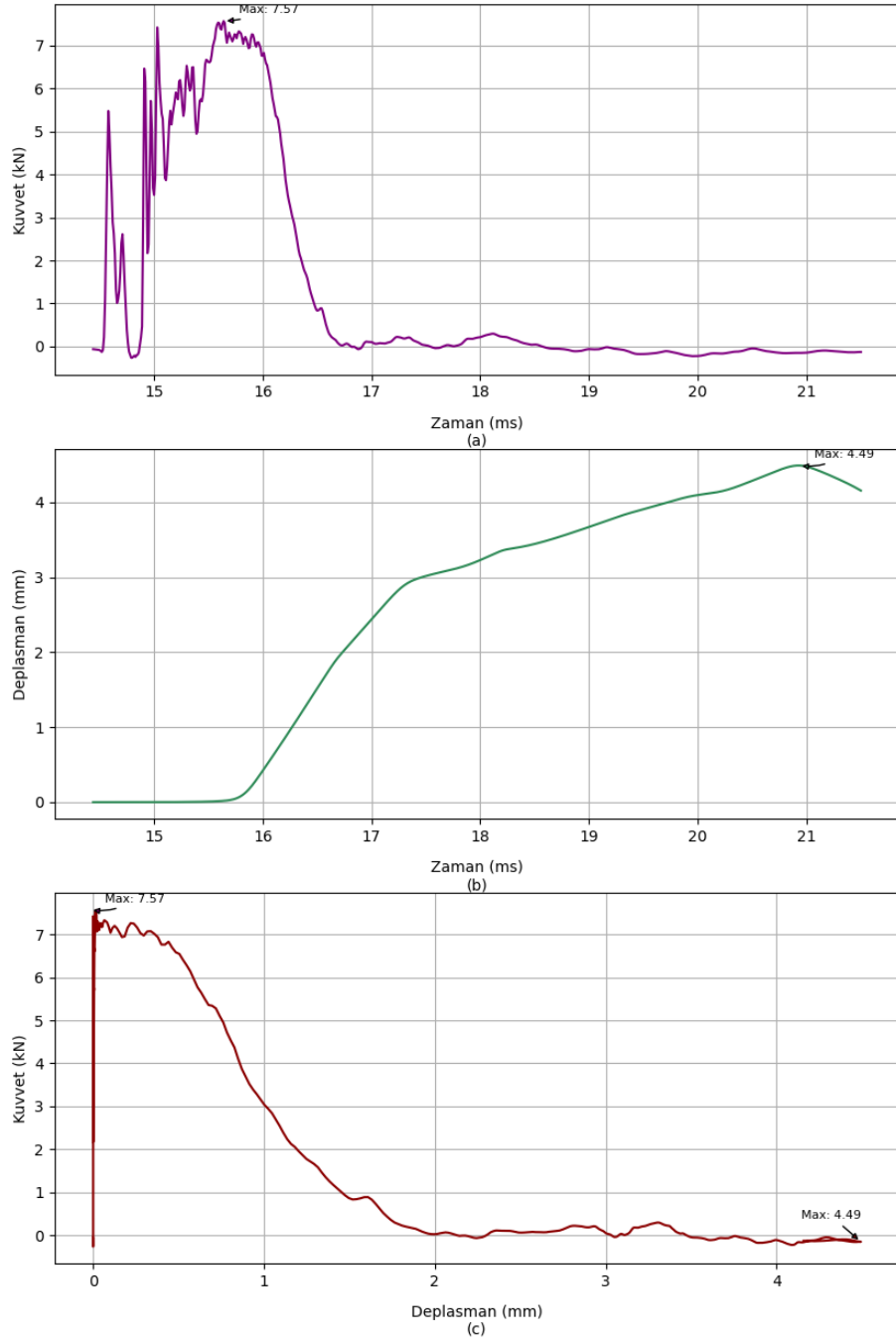


Şekil 4.41. B1-5 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-5 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.42’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.43’de gösterilmiştir.



Şekil 4.42. B1-5 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.43. B1-5 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

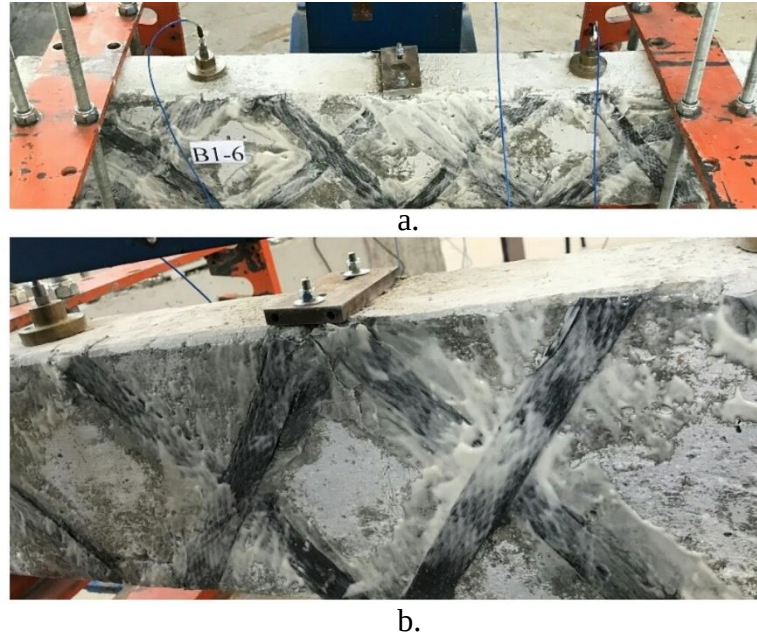
4.1.6. B1-6 Deney Elemanı

B1 grubundaki 45°/135° çapraz U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-6 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin yan yüzeyleri 45° ve 135° çapraz U şerit sarım olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.44) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



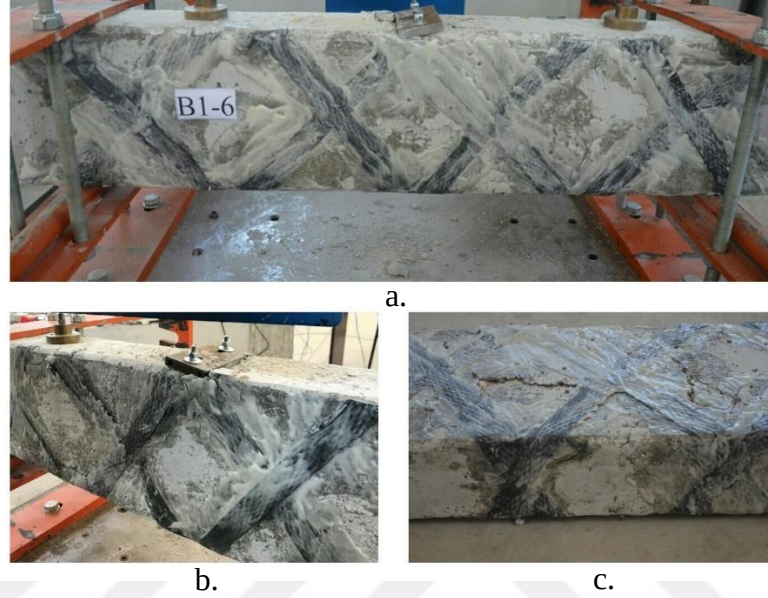
Şekil 4.44. B1-6 deney elemanı çarpma deneyi

B1-6 deney elemanına 36 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 20. düşmede almıştır. Çelik plaka alt bölgesinde sağ ve sol tarafta 45 derecelik çatlaklar oluşmuş ve plakanın alt bölgesinde bulunan betonda ezilme meydana gelmiştir (Şekil 4.45).

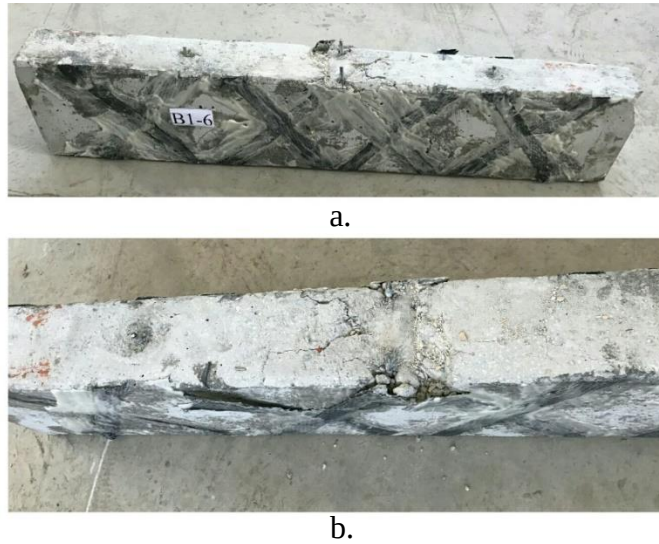


Şekil 4.45. B1-6 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında, kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe kiriş sol ve sağ tarafta simetrik şekilde kesme kırılmaları meydana gelmiştir. Kiriş alt bölgesinde de çatlaklar devam etmiştir (Şekil 4.46). B1-6 deney elemanında 36. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir. Deney sonrası matris görünümü şekil 4.47’de gösterilmiştir.



Şekil 4.46. B1-6 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



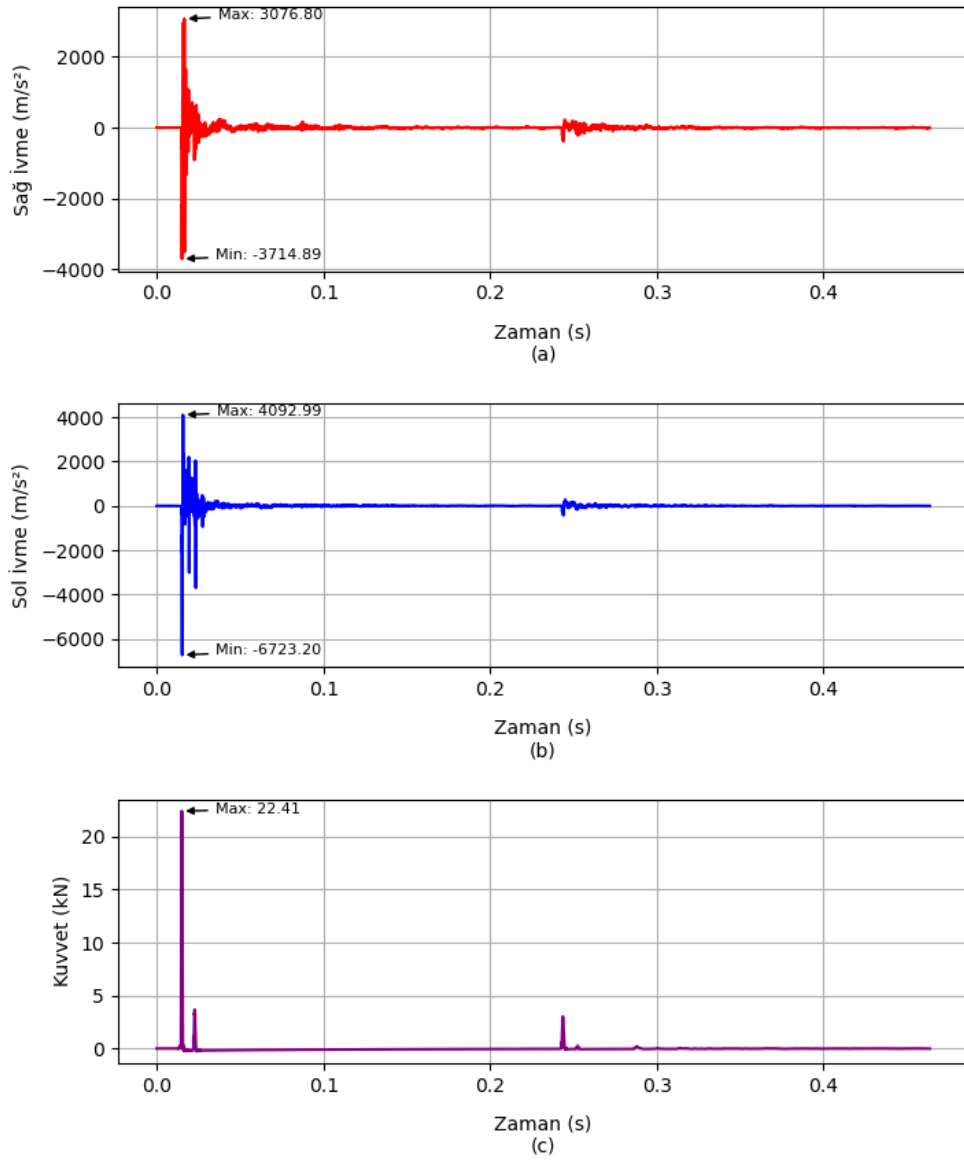
Şekil 4.47. B1-6 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-6 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.7’de verilmiştir.

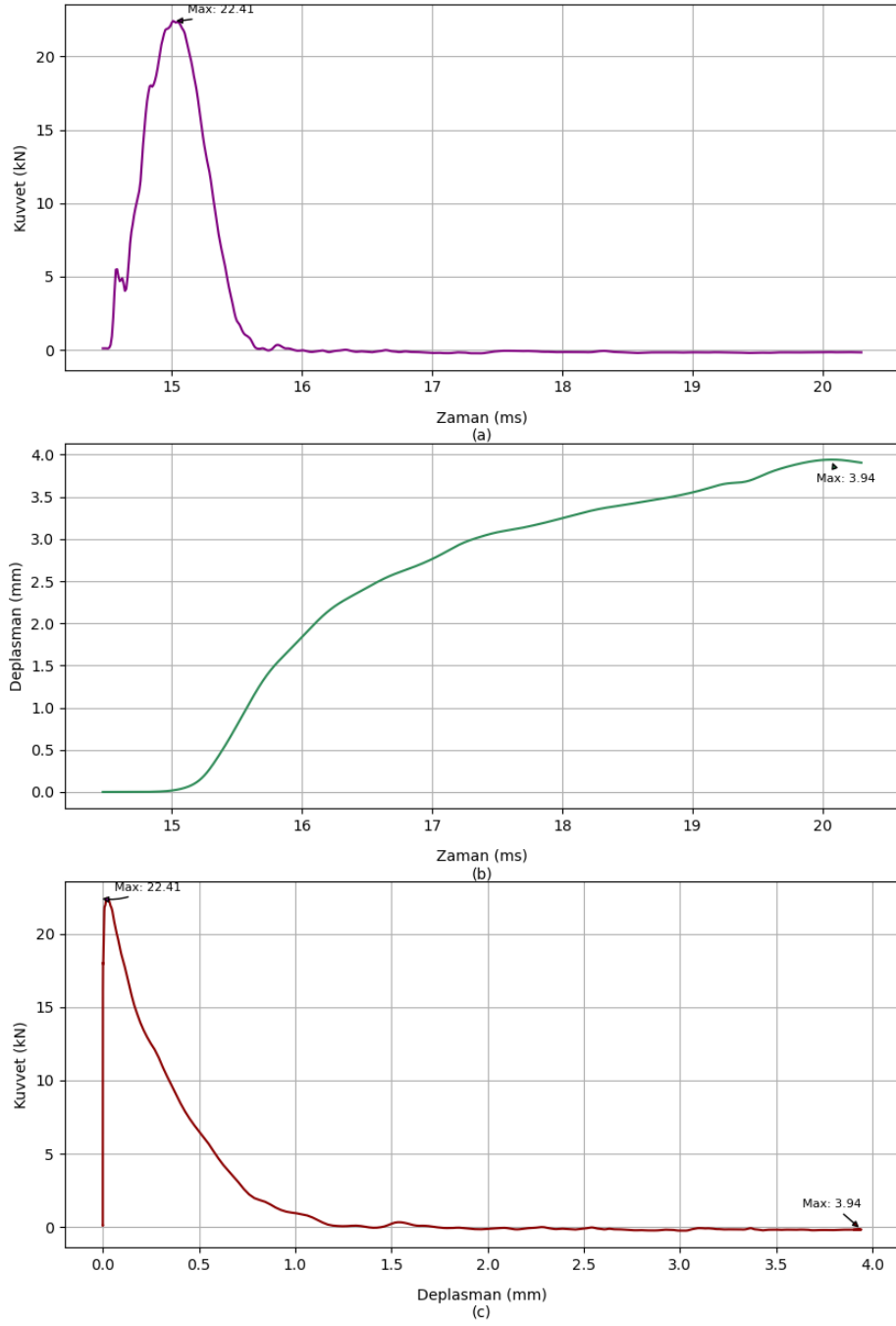
Tablo 4.7. B1-6 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3076,80	-3714,89	4092,99	-6723,20	3,94	22,41
Göçme	875,92	-2006,70	2722,21	-3330,03	5,05	13,76

B1-6 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.48’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.49’da gösterilmiştir.

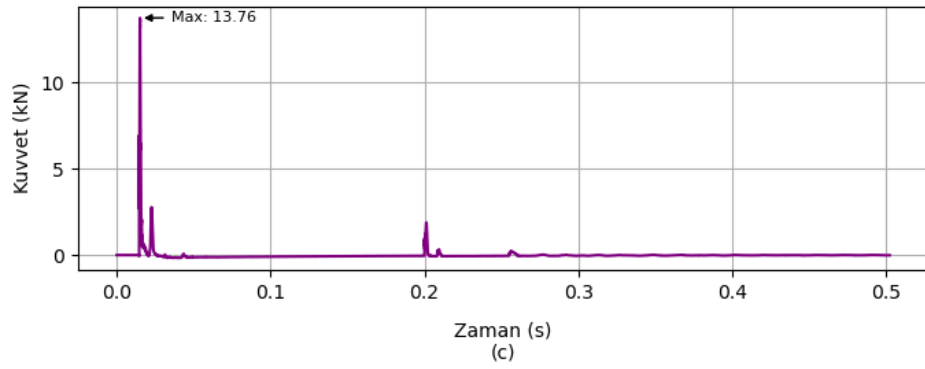
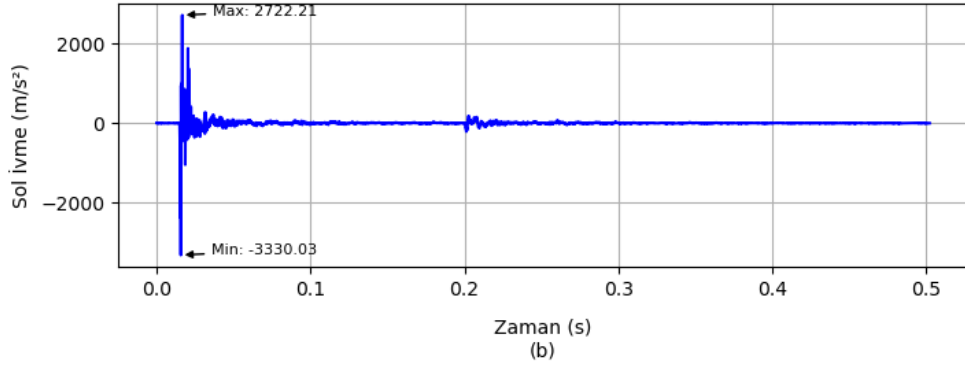
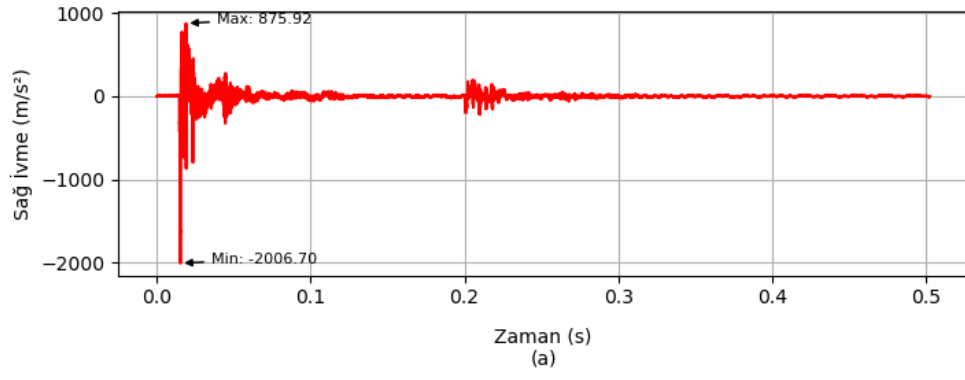


Şekil 4.48. B1-6 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

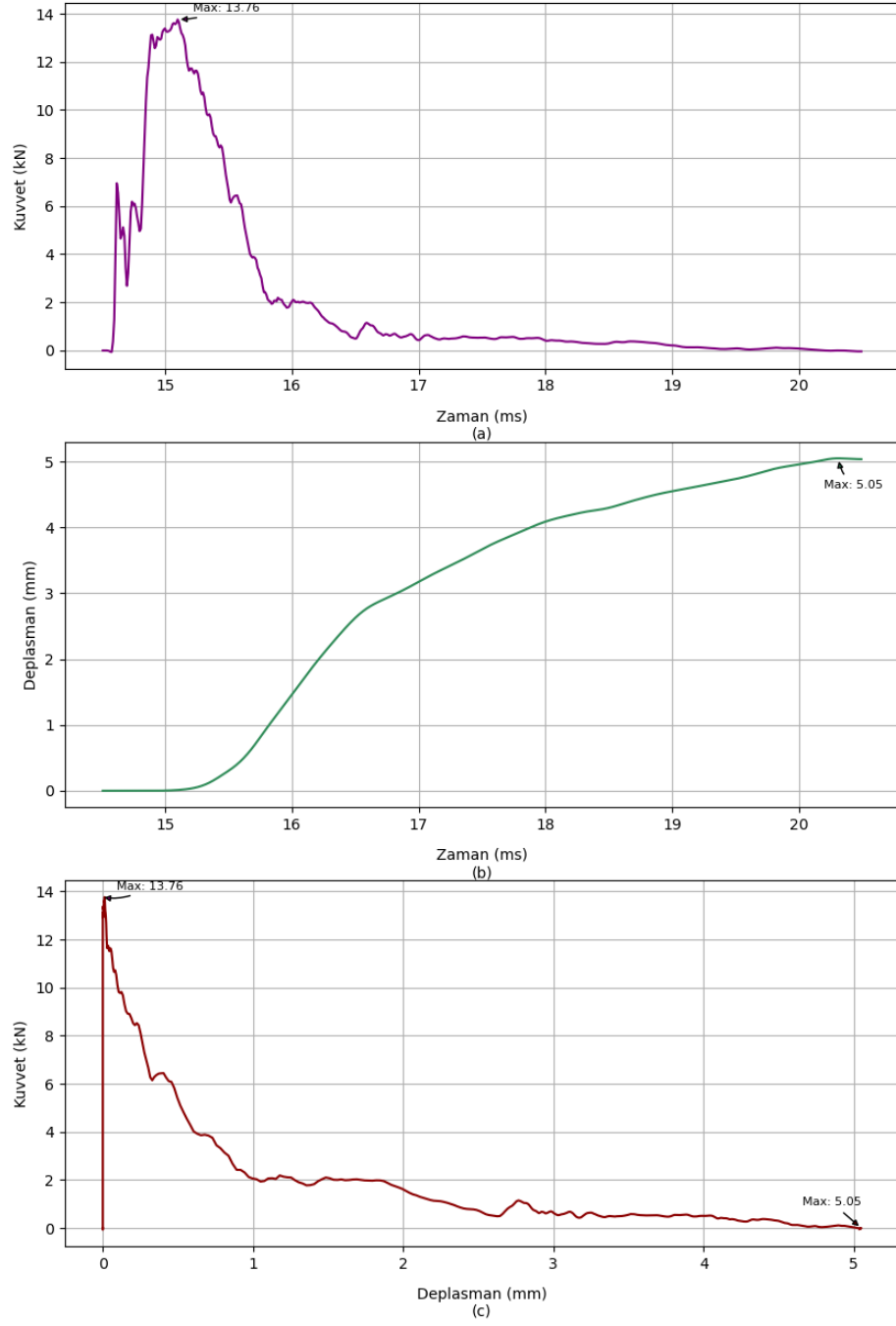


Şekil 4.49. B1-6 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-6 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.50’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.51’de gösterilmiştir.



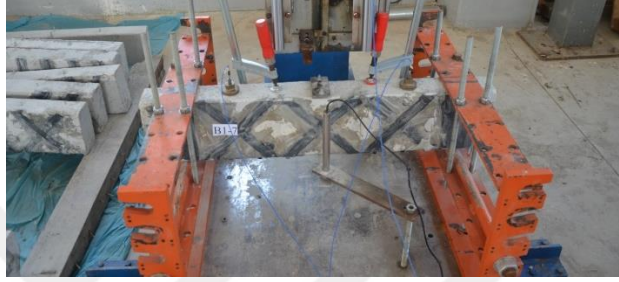
Şekil 4.50. B1-6 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.51. B1-6 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

4.1.7. B1-7 Deney Elemanı

B1 grubundaki 45°/135° U şerit ve 90° U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B1-7 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişin sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit ve kalan açıklık bölgesinde 45° ve 135° çapraz U şerit sarım olacak şekilde yapıştırılacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.52) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.52. B1-7 deney elemanı çarpma deneyi

B1-7 deney elemanına 28 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 14. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın sağ ön tarafından CFRP kumaşa doğru çatlak oluşumu meydana gelmiş olup CFRP sıyrılması görülmüştür, aynı zamanda çelik plakanın olduğu bölgede beton ezilmesi meydana gelmiştir (Şekil 4.53).



b.

Şekil 4.53. B1-7 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında, kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe hasar büyümüştür. Ön ve arka orta bölgedeki CFRP kumaşların betonla birlikte kopması meydana gelmiş ve hem solda hem sağda CFRP şerit bulunmayan bölgelerde 45 derecelik hafif çatlaklar görülmüştür. B1-7 deney elemanında 28. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.54). Deney sonrası matris görünümü şekil 4.55'te gösterilmiştir.



Şekil 4.54. B1-7 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



a.



b.

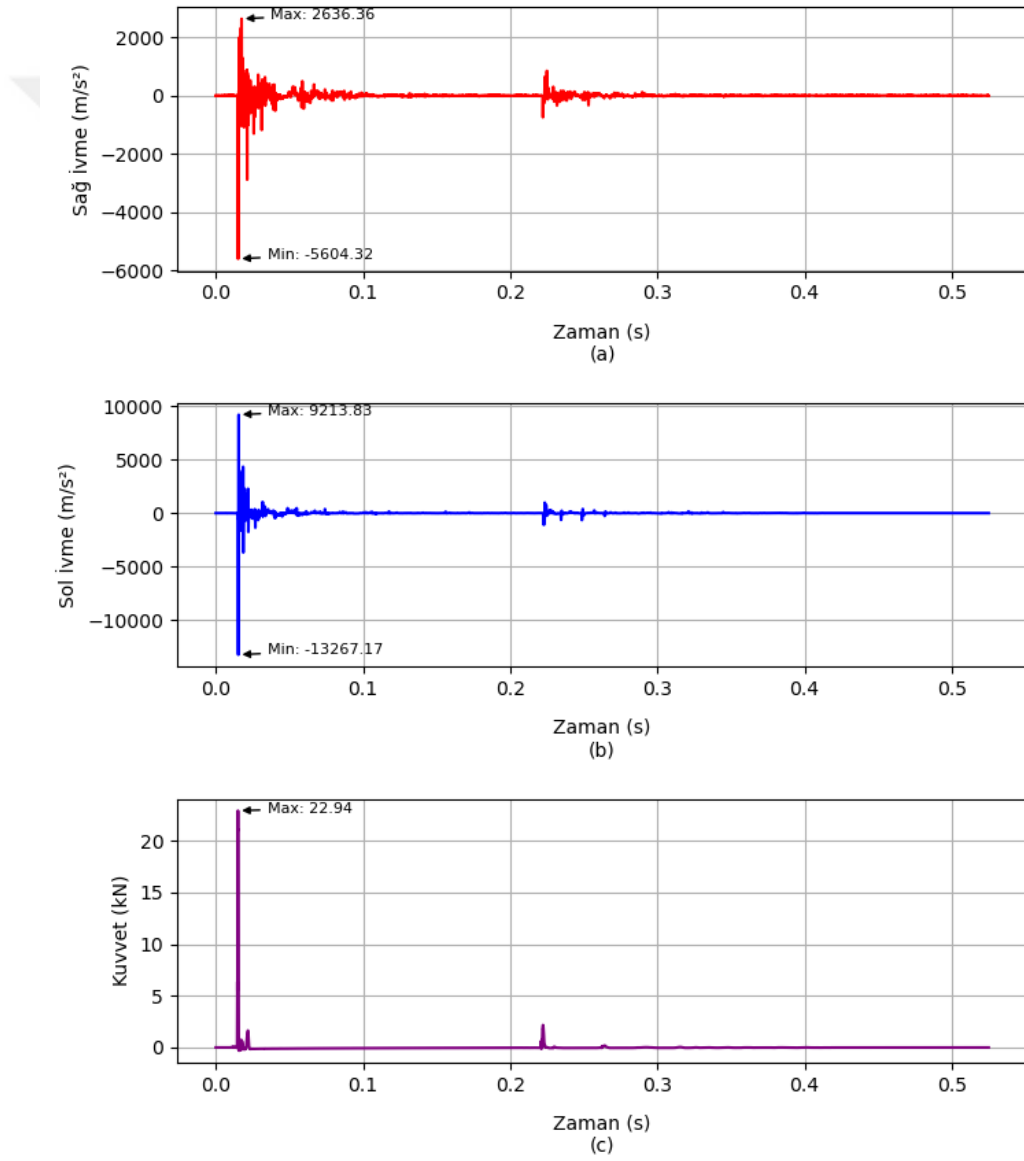
Şekil 4.55. B1-7 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B1-7 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.8'de verilmiştir.

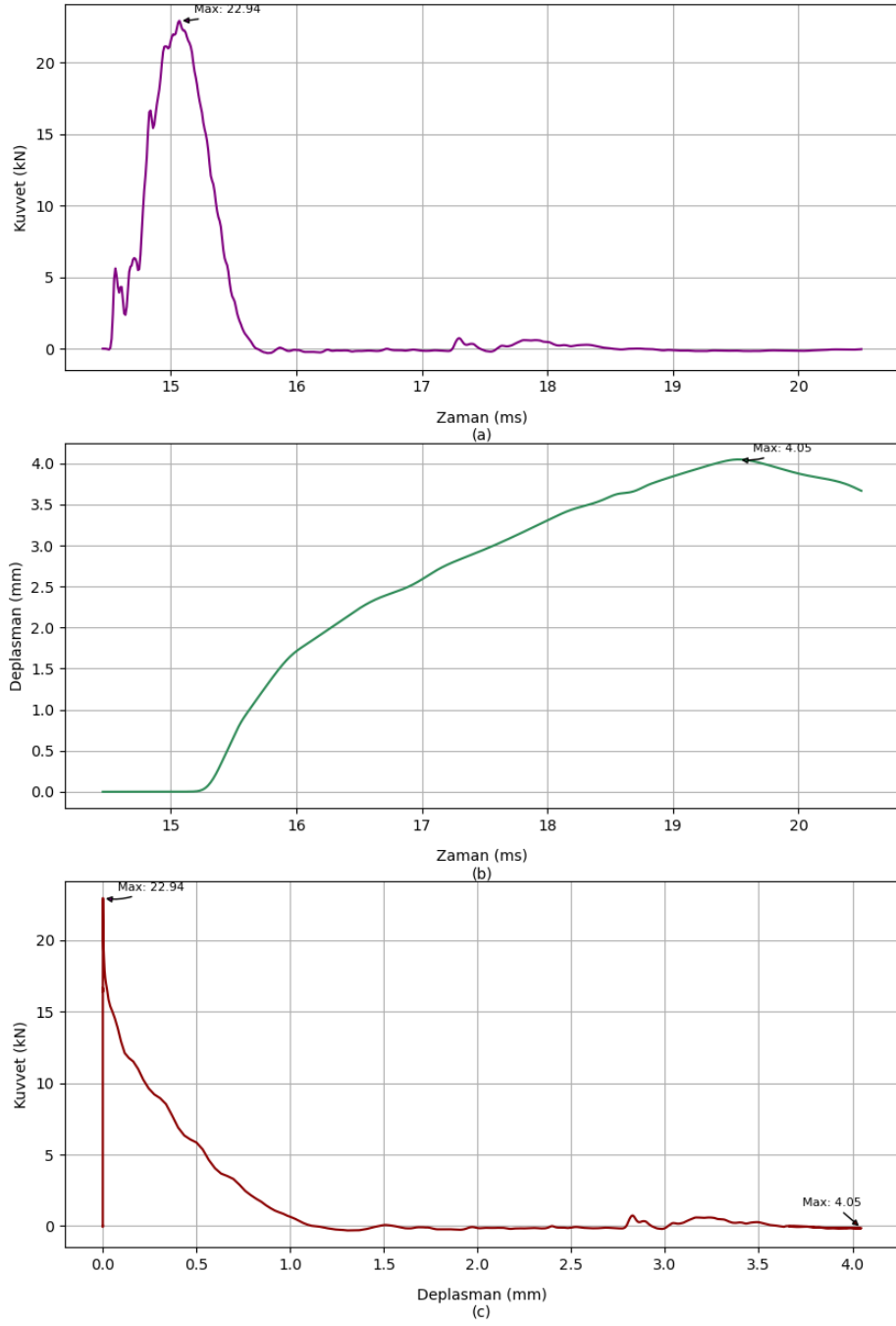
Tablo 4.8. B1-7 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2636,36	-5604,32	9213,83	-13267,17	4,05	22,94
Göçme	2585,36	-4519,21	7593,19	-10760,75	5,68	14,30

B1-7 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.56’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.57’de gösterilmiştir.

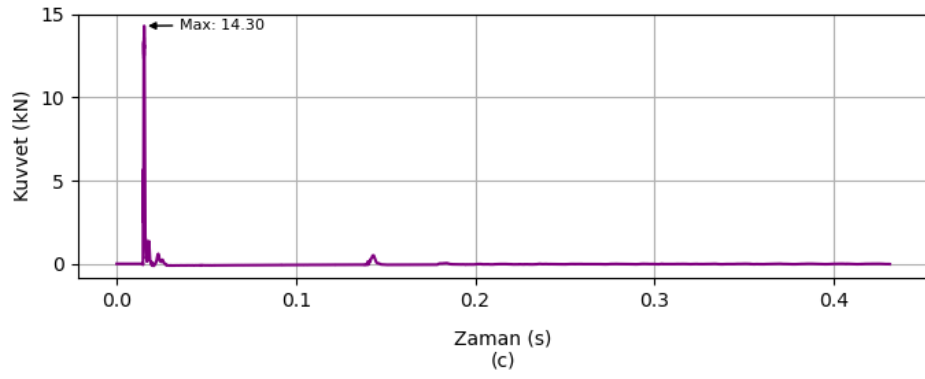
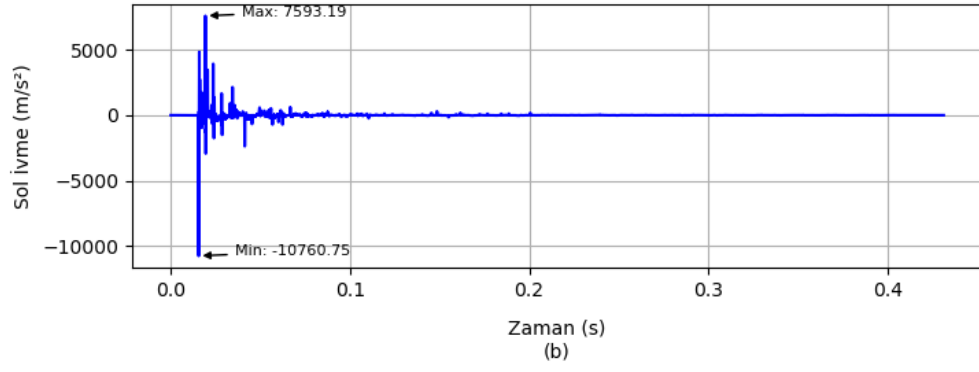
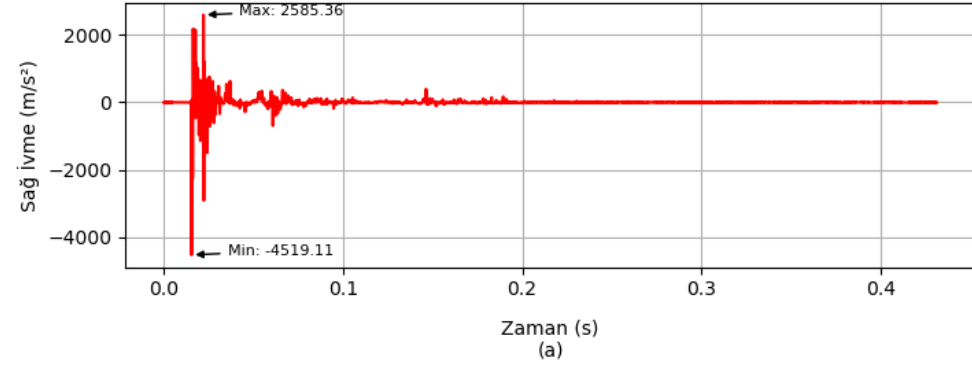


Şekil 4.56. B1-7 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

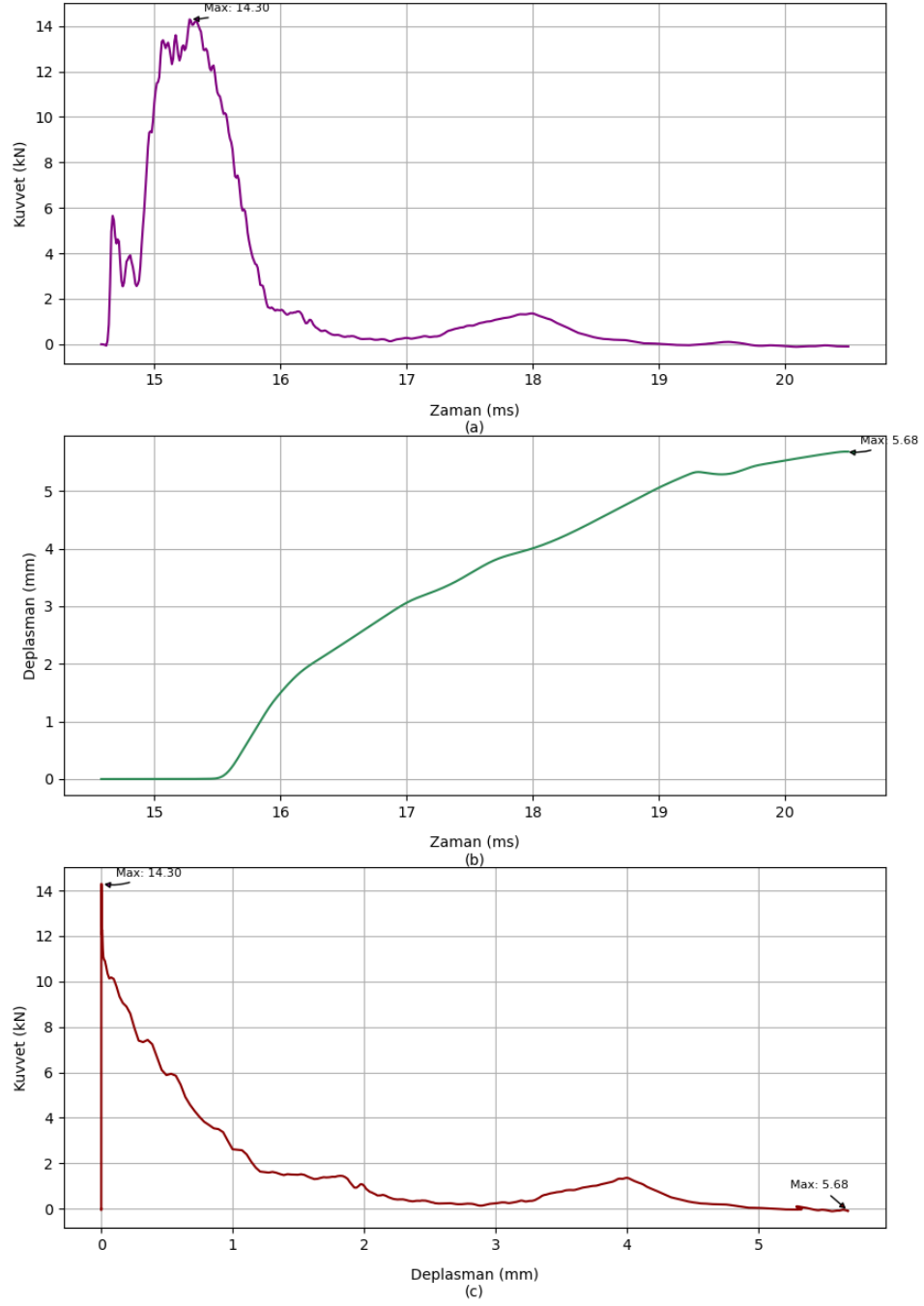


Şekil 4.57. B1-7 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B1-7 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.58’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.59’da gösterilmiştir.



Şekil 4.58. B1-7 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.59. B1-7 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

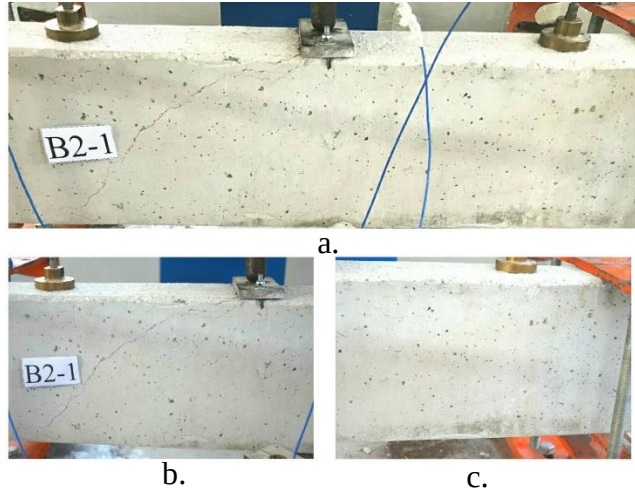
4.1.8. B2-1 Deney Elemanı

B2 grubundaki B2-1 deney elemanına herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmamış olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.60) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.60. B2-1 deney elemanı çarpma deneyi

B2-1 deney elemanına 8 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 4. düşmede almıştır (Şekil 4.61). Çekicinin plakaya çarptığı noktadan başlayarak sol mesnete doğru yaklaşık 5 cm yatay çatlak oluşumu ve devamında sol ivmeölçer hizasında alt bölgeye kadar kesme çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.61.c). Kiriş açıklık bölgesinde de diğer çatlak kadar belirgin olmayan çatlak tespit edilmiştir (Şekil 4.61). Aynı zamanda sağ mesnete doğru da benzer çatlaklar gözlenmiş olup soldakiler kadar belirgin olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.61. B2-1 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında, kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çatlaklar çok daha belirginleşmiştir. B2-1 deney elemanında 8. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.62). Plakanın bulunduğu bölgede beton dökülmesi meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.63'te gösterilmiştir.



a.



b.

Şekil 4.62. B2-1 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



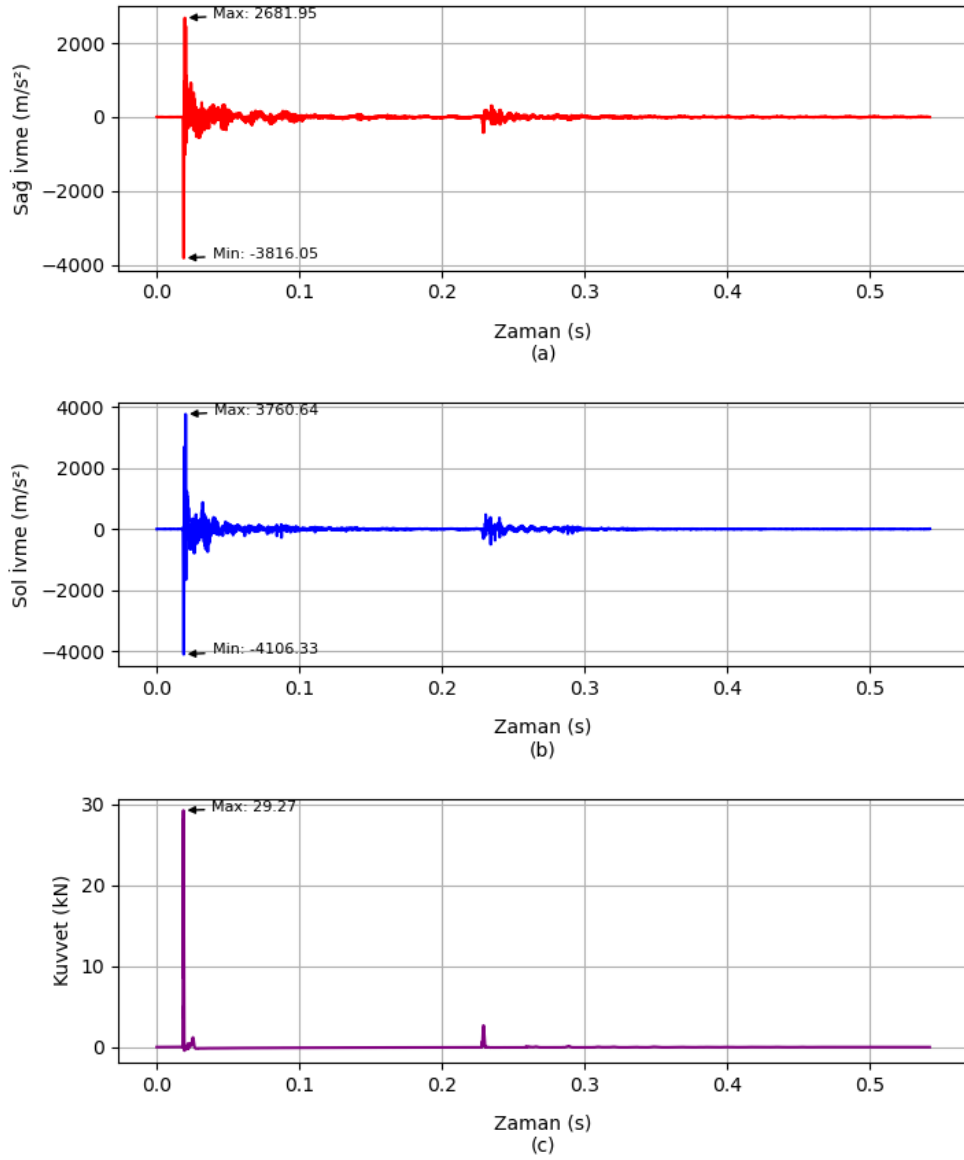
Şekil 4.63. B2-1 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-1 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.9'da verilmiştir.

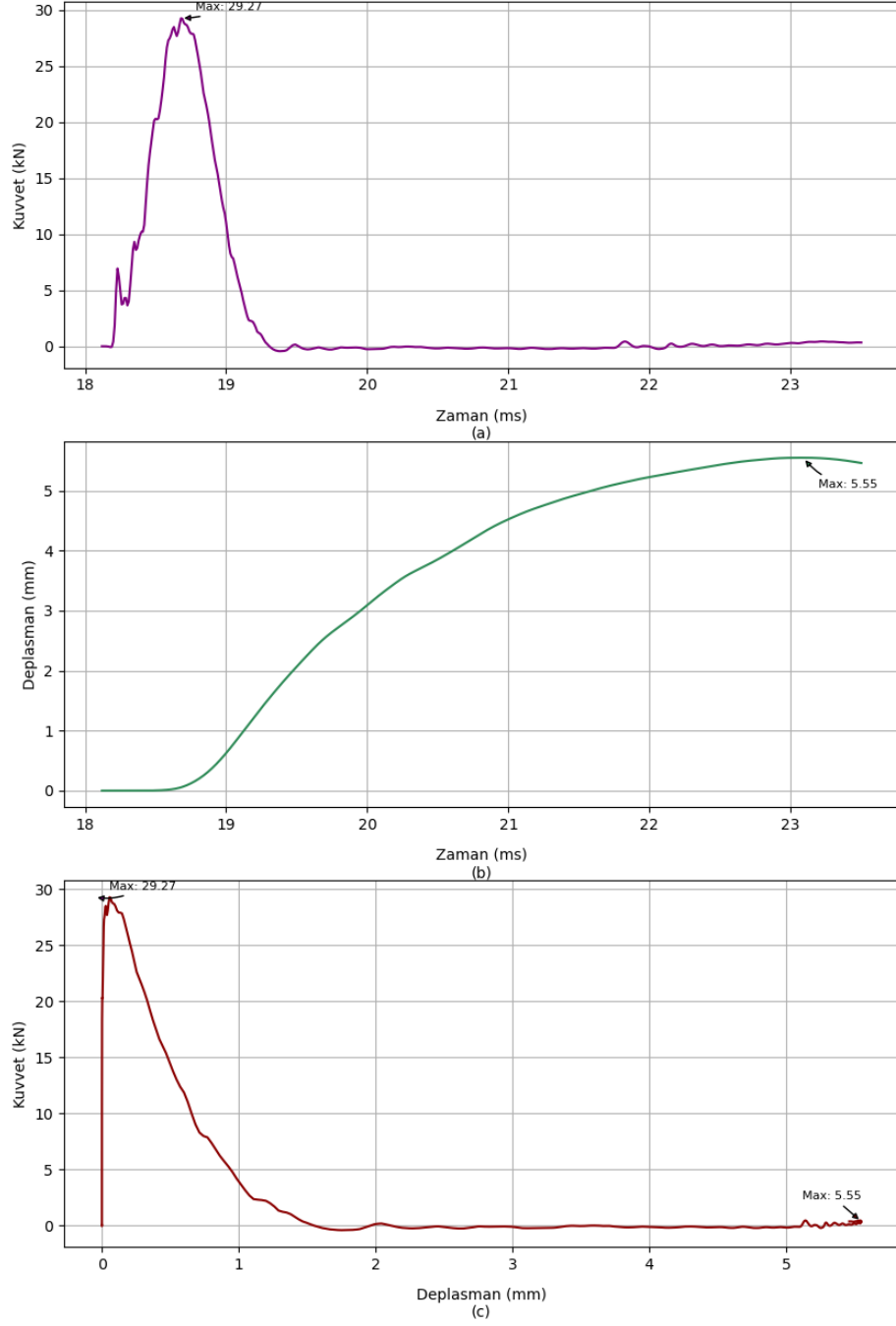
Tablo 4.9. B2-1 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2681,95	-3816,05	3760,64	-4106,33	5,55	29,27
Göçme	3418,72	-3729,04	4220,68	-2313,31	7,27	24,40

B2-1 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.64'te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.65'te gösterilmiştir.

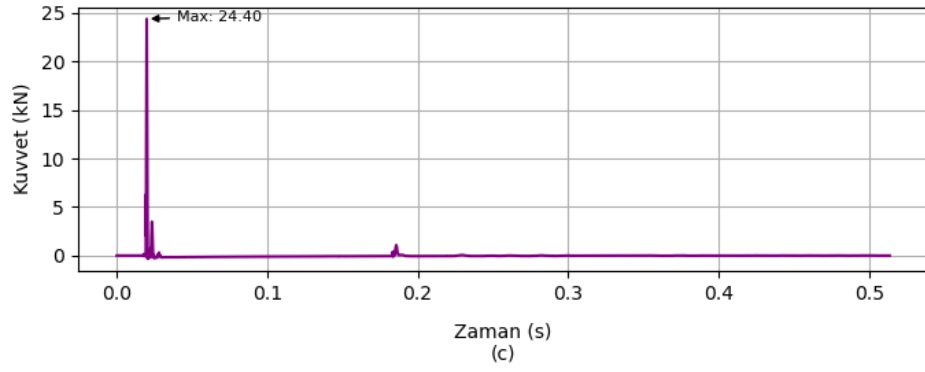
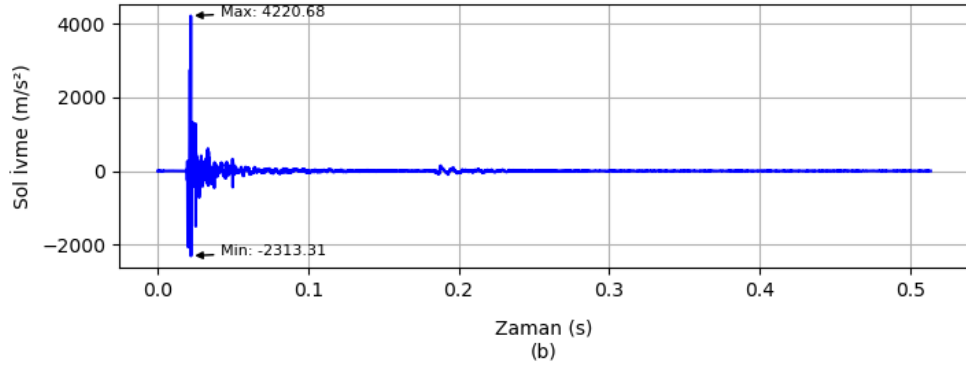
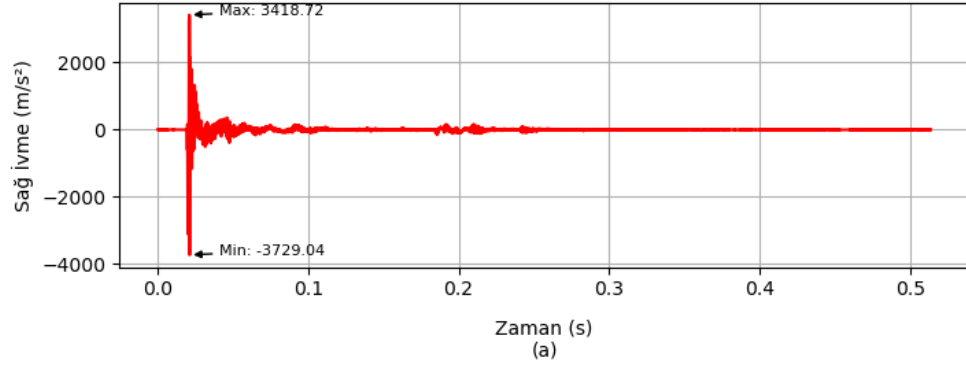


Şekil 4.64. B2-1 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

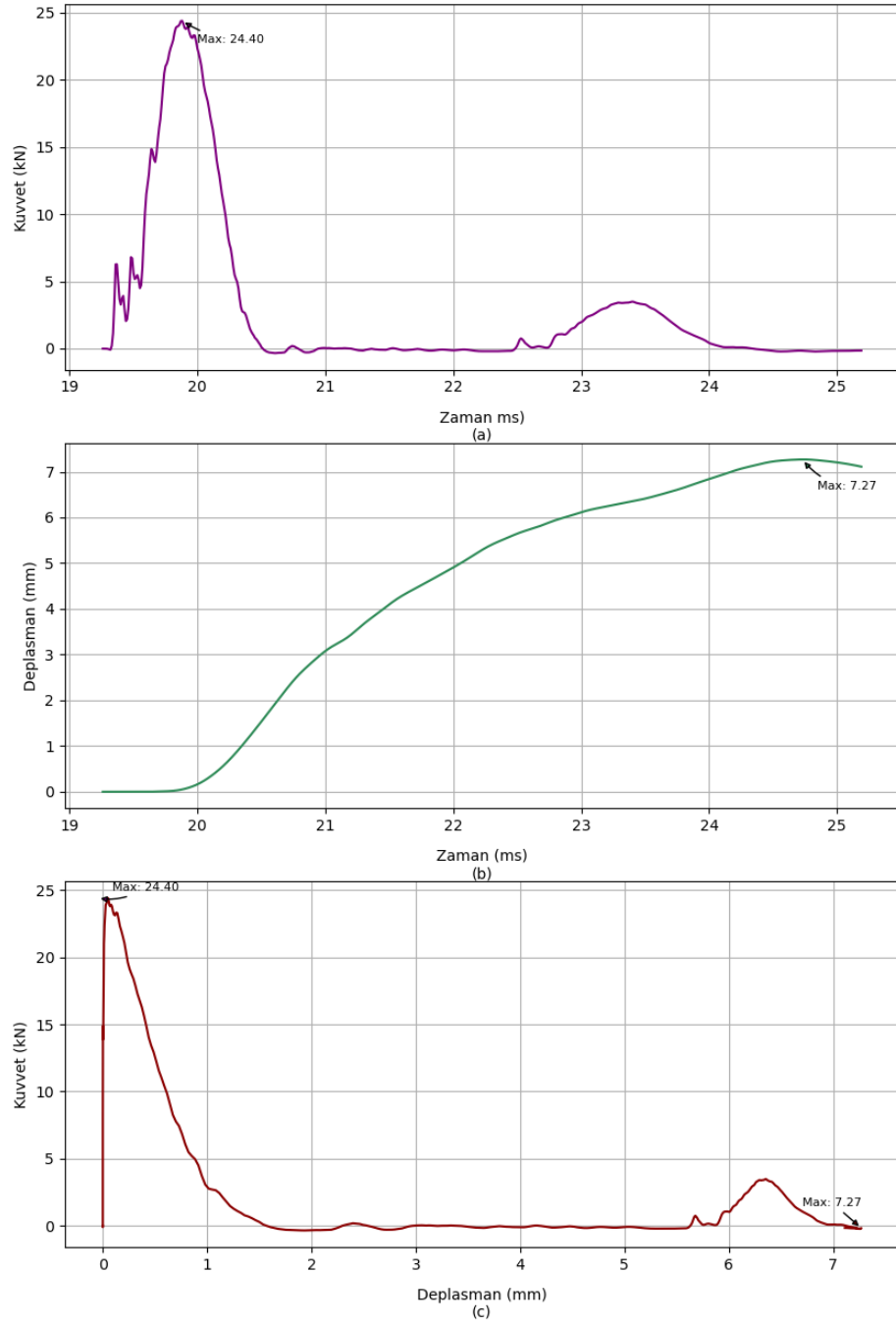


Şekil 4.65. B2-1 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-1 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.66’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.67’de gösterilmiştir.



Şekil 4.66. B2-1 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.67. B2-1 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

4.1.9. B2-2 Deney Elemanı

B2 grubundaki 90° U sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-2 deney elemanı CFRP doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U sarım ile güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.68) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.68. B2-2 deney elemanı çarpma deneyi

B2-2 deney elemanına 17 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 8. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın ön-arka, sağ ve sol tarafından CFRP kumaşa doğru çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.69).



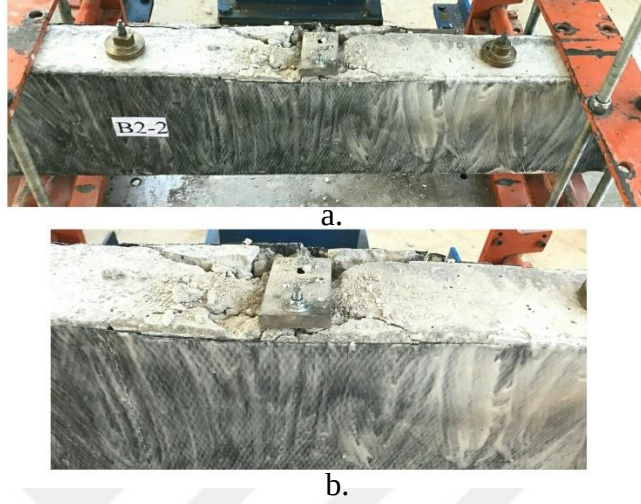
a.



b.

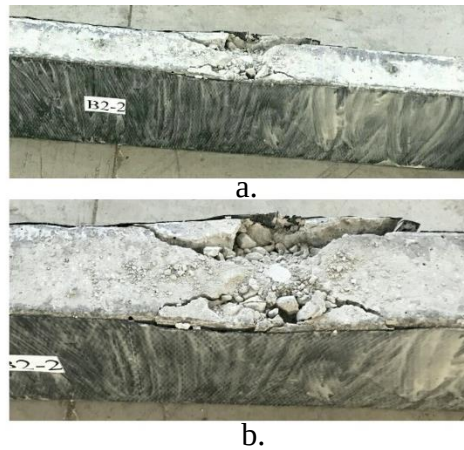
Şekil 4.69. B2-2 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında oluşan ilk çatlaklar kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çok daha belirginleşmiştir. B2-2 deney elemanında 17. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.70). Göçme durumunda sol ön ve sağ arkada CFRP kumaş yırtılması meydana gelmiştir (Şekil 4.70).



Şekil 4.70. B2-2 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu

Kirişin kesme ve alt bölgesinde herhangi bir çatlak, hasar veya CFRP yırtılması tespit edilmemiştir. Plakanın alt bölgesi ve çatlak oluşumunun meydana geldiği bölgelerde beton dökülmesi meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.71’de gösterilmiştir.



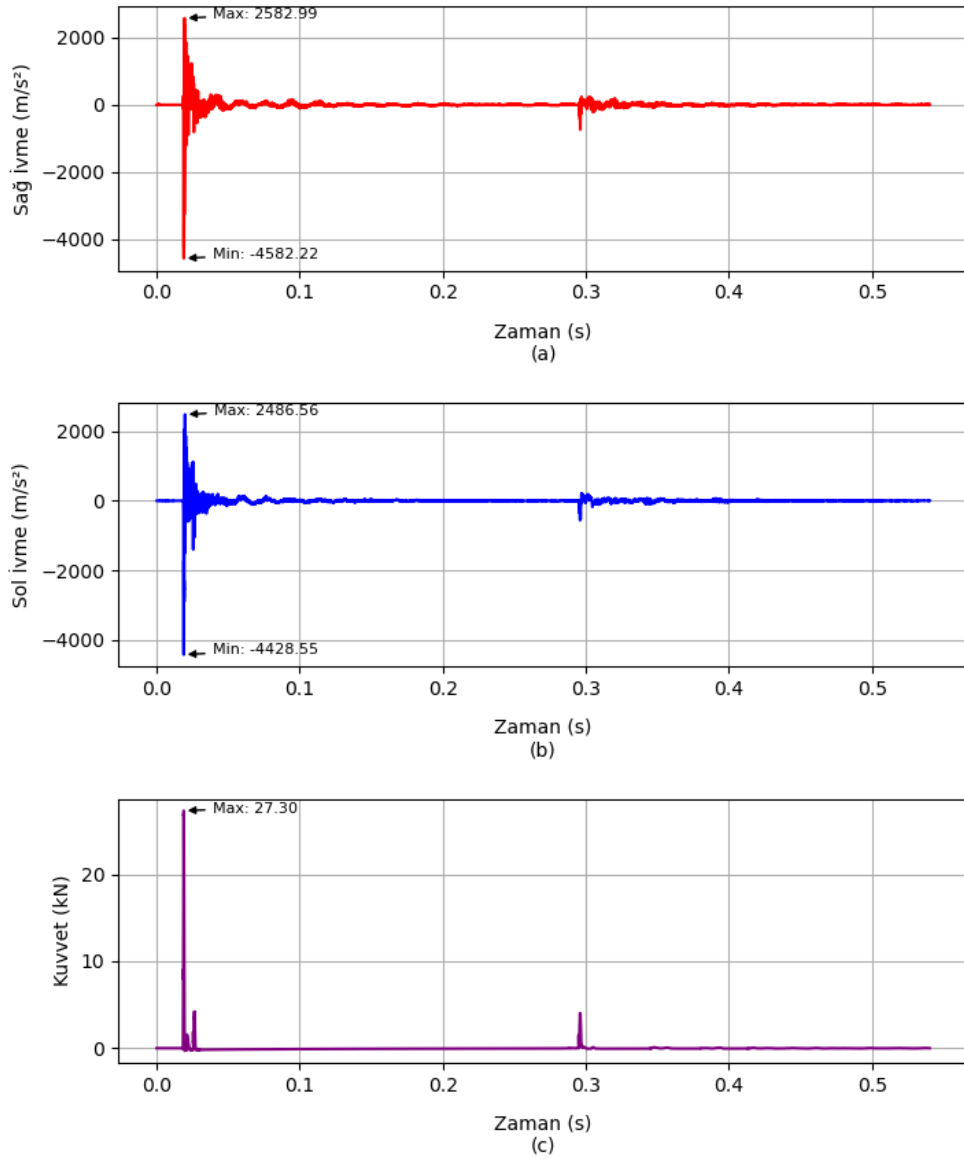
Şekil 4.71. B2-2 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-2 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.10’da verilmiştir.

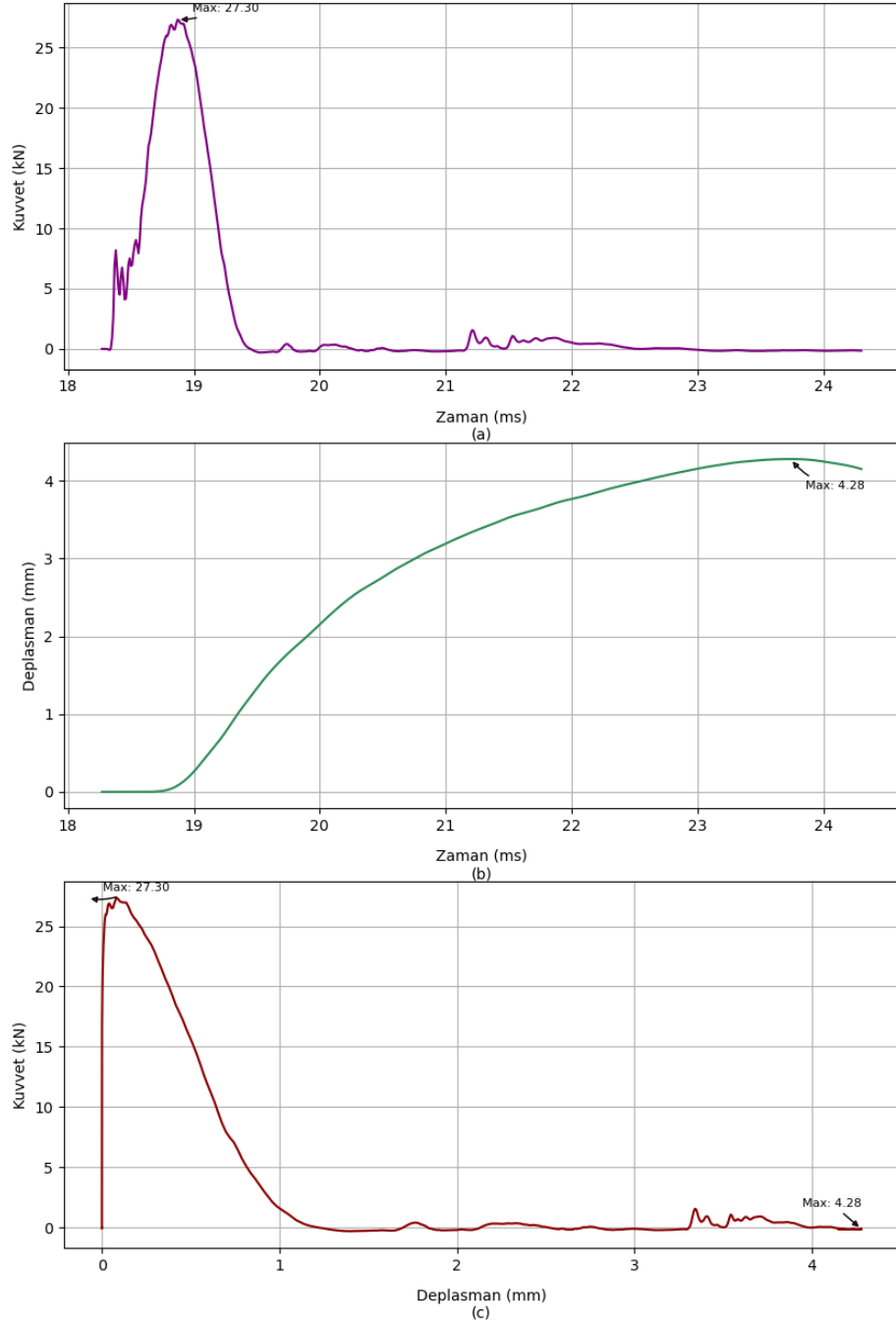
Tablo 4.10. B2-2 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2582,99	-4582,22	2486,56	-4428,55	4,28	27,30
Göçme	2154,43	-2914,07	2006,46	-2468,39	4,63	17,41

B2-2 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.72’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.73’te gösterilmiştir.

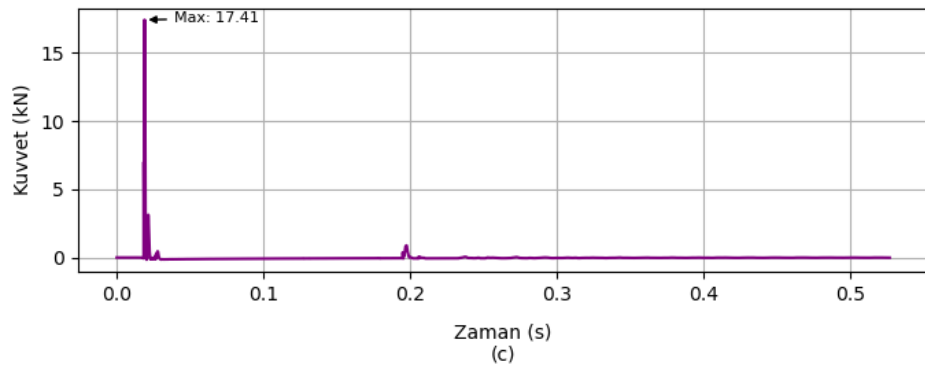
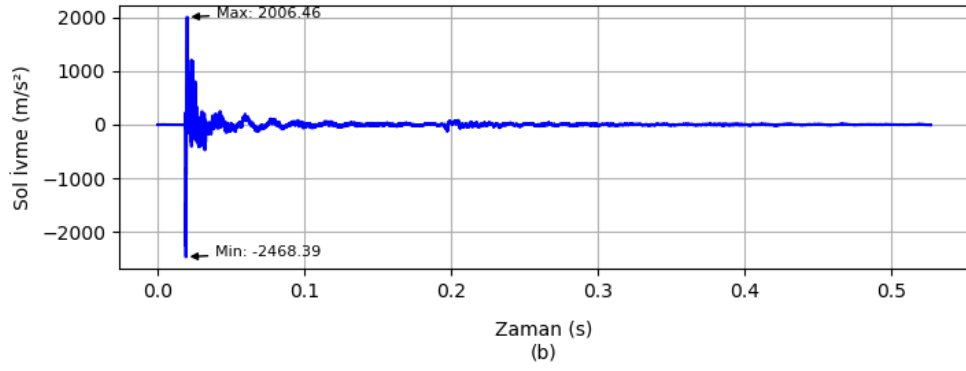
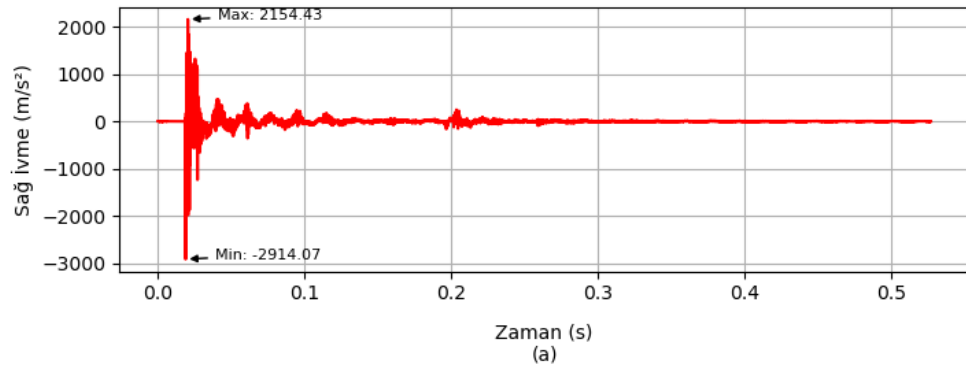


Şekil 4.72. B2-2 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

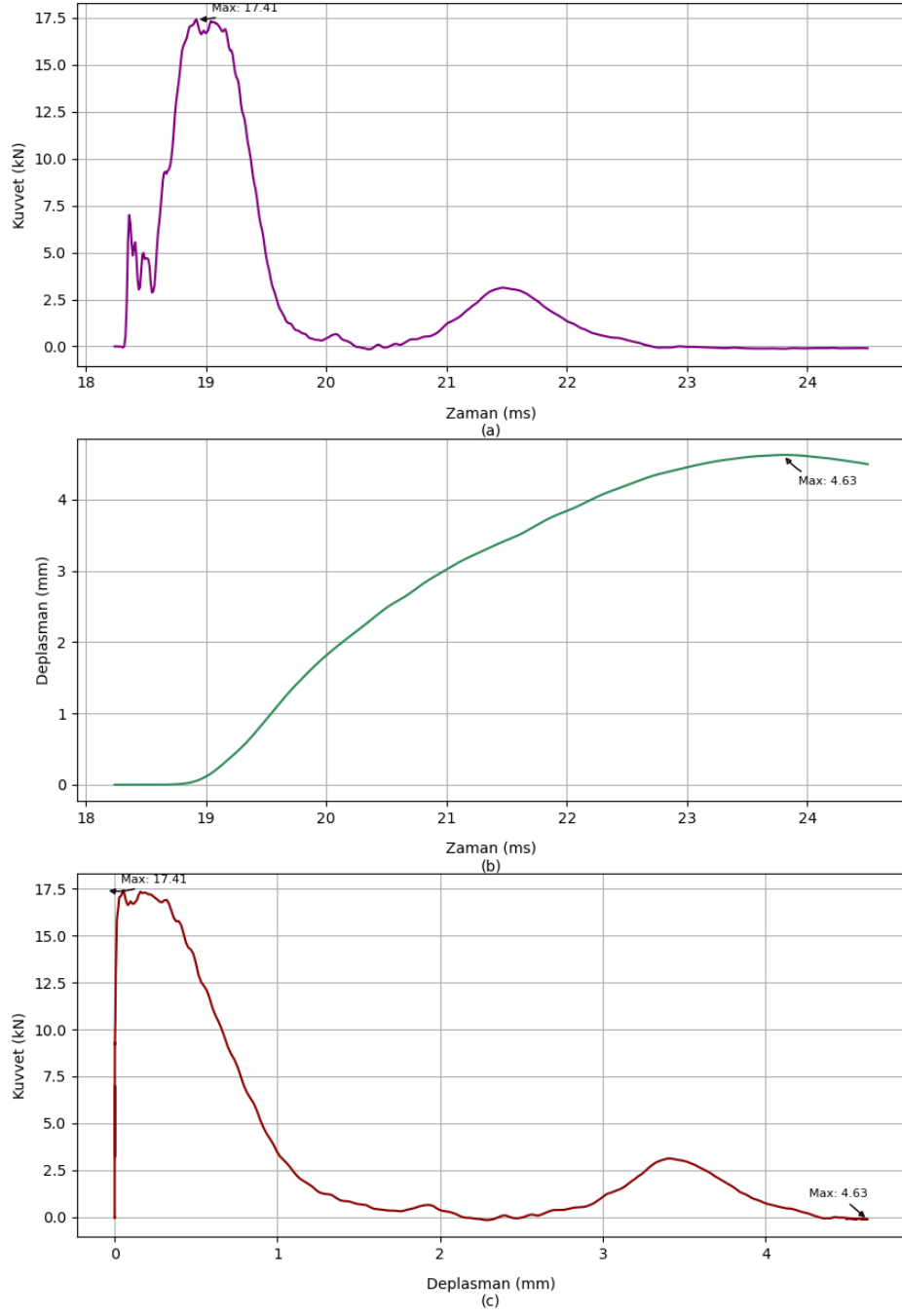


Şekil 4.73. B2-2 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-2 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.74'te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.75'te gösterilmiştir.



Şekil 4.74. B2-2 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.75. B2-2 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

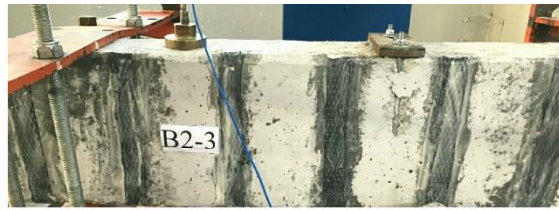
4.1.10. B2-3 Deney Elemanı

B2 grubundaki 90° U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-3 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişin yüzeyine 90° olacak şekilde kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 90° U şerit sarım ile güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.76) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.76. B2-3 deney elemanı çarpma deneyi

B2-3 deney elemanına 18 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 9. düşmede almıştır. Kiriş ön yan yüzeyinde, çelik plakanın altında vidayı kaplayan alanda beton dökülmesi meydana gelmiş olup kirişin sol arka yüzünde çelik plakadan sol ivmeölçere kadar yüzeye paralel olacak şekilde çatlak meydana gelmiştir; bu çatlağın kiriş sol mesnete doğru kesme çatlağı olarak devam ettiği görülmüştür (Şekil 4.77).



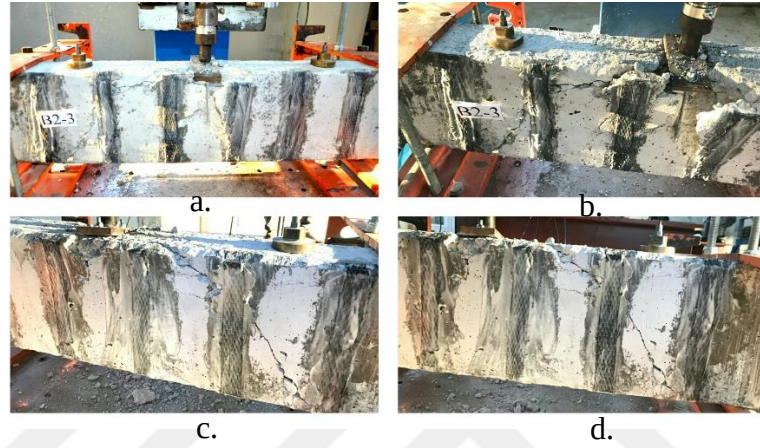
a.



b.

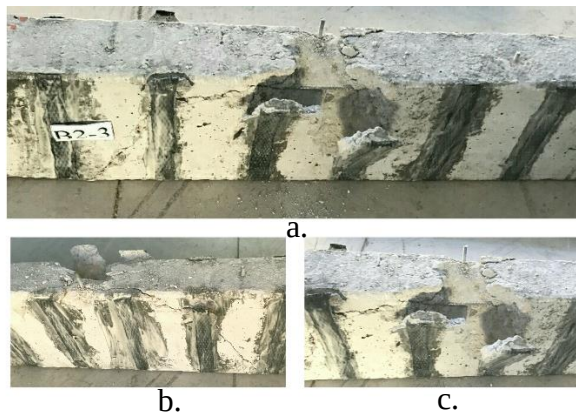
Şekil 4.77. B2-3 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında oluşan ilk çatlaklar kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe çok daha belirginleşmiştir. Çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanının sol arka yüzünde oluşan çatlaklar benzer şeklide sol ön tarafında da kesme çatlağı olarak görülmeye başlamıştır. B2-3 deney elemanında 18. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir (Şekil 4.78). Göçme durumunda çarpma bölgesinin sağ ve sol tarafında bulunan CFRP U şeritler kirişin üst yüzeyine yakın bölgelerde beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılmıştır (Şekil 4.78).



Şekil 4.78. B2-3 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu

Kirişin sol kesme ve sol alt bölgesinde betonda kırılma görülmüştür. Plakanın olduğu orta bölgede beton dökülmesi meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.79’da gösterilmiştir.



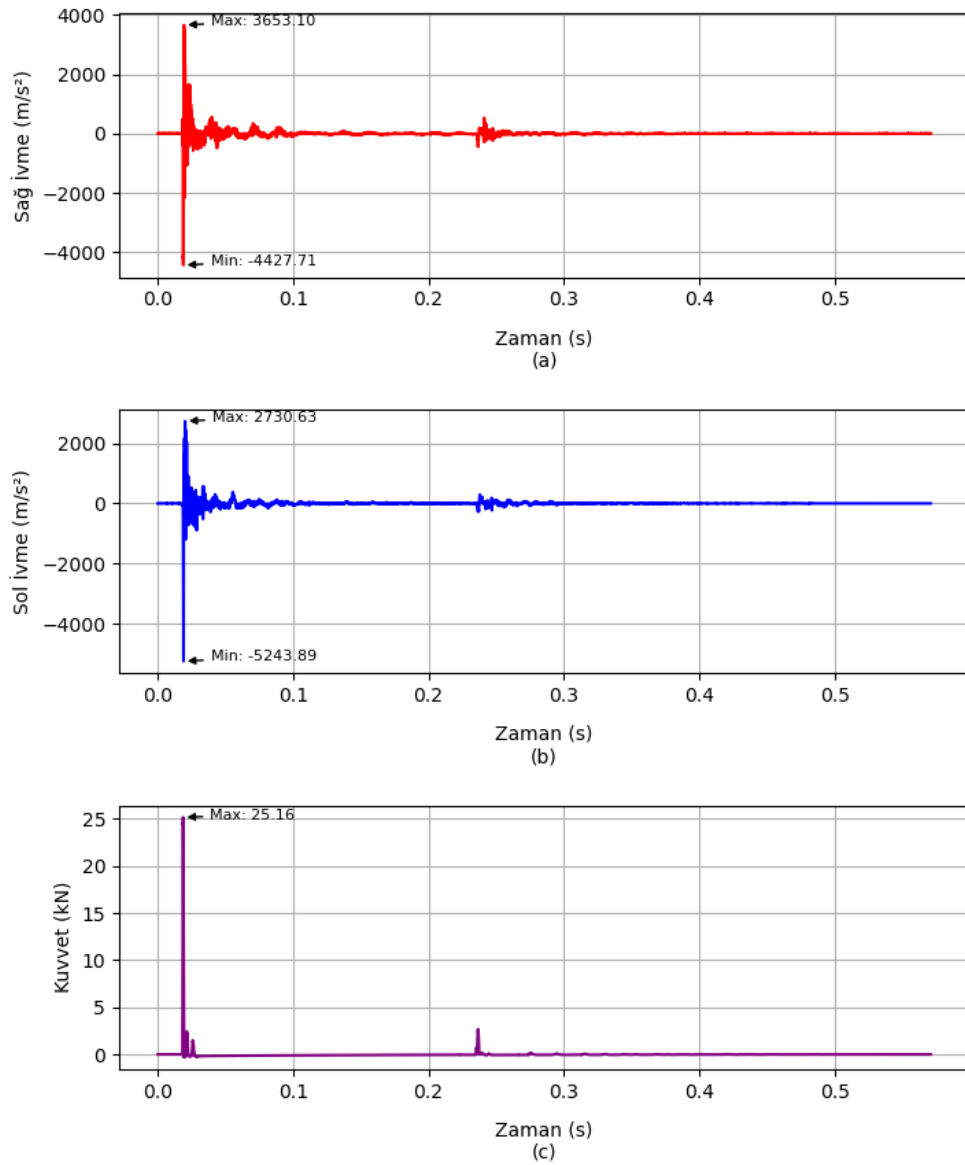
Şekil 4.79. B2-3 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-3 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.11’de verilmiştir.

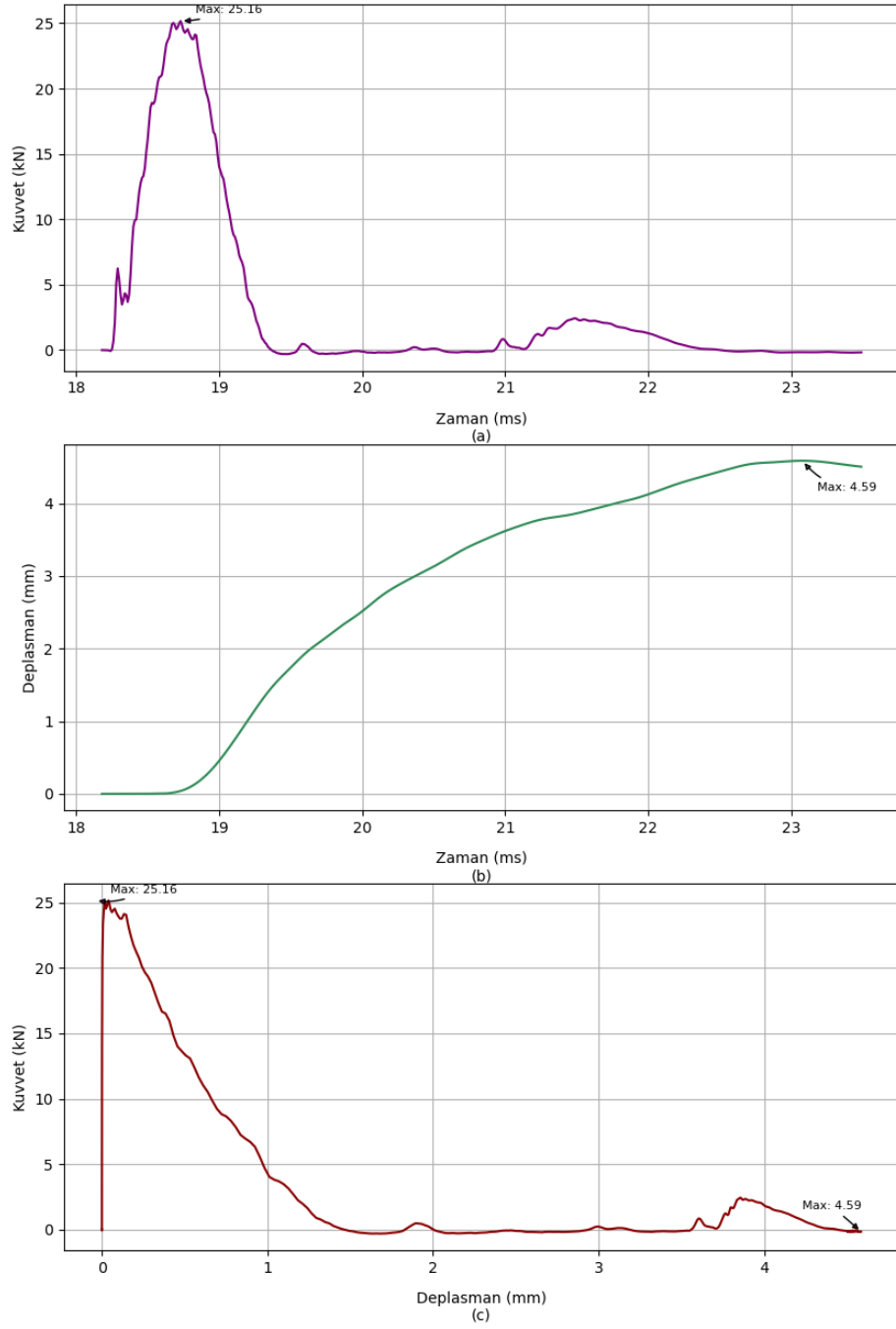
Tablo 4.11. B2-3 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3653,10	-4427,71	2730,63	-5243,89	4,59	25,16
Göçme	2643,80	-2234,94	2469,14	-1530,09	6,75	16,48

B2-3 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.80’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.81’de gösterilmiştir.

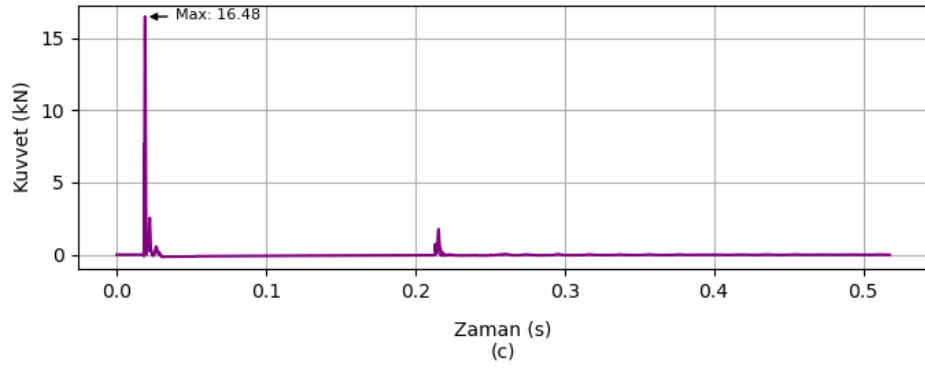
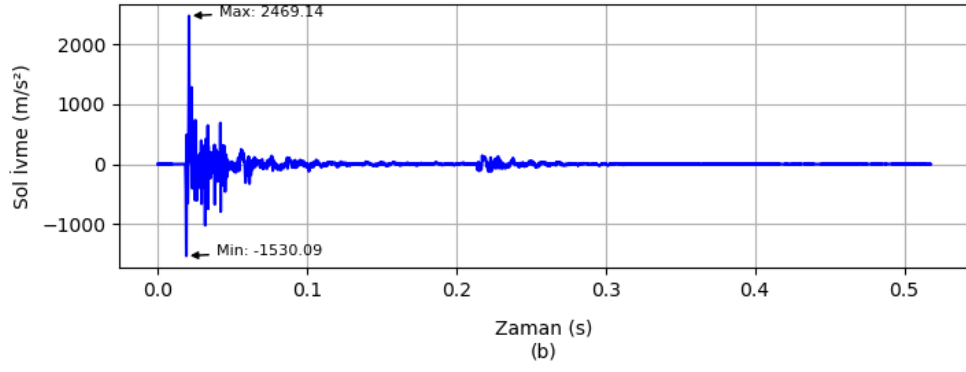
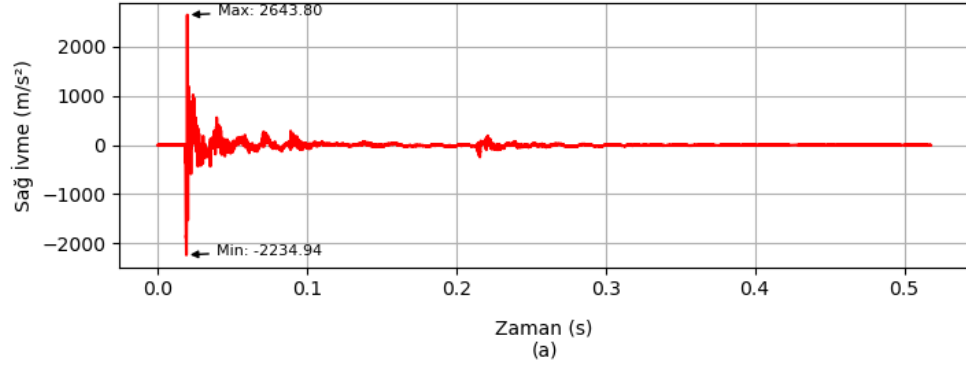


Şekil 4.80. B2-3 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

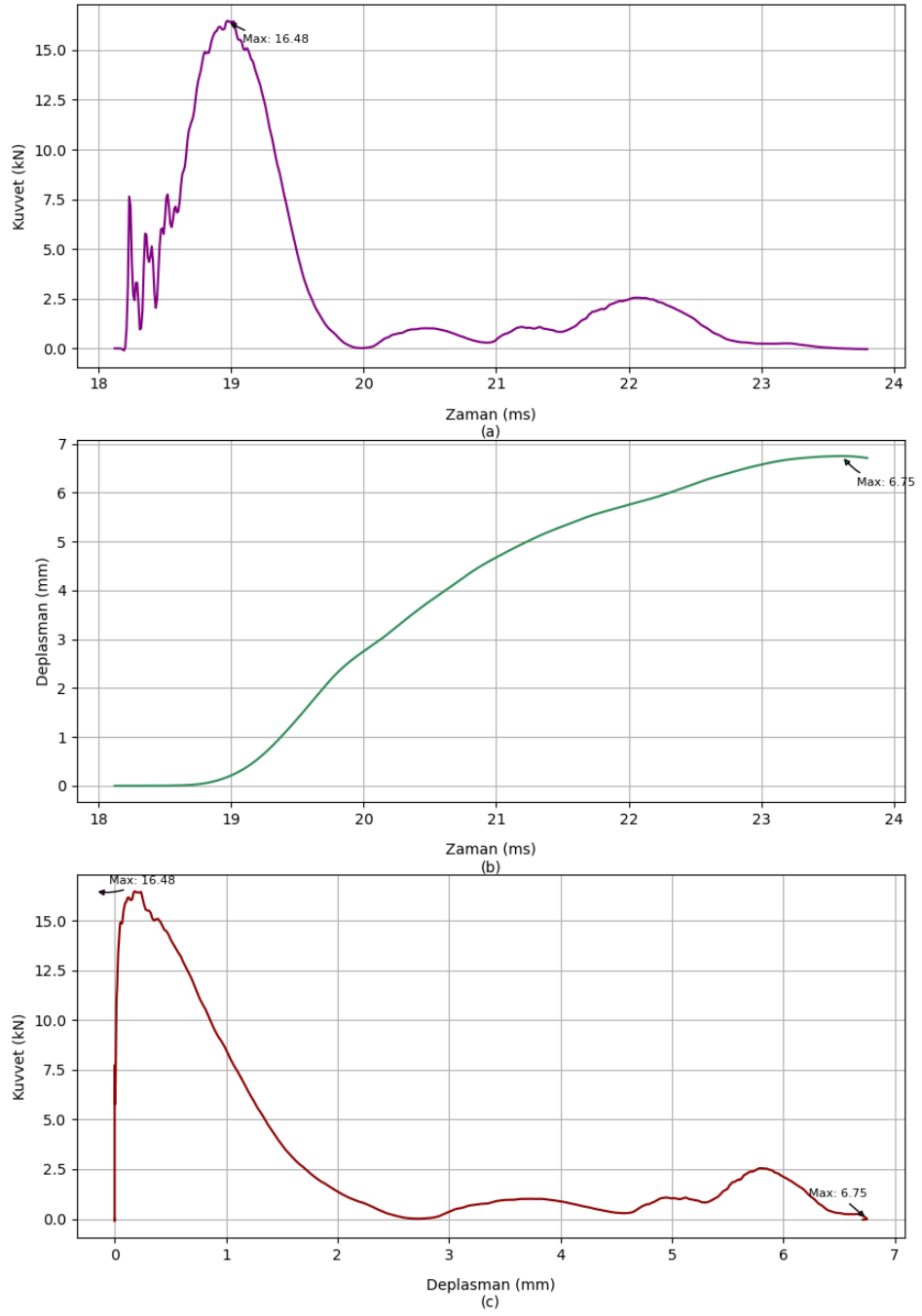


Şekil 4.81. B2-3 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-3 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.82’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.83’te gösterilmiştir.



Şekil 4.82. B2-3 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.83. B2-3 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

4.1.11. B2-4 Deney Elemanı

B2 grubundaki 45°/135° U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-4 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.84) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.84. B2-4 deney elemanı çarpma deneyi

B2-4 deney elemanına 14 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 8. düşmede almıştır. Ön yüz orta kısımda sağa doğru yaklaşık 80 ve sola doğru yaklaşık 50 derecelik çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.85).



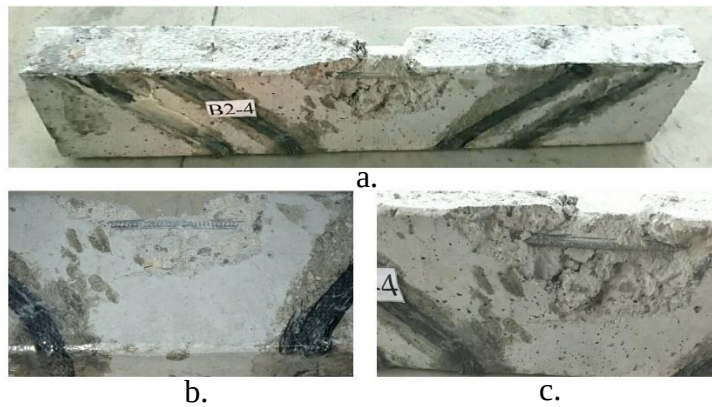
Şekil 4.85. B2-4 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe İlk hasarda plakanın solunda görülen 50 derecelik çatlak, sol yan yüzde yer alan 45° eğimli CFRP şerite kadar ulaşırken, ilk hasarda plakanın sağında görülen 80 derecelik çatlak, sağ yan yüzde yer alan 135° eğimli CFRP şerite ulaştığı görülmüştür.

Çarpma deneyi devam ettikçe plakanın sabitlendiği ön vida boyunca oluşan beton dökülmesi meydana gelmiştir. Deney elemanında oluşan çatlaklarda herhangi bir değişiklik oluşmamış olup çelik plakanın bulunduğu kiriş üst orta bölgesinde ve kiriş yan yüzeylerinde beton örtüsü dökülmüş ve kiriş üst boyuna donatılarının aderans kaybı oluşması göçme hasarı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.86). Deney sonrası matris görünümü Şekil 4.87’de gösterilmiştir.



Şekil 4.86. B2-4 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



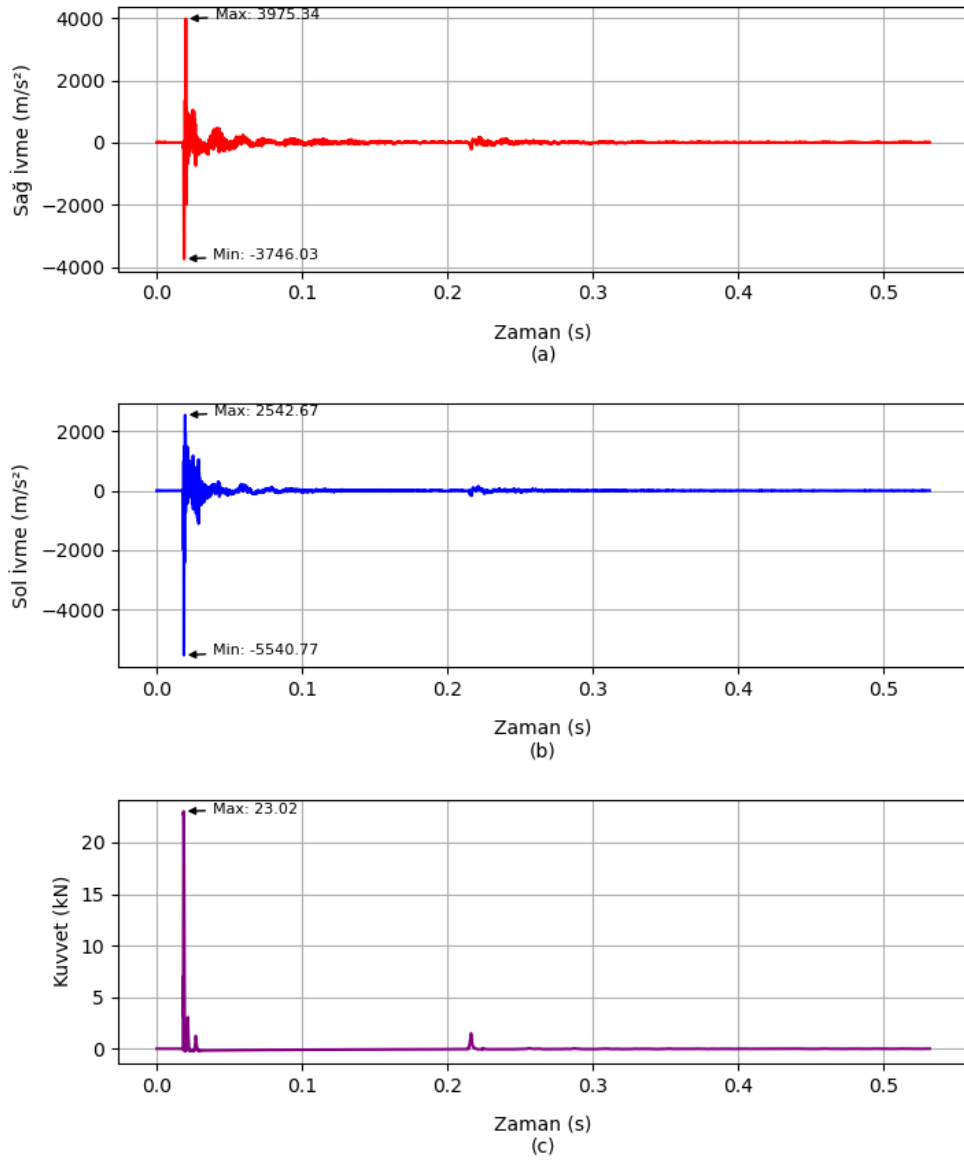
Şekil 4.87. B2-4 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-4 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.12’de verilmiştir.

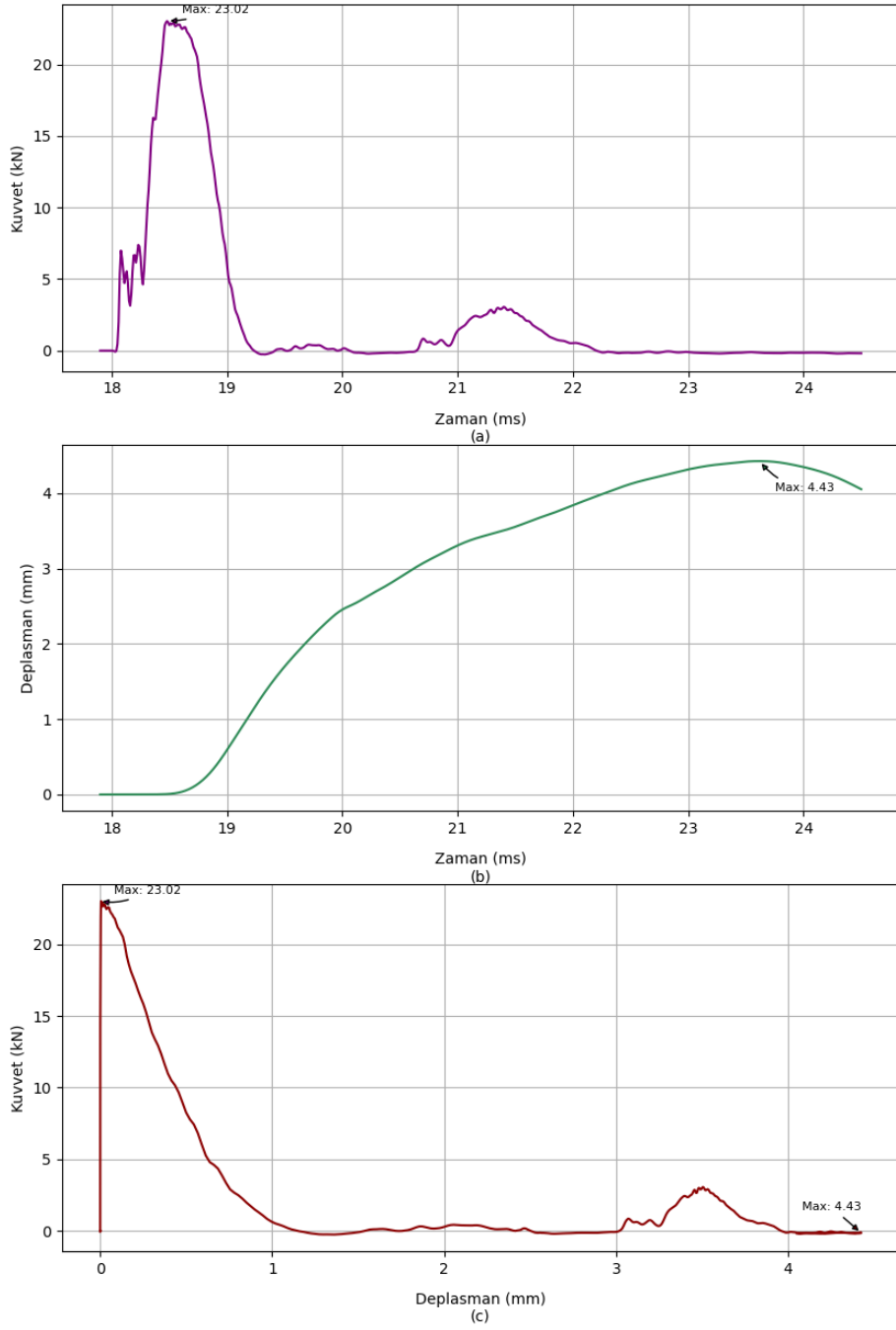
Tablo 4.12. B2-4 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3975,34	-3746,03	2542,67	-5540,77	4,43	23,02
Göçme	6396,40	-4860,97	1907,63	-2648,24	5,04	14,59

B2-4 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.88’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.89’da gösterilmiştir.

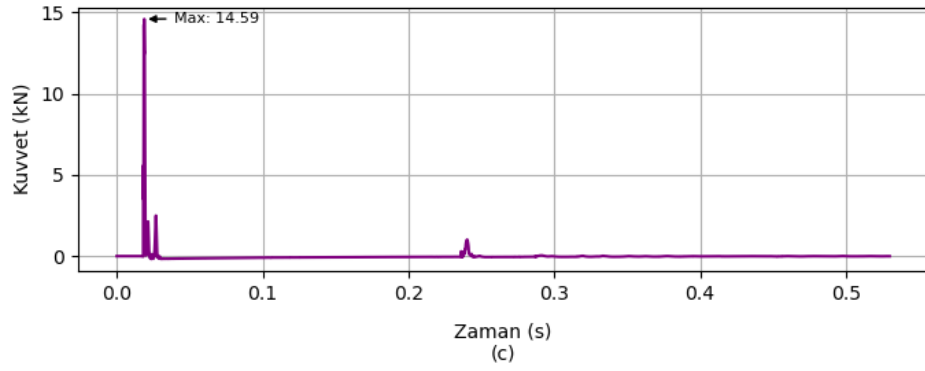
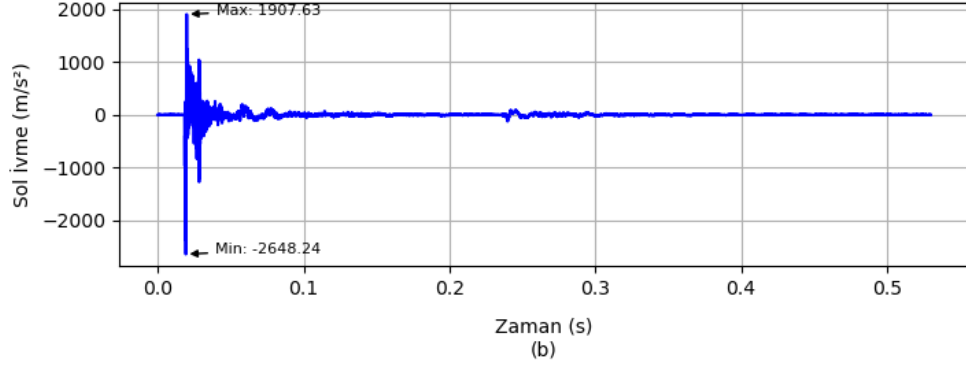
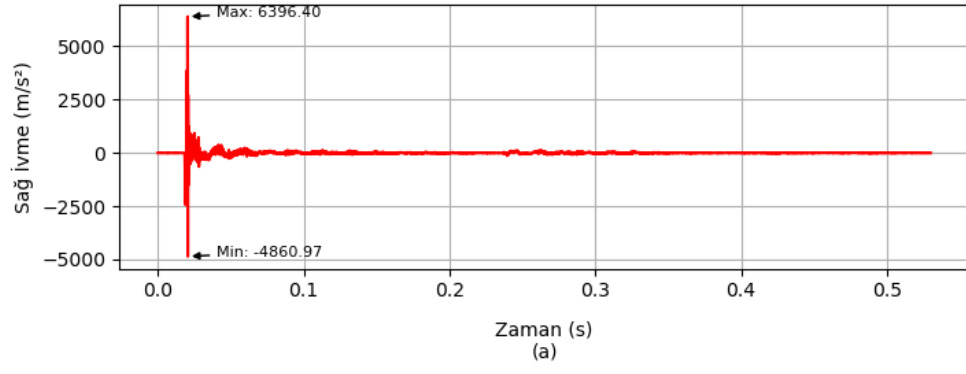


Şekil 4.88. B2-4 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

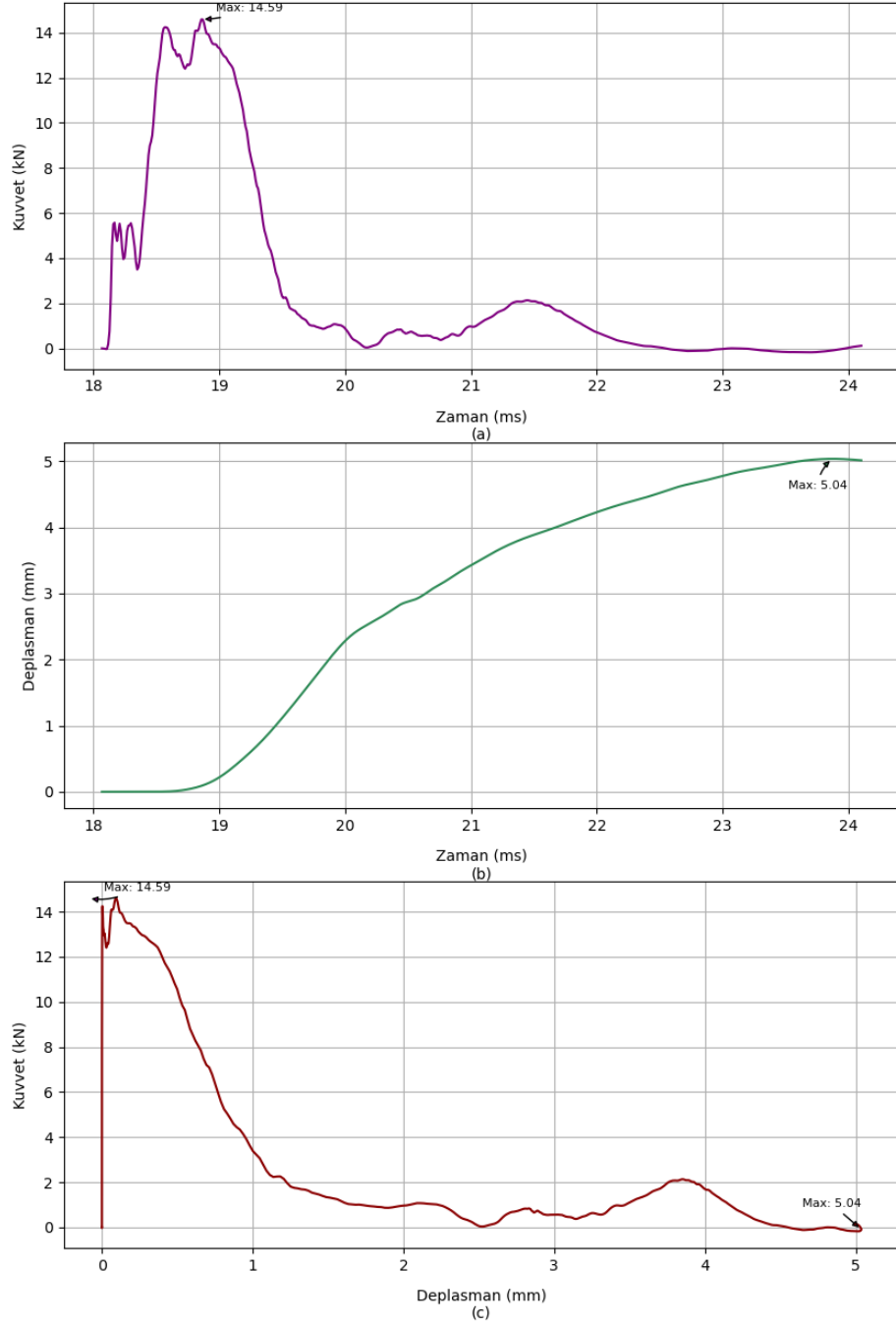


Şekil 4.89. B2-4 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-4 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.90’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.91’de gösterilmiştir.



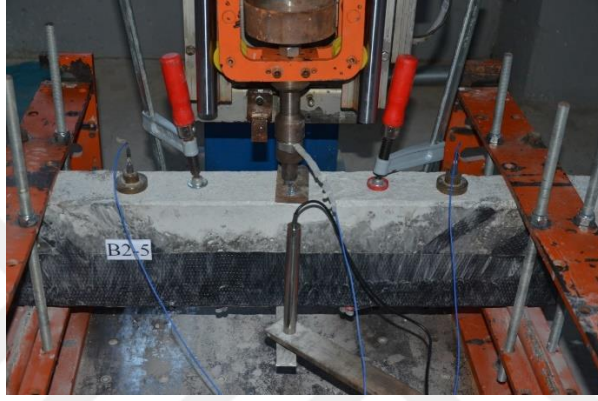
Şekil 4.90. B2-4 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.91. B2-4 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

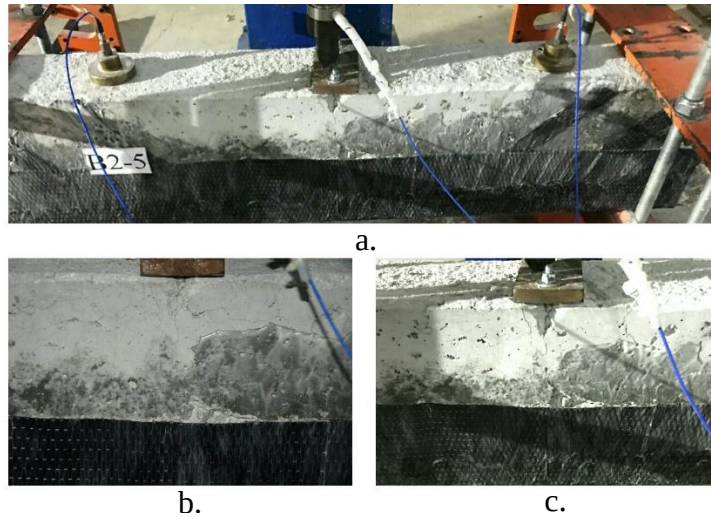
4.1.12. B2-5 Deney Elemanı

B2 grubundaki 45°/135° U şerit ve 90° yarım U sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-5 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin solda yan yüzeyleri 45° U şerit, sağda yan yüzeyleri 135° U şerit ve bu şeritlerin üzerine yan yüzeylerin yarısı ve alt yüzeyi kaplayan 90° yarım U sarım olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.92) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



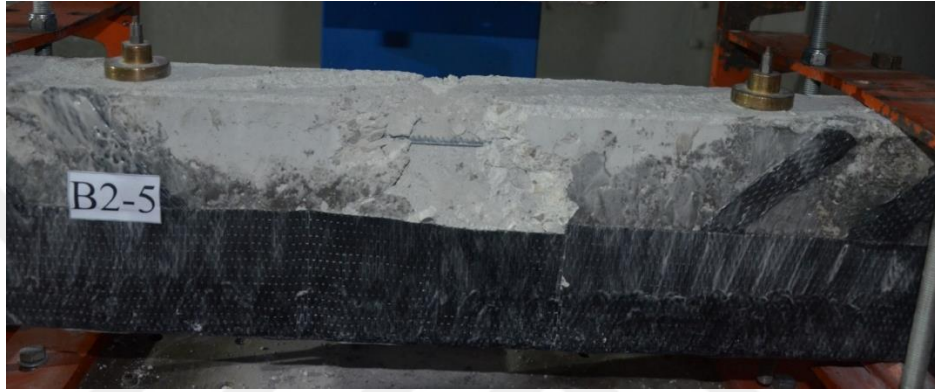
Şekil 4.92. B2-5 deney elemanı çarpma deneyi

B2-5 deney elemanına 14 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 6. düşmede almıştır. Çelik plakanın orta bölgesinden ön yan yüzde dikine çatlak oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 4.93).



Şekil 4.93. B2-5 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe ön ve arka yüzeylerde beton dökülmesi meydana gelmiştir. Çarpma deneyi devam ettikçe deney elemanının ön yüz ortasından yaklaşık 10 cm uzaklıktaki CFRP kumaşta yırtılma meydana gelmiştir. Aynı zamanda çelik plakanın bulunduğu kiriş üst orta bölgesinde ve kiriş yan yüzeylerinde beton örtüsü dökülmüş ve kiriş üst boyuna donatılarının aderans kaybı oluşması göçme hasarı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.94). Deney sonrası matris görünümü şekil 4.95'te gösterilmiştir.



Şekil 4.94. B2-5 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



a.



b.

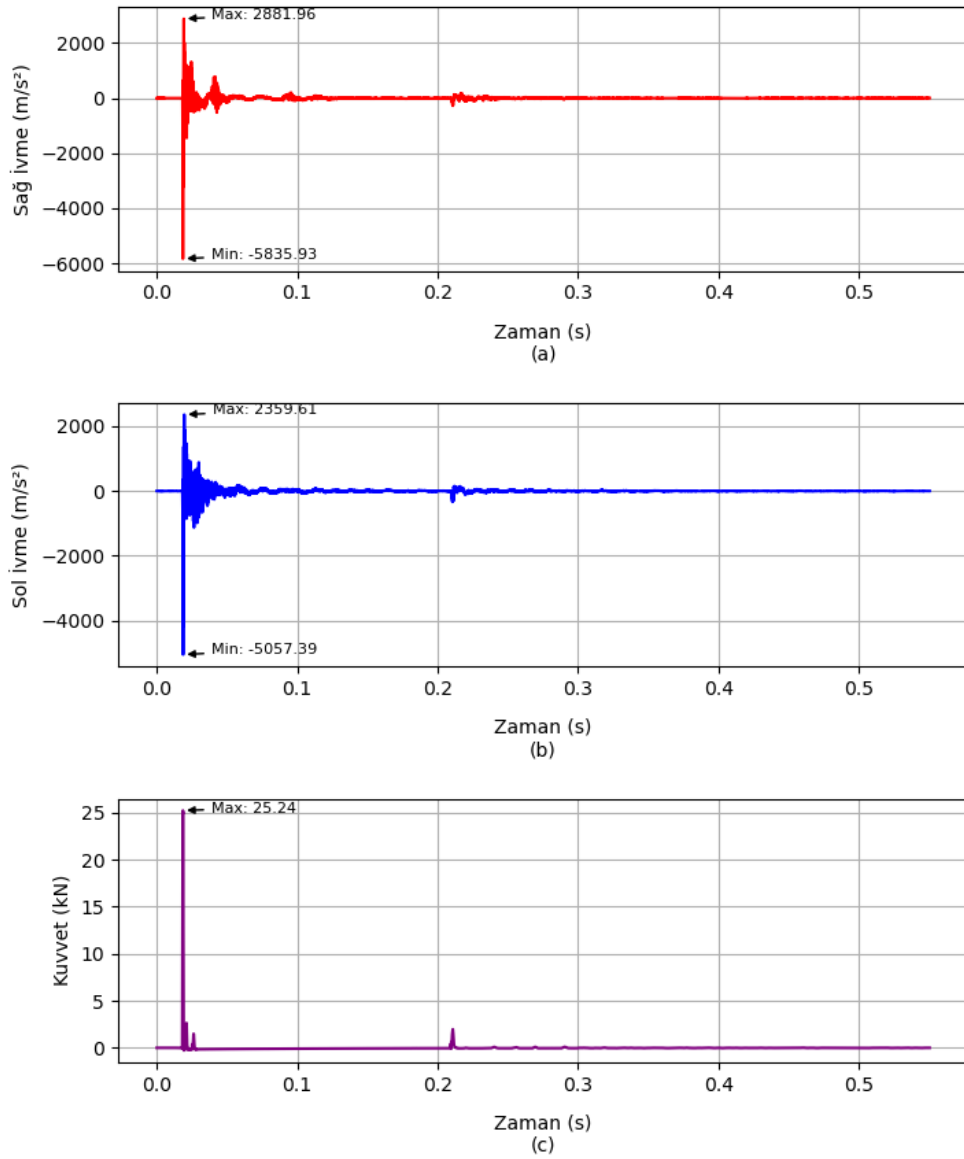
Şekil 4.95. B2-5 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-5 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.13'te verilmiştir.

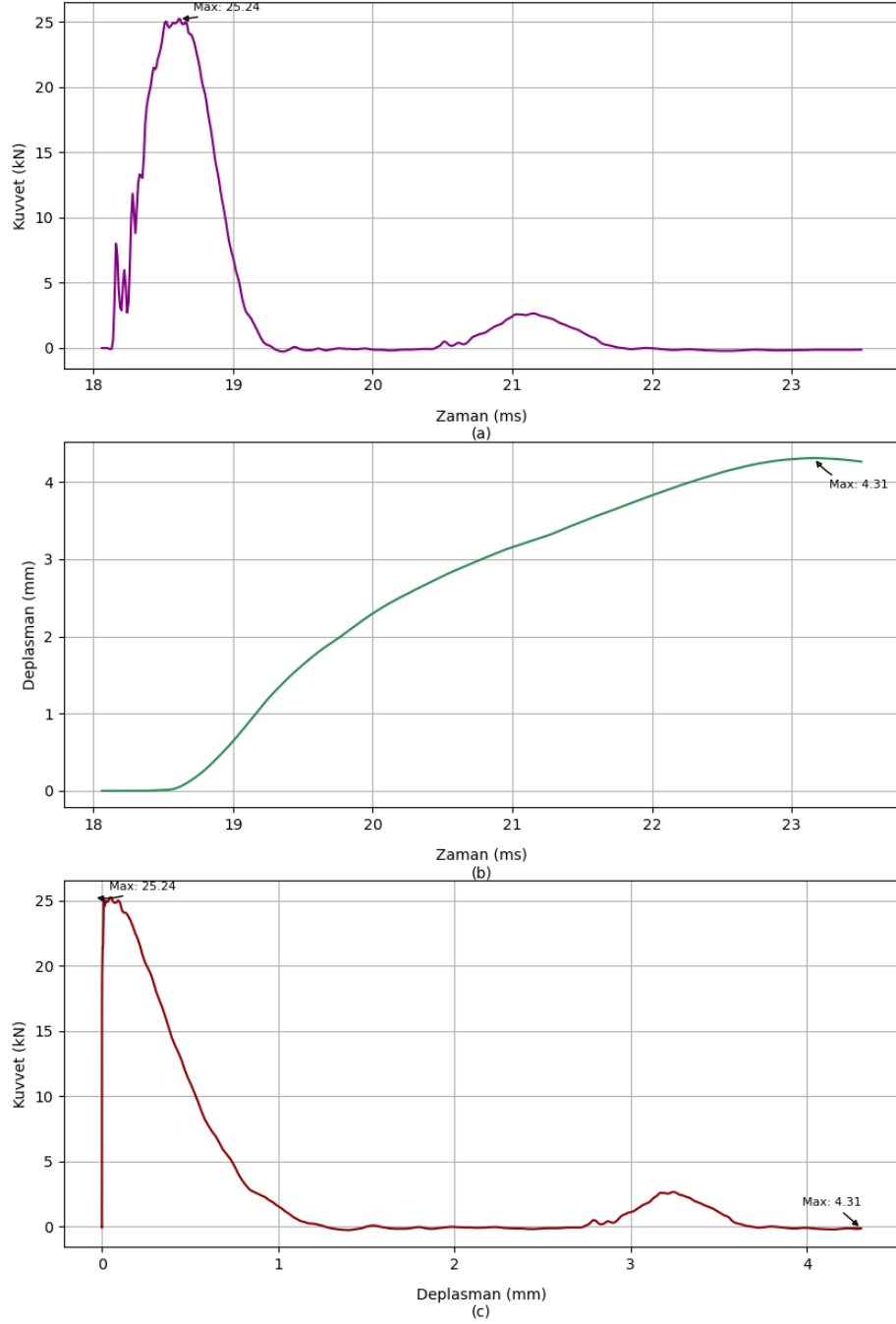
Tablo 4.13. B2-5 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	2881,96	-5835,93	2359,61	-5057,39	4,31	25,24
Göçme	1791,29	-3220,54	3001,37	-2872,21	4,78	19,00

B2-5 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.96’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.97’de gösterilmiştir.

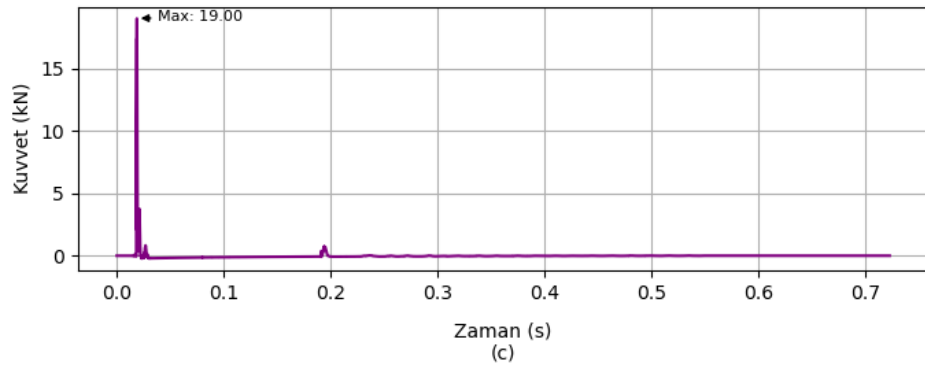
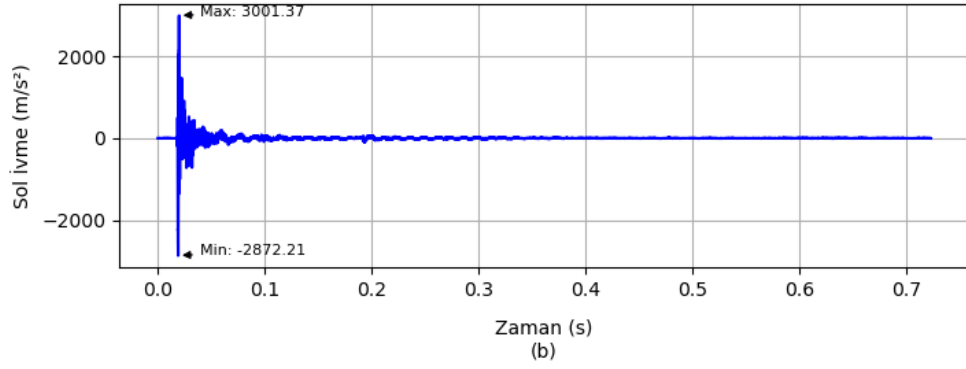
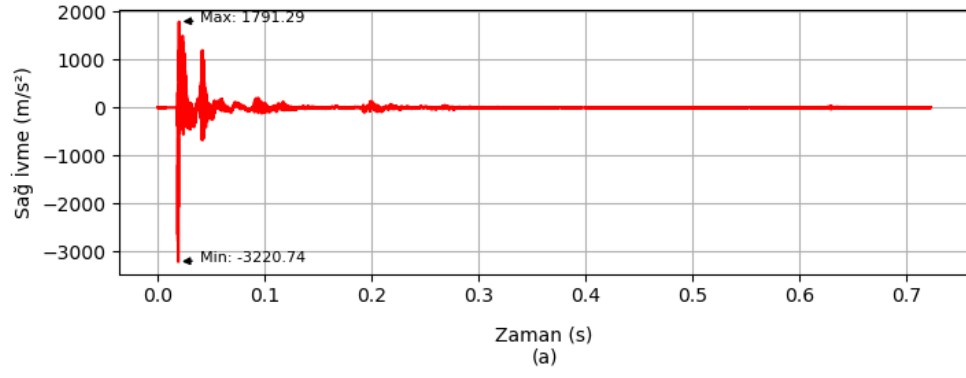


Şekil 4.96. B2-5 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

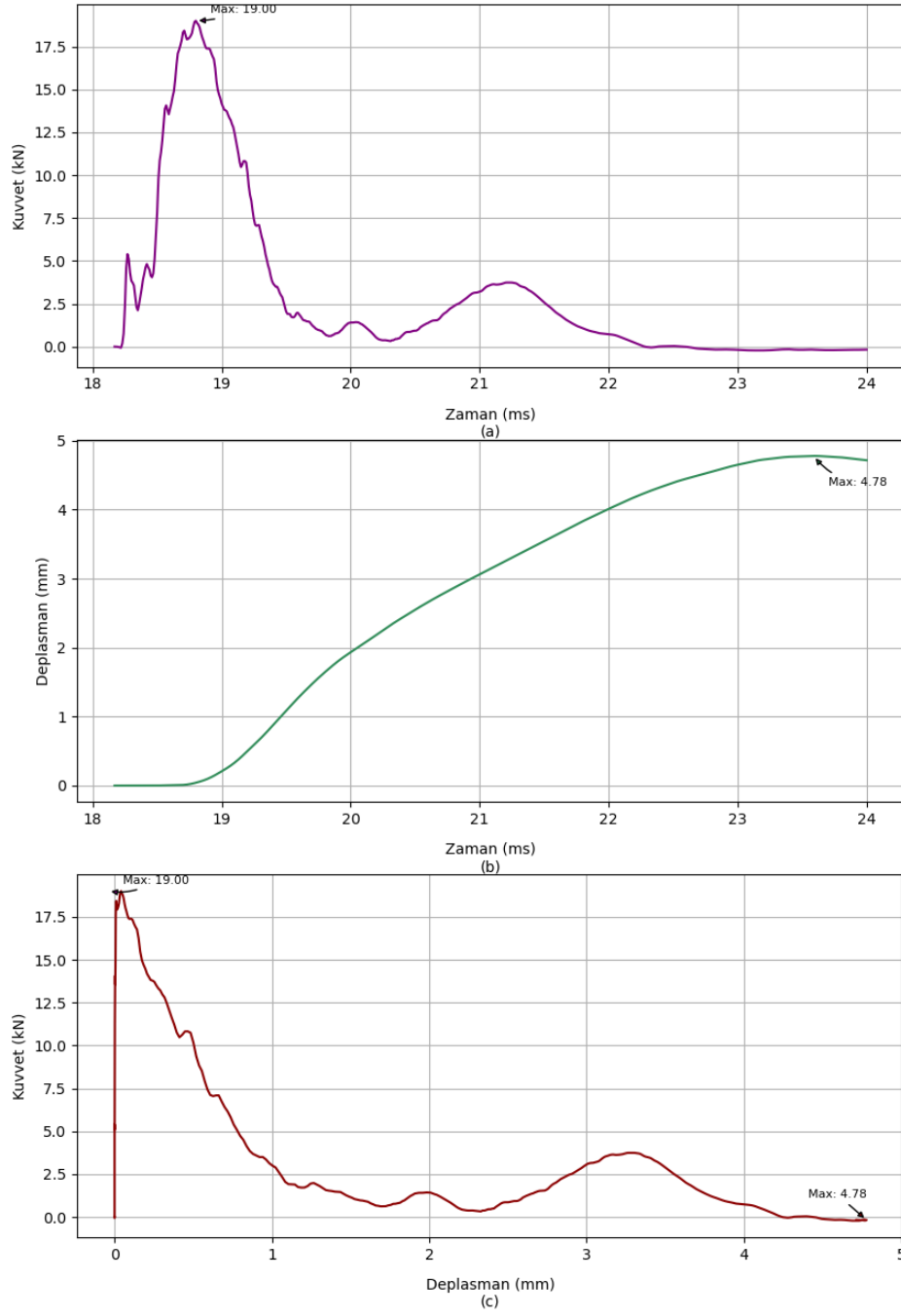


Şekil 4.97. B2-5 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-5 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.98’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.99’da gösterilmiştir.



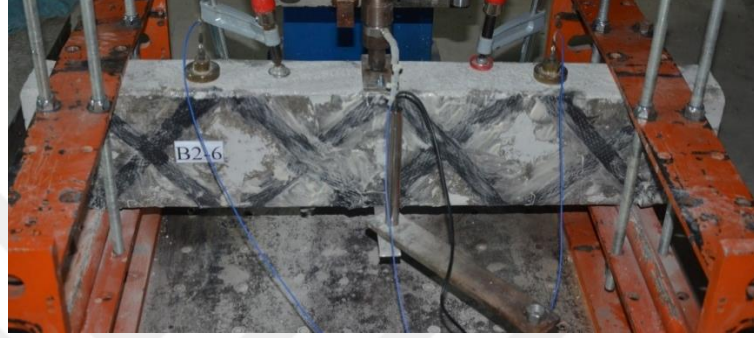
Şekil 4.98. B2-5 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.99. B2-5 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

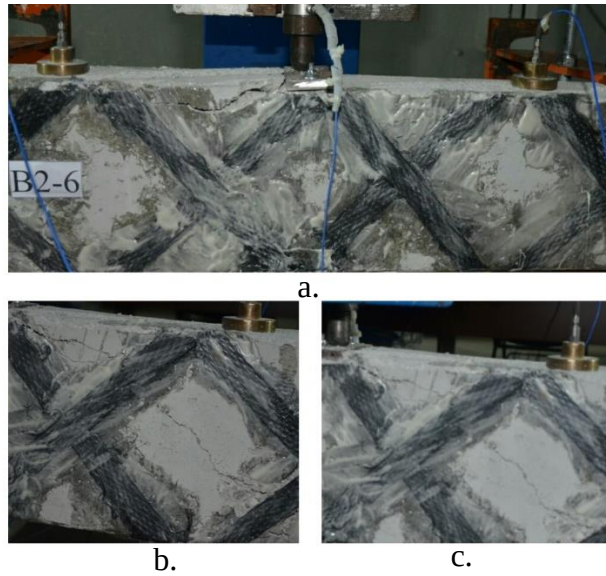
4.1.13. B2-6 Deney Elemanı

B2 grubundaki $45^\circ/135^\circ$ çapraz U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-6 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişlerin alt ve yan yüzeyleri 45° ve 135° çapraz U şerit sarım olacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.100) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



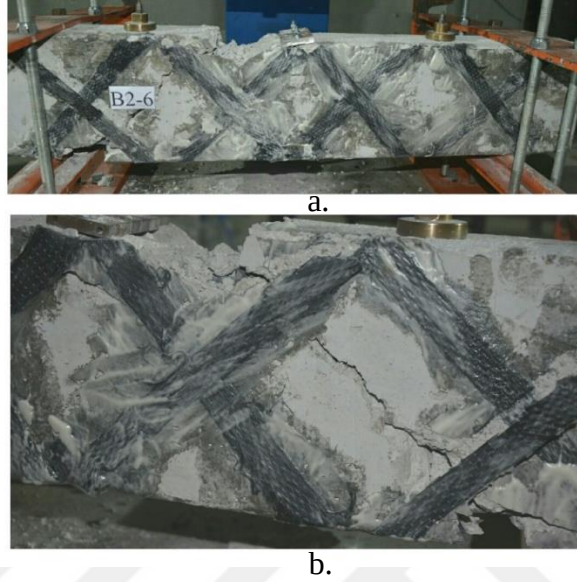
Şekil 4.100. B2-6 deney elemanı çarpma deneyi

B2-6 deney elemanına 24 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 12. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın sol ön tarafından yüzeye paralel olacak şekilde çatlak oluşumu meydana gelmiştir, devamında sol mesnete doğru kesme çatlakları olarak devam etmiştir, aynı zamanda kiriş sol arka bölgesinde de benzer çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.101).



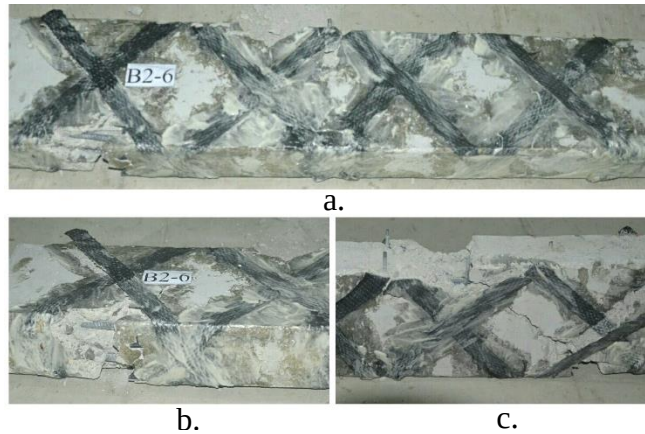
Şekil 4.101. B2-6 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe kirişin sol tarafında kesme kırılması meydana gelmiştir ve kiriş alt bölgesinde de kırılmalar devam etmiştir. Aynı zamanda sol mesnet bölgesine 45° ile sarılan CFRP şeritin ön ve arkada beton yüzeyden ayrıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.102).



Şekil 4.102. B2-6 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu

Plakanın sol bölgesinde beton parça kopması meydana gelmiş olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.103'te gösterilmiştir.



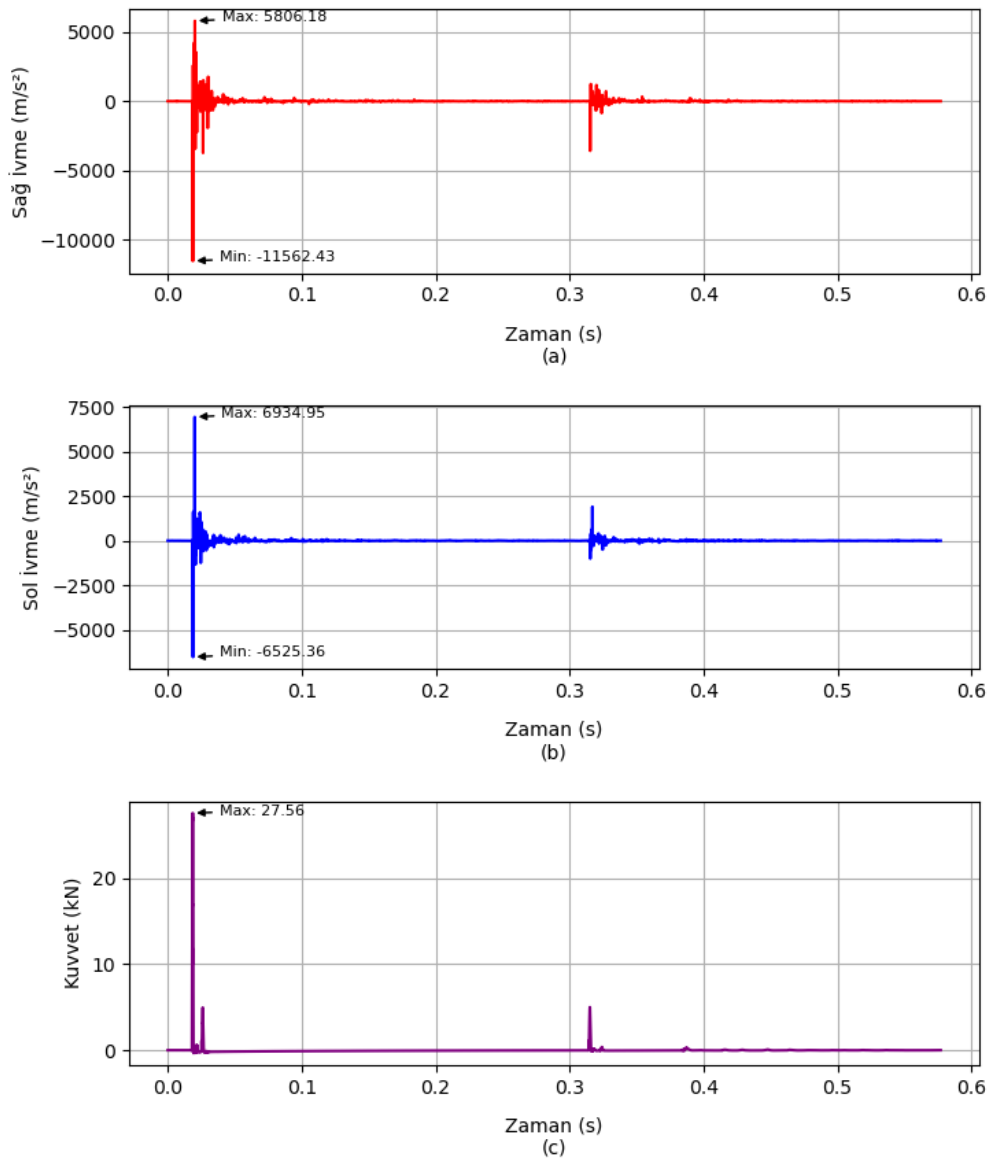
Şekil 4.103. B2-6 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-6 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.14'te verilmiştir.

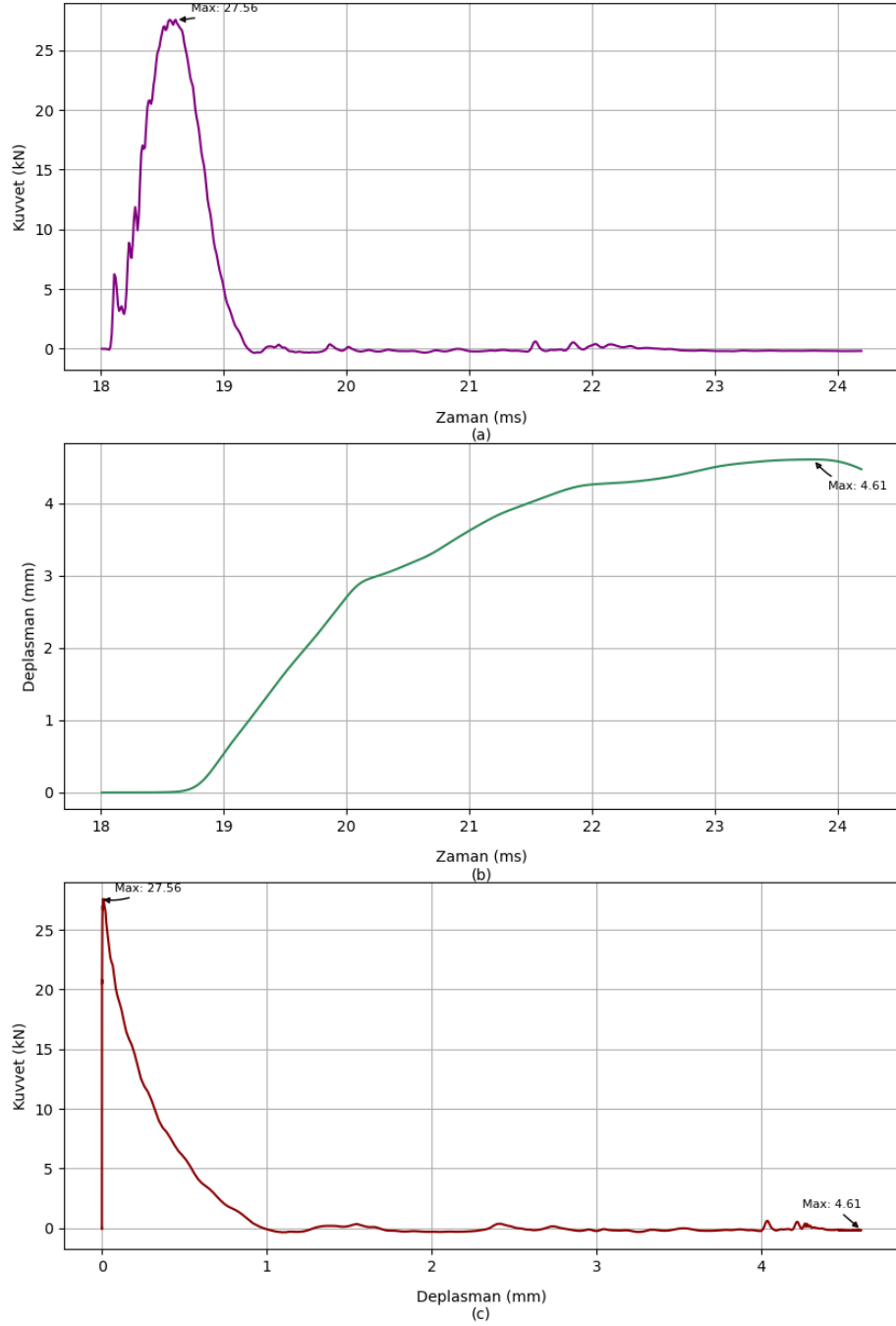
Tablo 4.14. B2-6 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	5806,18	-11562,43	6934,95	-6525,36	4,61	27,56
Göçme	3577,82	-11113,75	4030,12	-2538,25	6,80	19,21

B2-6 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.104'te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.105'te gösterilmiştir.

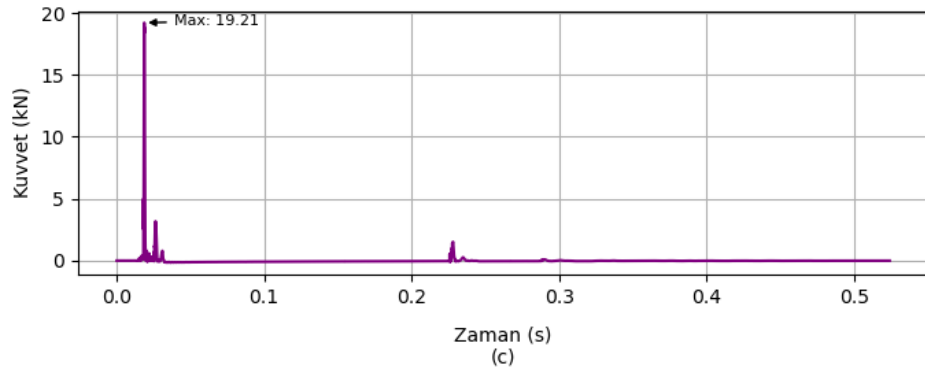
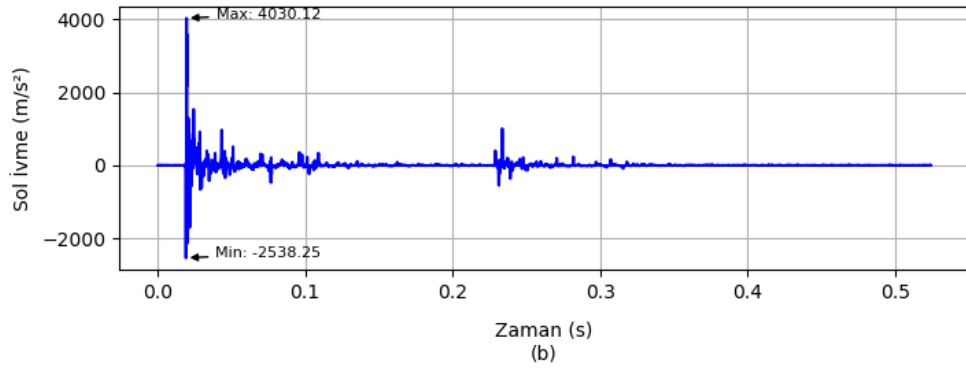
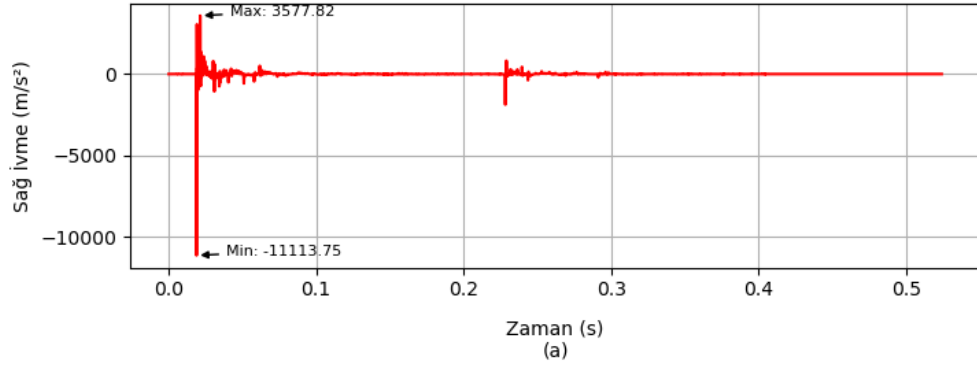


Şekil 4.104. B2-6 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

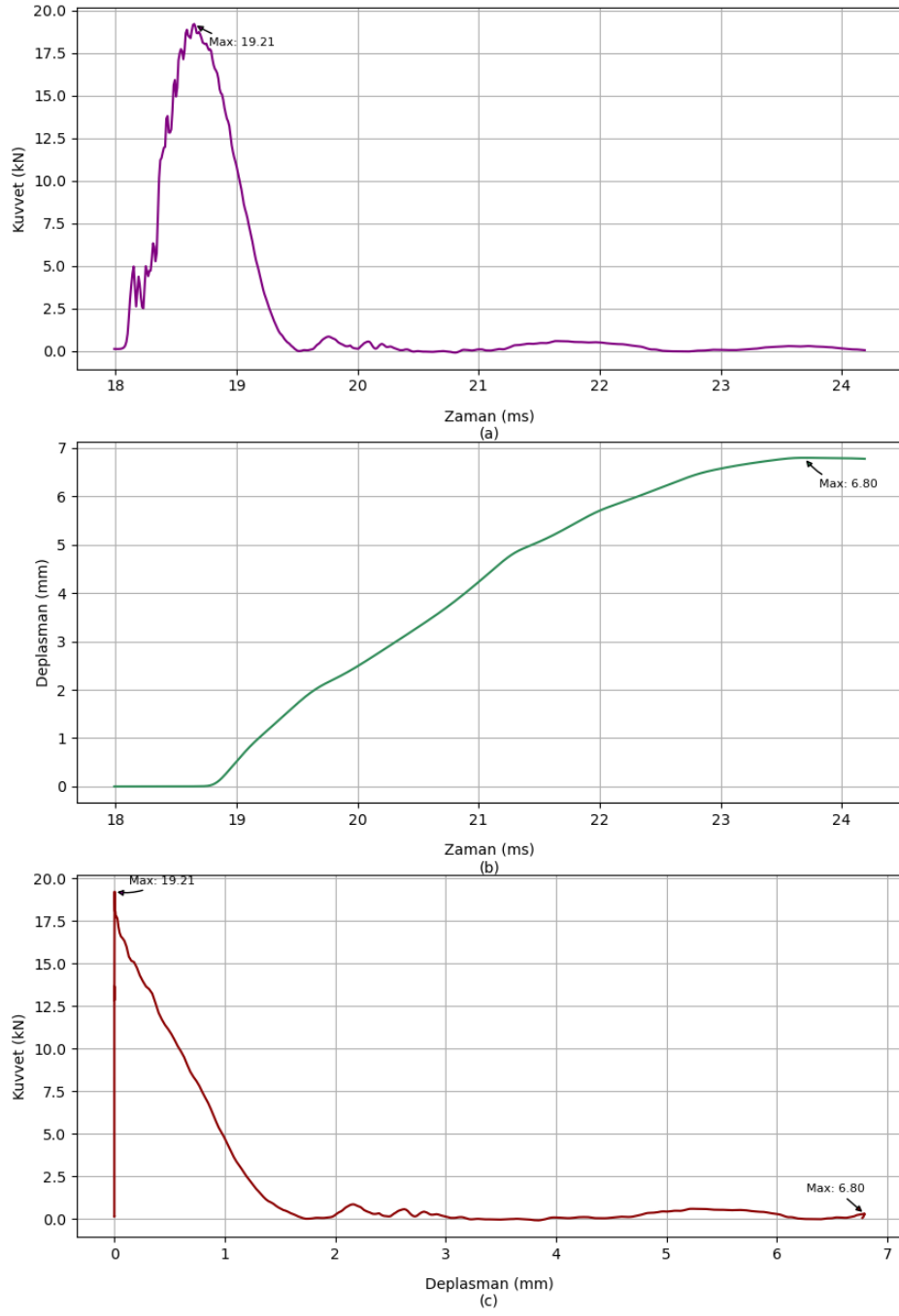


Şekil 4.105. B2-6 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-6 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.106’da; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.107’de gösterilmiştir.



Şekil 4.106. B2-6 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.107. B2-6 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

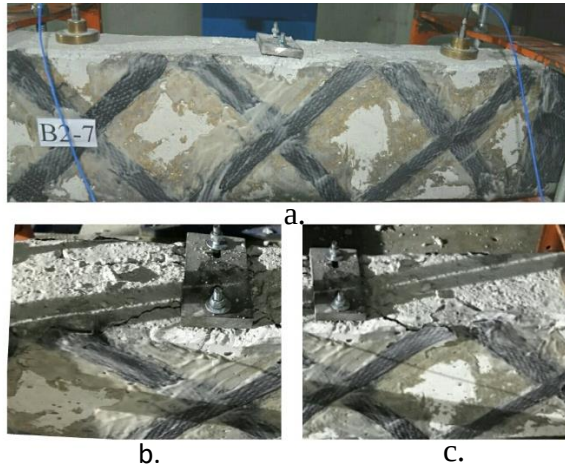
4.1.14. B2-7 Deney Elemanı

B2 grubundaki 45°/135° U şerit ve 90° U şerit sarım yöntemi kullanılması planlanan B2-7 deney elemanı CFRP şerit doğrultusu kirişin sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit ve kalan açıklık bölgesinde 45° ve 135° çapraz U şerit sarım olacak şekilde yapıştırılacak şekilde güçlendirilmiş olup, 1,5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.108) ve göçme meydana gelene kadar çarpma deneyine devam edilmiştir.



Şekil 4.108. B2-7 deney elemanı çarpma deneyi

B2-7 deney elemanına 22 adet düşme gerçekleştirilmiş olup; deney elemanı ilk hasarı 11. düşmede almıştır. Kiriş üst orta bölgesinde, çelik plakanın sol ön tarafından CFRP kumaşa doğru çatlak oluşumu meydana gelmiştir ve aynı zamanda solda ve sağda CFRP şerit bulunmayan bölgede 45 derecelik çatlaklar görülmüştür (Şekil 4.109). Plakanın alt bölgesinde beton dökülmesi meydana gelmiştir.

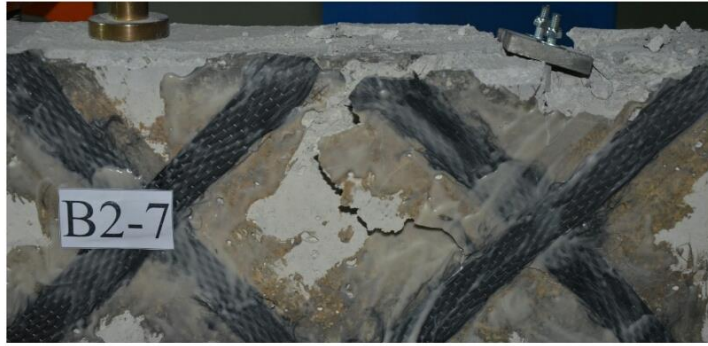


Şekil 4.109. B2-7 deney elemanında oluşan ilk hasar durumu

Deney sırasında oluşan kiriş üzerine uygulanan çarpma işlemi devam ettikçe hasar büyümüştür. n ve arka orta bölgedeki CFRP şeritlerin betonla birlikte kopması meydana gelmiştir (şekil 4.110). B2-7 deney elemanında 22. düşmede göçme durumu gözlemlenmiştir olup deney sonrası matris görünümü şekil 4.111’de gösterilmiştir.



a.



b.

şekil 4.110. B2-7 deney elemanında oluşan göçme hasar durumu



a.



b.



c.

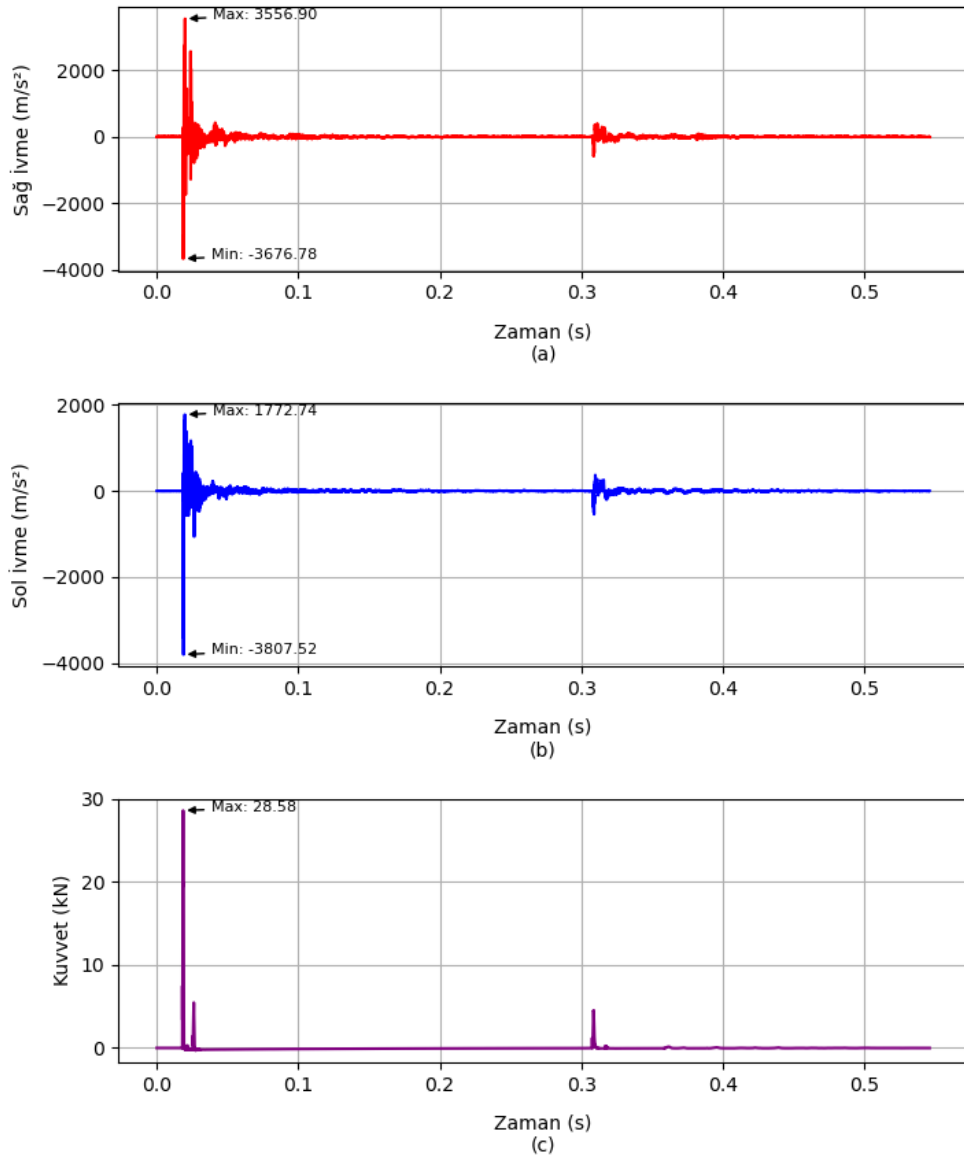
şekil 4.111. B2-7 deney elemanının deney sonrası agrega-matris görünümü

B2-7 deney elemanının ilk hasar ve göçme hasar deneyi sırasında bilgisayar ortamında kaydedilen sağ ve sol ivme, kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.15’te verilmiştir.

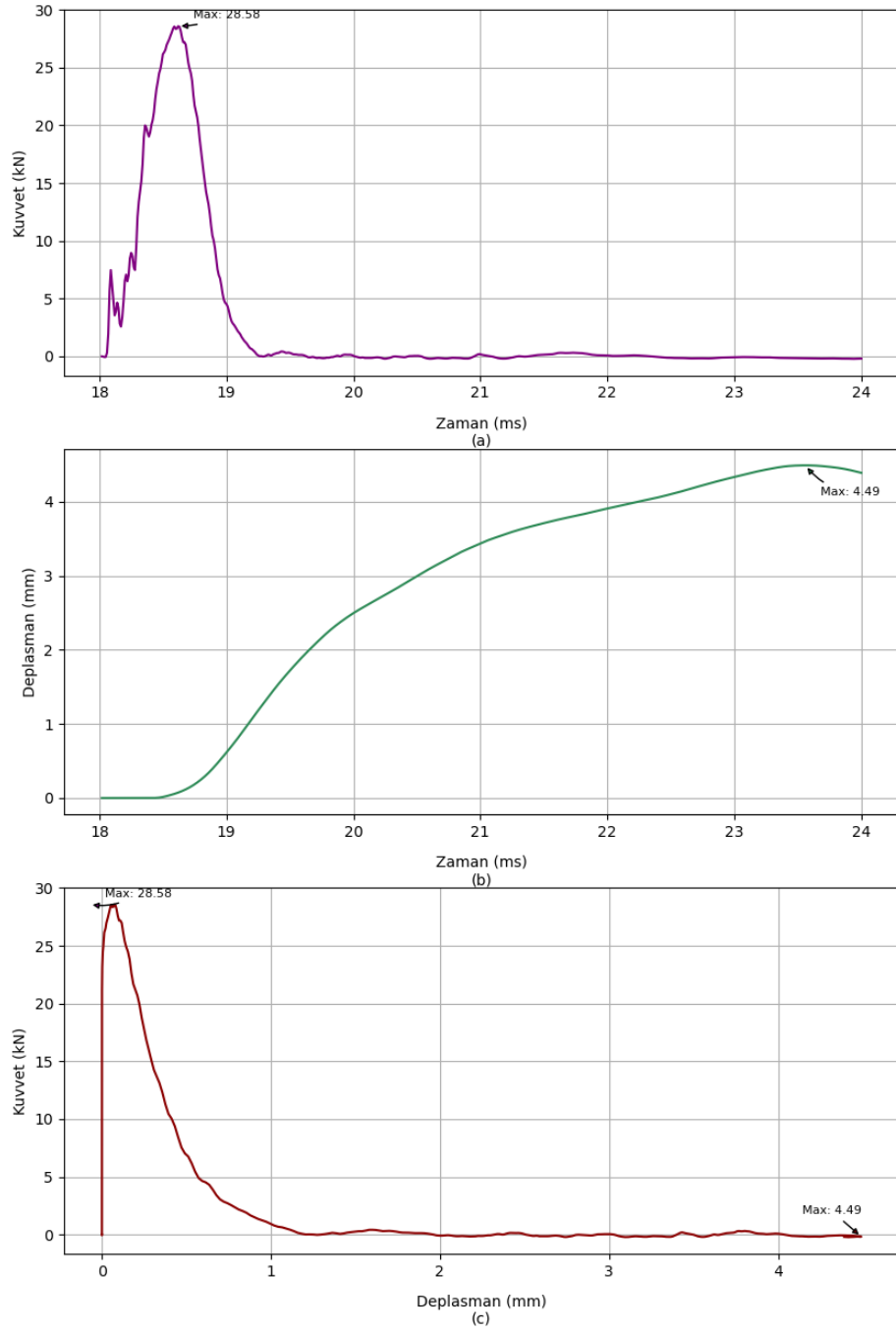
Tablo 4.15. B2-7 deney elemanının ivme, kuvvet, deplasman değerleri

	Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
	Max.	Min.	Max.	Min.		
İlk hasar	3556,90	-3676,78	1772,74	-3807,52	4,49	28,58
Göçme	2899,14	-1859,70	1453,75	-2726,50	5,75	7,88

B2-7 deney elemanı ilk hasar durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.112’de; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.113’te gösterilmiştir.

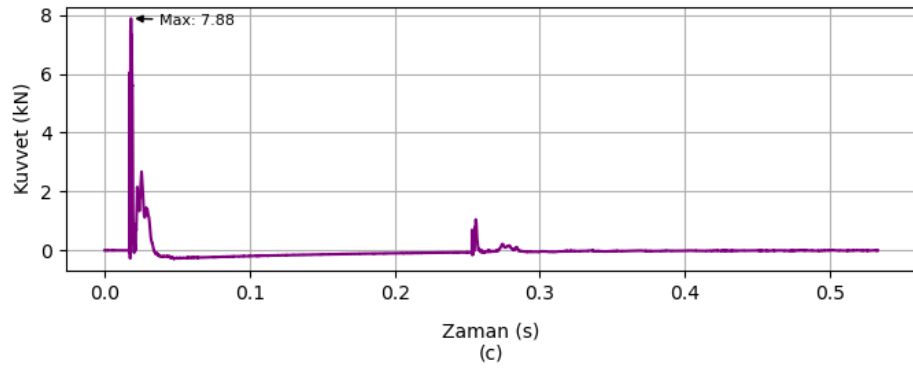
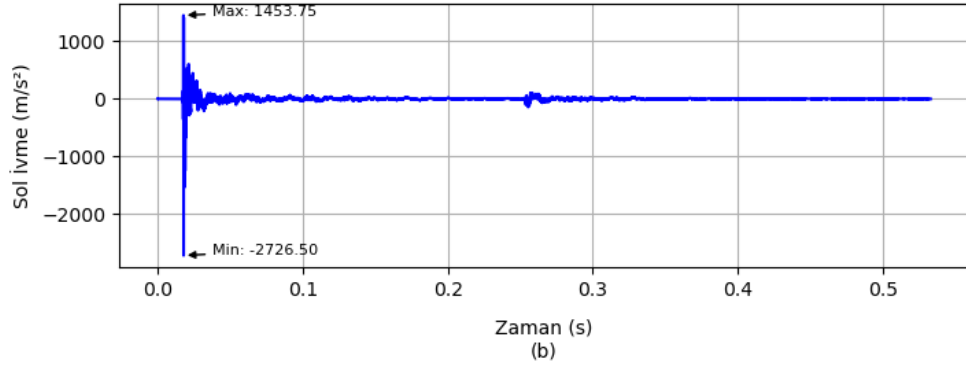
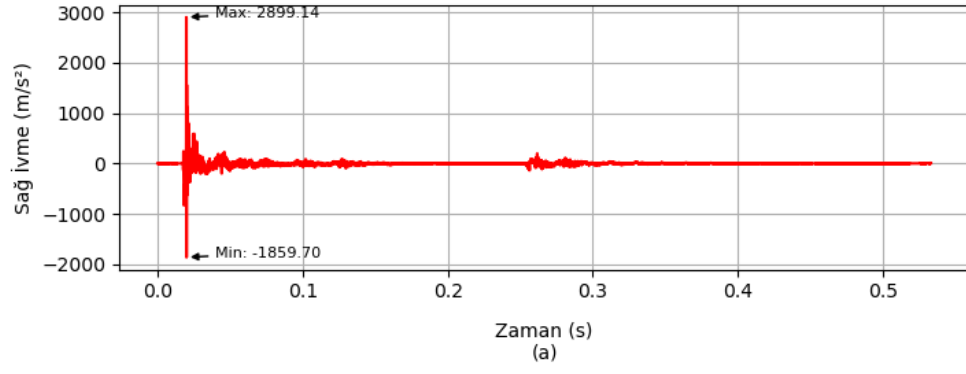


Şekil 4.112. B2-7 ilk hasar grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman

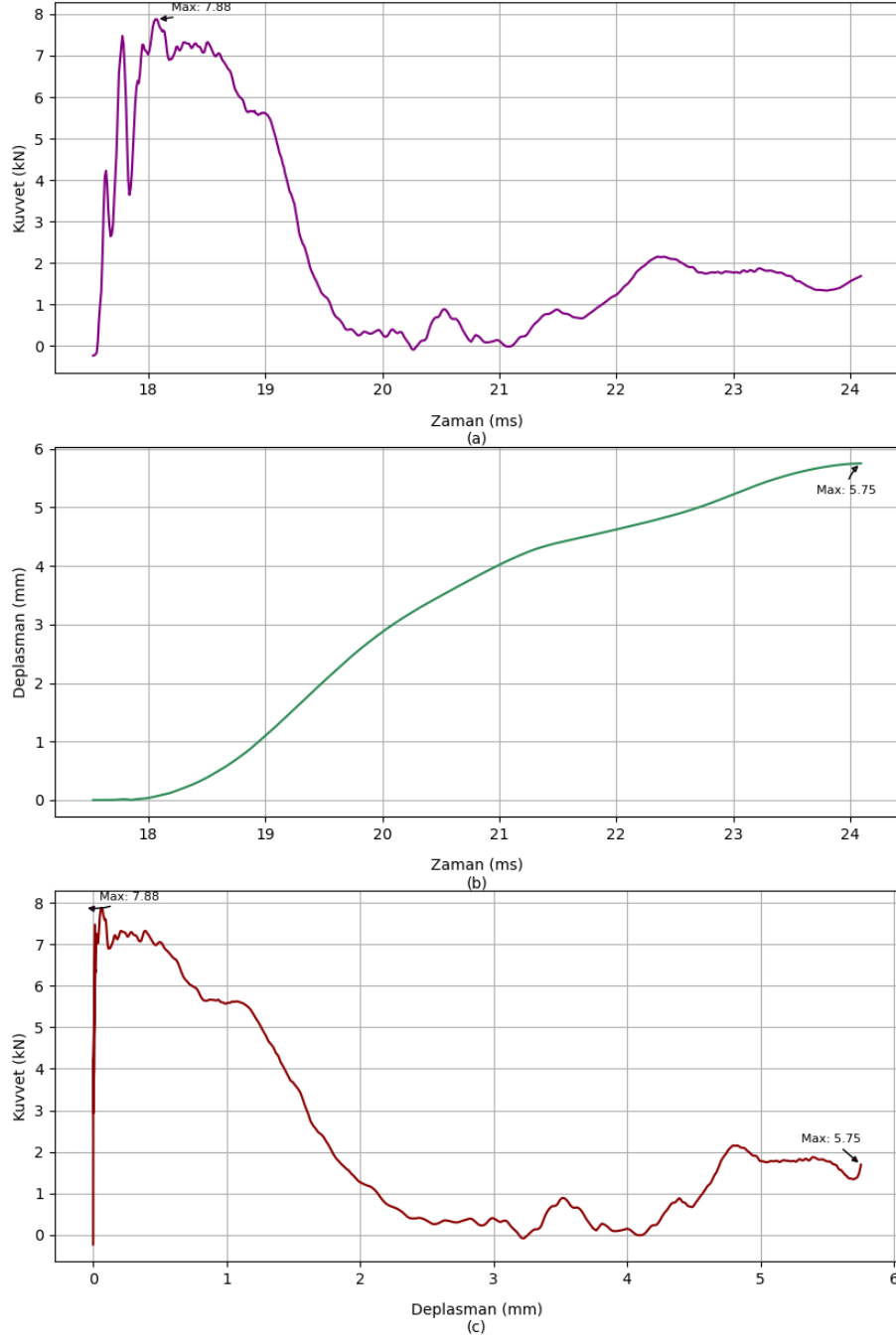


Şekil 4.113. B2-7 ilk hasar grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

B2-7 deney elemanı göçme durumu için oluşturulan ivme zaman grafikleri ile kuvvet zaman grafiği şekil 4.114’te; kuvvet-zaman, deplasman zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.115’te gösterilmiştir.



Şekil 4.114. B2-7 göçme grafikleri: a. sağ ivme-zaman, b. sol-ivme zaman, c. kuvvet-zaman



Şekil 4.115. B2-7 göçme grafikleri: a. kuvvet-zaman, b. deplasman-zaman, c. kuvvet-deplasman

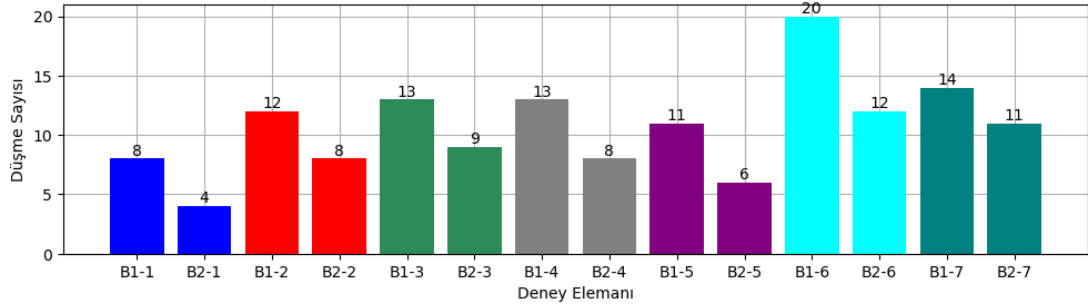
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Güçlendirilmemiş betonarme kirişlerin ve CFRP kumaş ile güçlendirilen betonarme kirişlerin ilk hasar ve göçme deney sonuçlarından elde edilen sağ ivme ve sol ivmenin minimum ve maksimum değerleri ile kuvvet ve deplasman değerleri tablo 4.16’da gösterilmiştir.

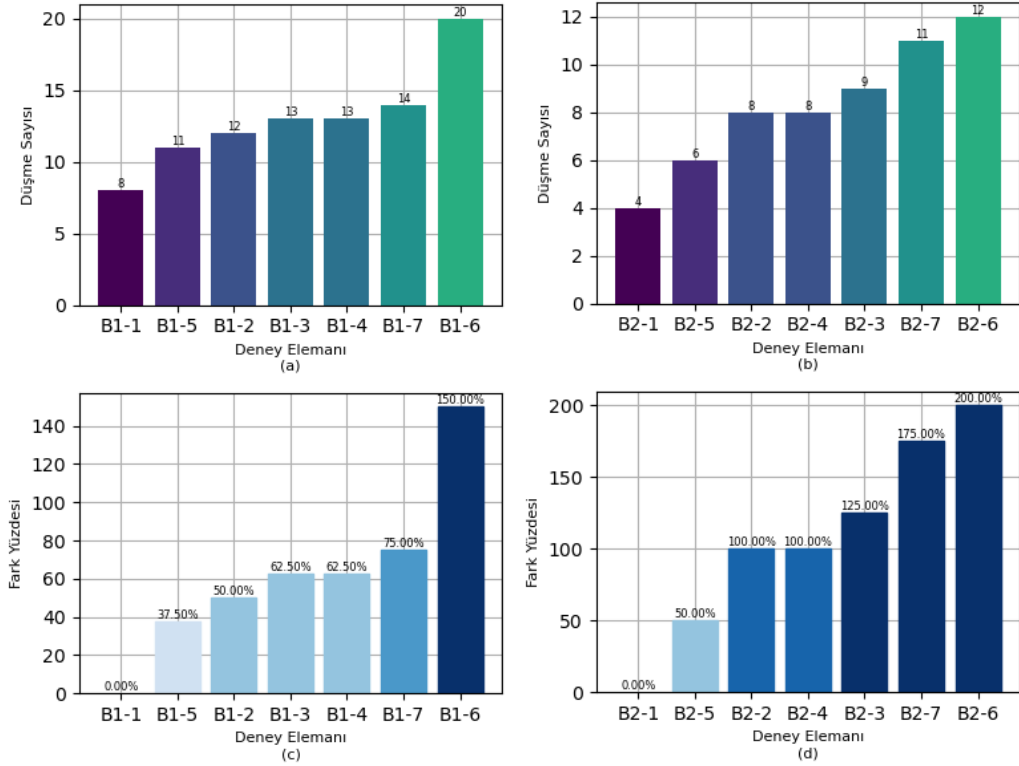
Tablo 4.16. Deneyisel çalışmadan elde edilen sonuçlar

Deney Elemanı		Sağ İvme (m/s ²)		Sol İvme (m/s ²)		Deplasman (mm)	Kuvvet (kN)
		Max.	Min.	Max.	Min.		
B1-1	İlk hasar	2778,1	-5891,8	7451,98	-15206	4,81	26,45
	Göçme	2813,09	-2439,9	16110,3	-16914,4	7,03	23,62
B1-2	İlk hasar	3655,84	-6583,6	4650,72	-3515,55	3,79	22,03
	Göçme	1238,55	-947,41	641,5	-770,4	4,43	5,83
B1-3	İlk hasar	2931,09	-3108,2	6045,79	-6619,61	4,37	20,96
	Göçme	2754,84	-2219,4	2107,72	-1610,05	6,71	15,39
B1-4	İlk hasar	3598,02	-10167	4035,2	-8871,68	3,89	23,06
	Göçme	2552,15	-2964	1027,66	-1500,61	4,68	7,57
B1-5	İlk hasar	2062,23	-4818,9	3360,77	-7761,26	3,81	22,7
	Göçme	889,75	-809,19	3878,96	-3942,1	4,49	7,57
B1-6	İlk hasar	3076,8	-3714,9	4092,99	-6723,2	3,94	22,41
	Göçme	875,92	-2006,7	2722,21	-3330,03	5,05	13,76
B1-7	İlk hasar	2636,36	-5604,3	9213,83	-13267,2	4,05	22,94
	Göçme	2585,36	-4519,2	7593,19	-10760,8	5,68	14,3
B2-1	İlk hasar	2681,95	-3816,1	3760,64	-4106,33	5,55	29,27
	Göçme	3418,72	-3729	4220,68	-2313,31	7,27	24,4
B2-2	İlk hasar	2582,99	-4582,2	2486,56	-4428,55	4,28	27,3
	Göçme	2154,43	-2914,1	2006,46	-2468,39	4,63	17,41
B2-3	İlk hasar	3653,1	-4427,7	2730,63	-5243,89	4,59	25,16
	Göçme	2643,8	-2234,9	2469,14	-1530,09	6,75	16,48
B2-4	İlk hasar	3975,34	-3746	2542,67	-5540,77	4,43	23,02
	Göçme	6396,4	-4861	1907,63	-2648,24	5,04	14,59
B2-5	İlk hasar	2881,96	-5835,9	2359,61	-5057,39	4,31	25,24
	Göçme	1791,29	-3220,5	3001,37	-2872,21	4,78	19
B2-6	İlk hasar	5806,18	-11562	6934,95	-6525,36	4,61	27,56
	Göçme	3577,82	-11114	4030,12	-2538,25	6,8	19,21
B2-7	İlk hasar	3556,9	-3676,8	1772,74	-3807,52	4,49	28,58
	Göçme	2899,14	-1859,7	1453,75	-2726,5	5,75	7,88

Her bir deney elemanı için ilk hasar durumunun gözlemlendiği düşme sayısı grafiği şekil 4.116’da, düşme sayısı ile güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre fark yüzdeleri şekil 4.117’de gösterilmiştir.



Şekil 4.116. İlk hasar düşme sayısı- deney elemanı grafiği



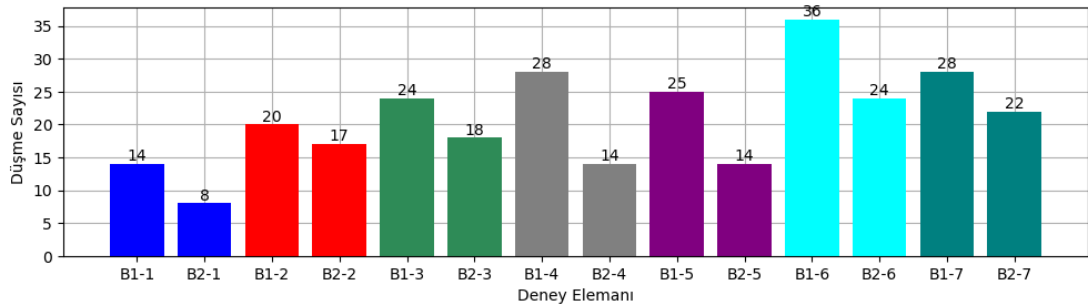
Şekil 4.117. a. B1 grubu ilk hasarın gözlemlendiği düşme sayısı grafiği, b. B2 grubu ilk hasarın gözlemlendiği düşme sayısı grafiği, c. B1-1 deney elemanına göre B1 grubu ilk hasar düşme sayısı fark yüzdesi, d. B2-1 deney elemanına göre B2 grubu ilk hasar düşme sayısı fark yüzdesi

Tüm deney elemanlarında düşme yüksekliği arttıkça ilk hasarın gözlemlendiği düşme sayısının azaldığı görülmüştür.

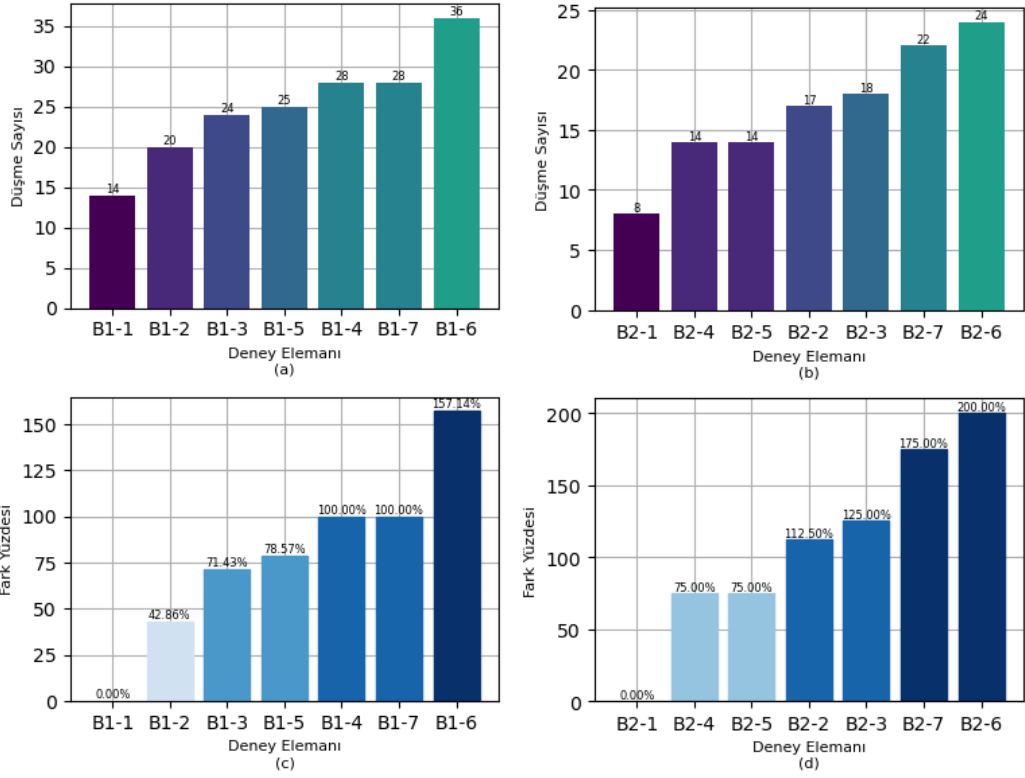
Tüm deney elemanlarında ilk hasarın gözlenmesi güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre daha yüksek düşme sayısı ile meydana gelmiştir. Düşme yüksekliği 1 m olan grup için 45° ve 135° çapraz U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-6 deney elemanında güçlendirilmemiş deney elemanına (B1-1) göre %150 farkla daha yüksek düşme sayısında ilk hasar gözlenmiştir. Bunu 45° ve 135° çapraz U şerit sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-7 deney elemanının %75 fark ile takip ettiği görülmüştür.

Düşme yüksekliği 1,5 m olan grup için 45° ve 135° çapraz U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B2-6 deney elemanında güçlendirilmemiş deney elemanına (B2-1) göre %200 farkla daha yüksek düşme sayısında göçme gözlenmiştir. Bunu 45° ve 135° çapraz U şerit sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-7 deney elemanı %175 fark ile takip ettiği görülmüş ve üçüncü olarak 90° U şerit yöntemi ile güçlendirilen B2-3 deney elemanının %125 fark ile takip ettiği görülmüştür.

Her bir deney elemanı için göçme durumunun gözlemlendiği düşme sayısı grafiği şekil 4.118’de, düşme sayısı ile güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre fark yüzdeleri şekil 4.119’da gösterilmiştir.



Şekil 4.118. Göçme durumu düşme sayısı- deney elemanı grafiği



Şekil 4.119. a. B1 grubu göçmenin gözlemlendiği düşme sayısı grafiği, b. B2 grubu göçmenin gözlemlendiği düşme sayısı grafiği, c. B1-1 deney elemanına göre B1 grubu göçme düşme sayısı fark yüzdesi, d. B2-1 deney elemanına göre B2 grubu göçme düşme sayısı fark yüzdesi

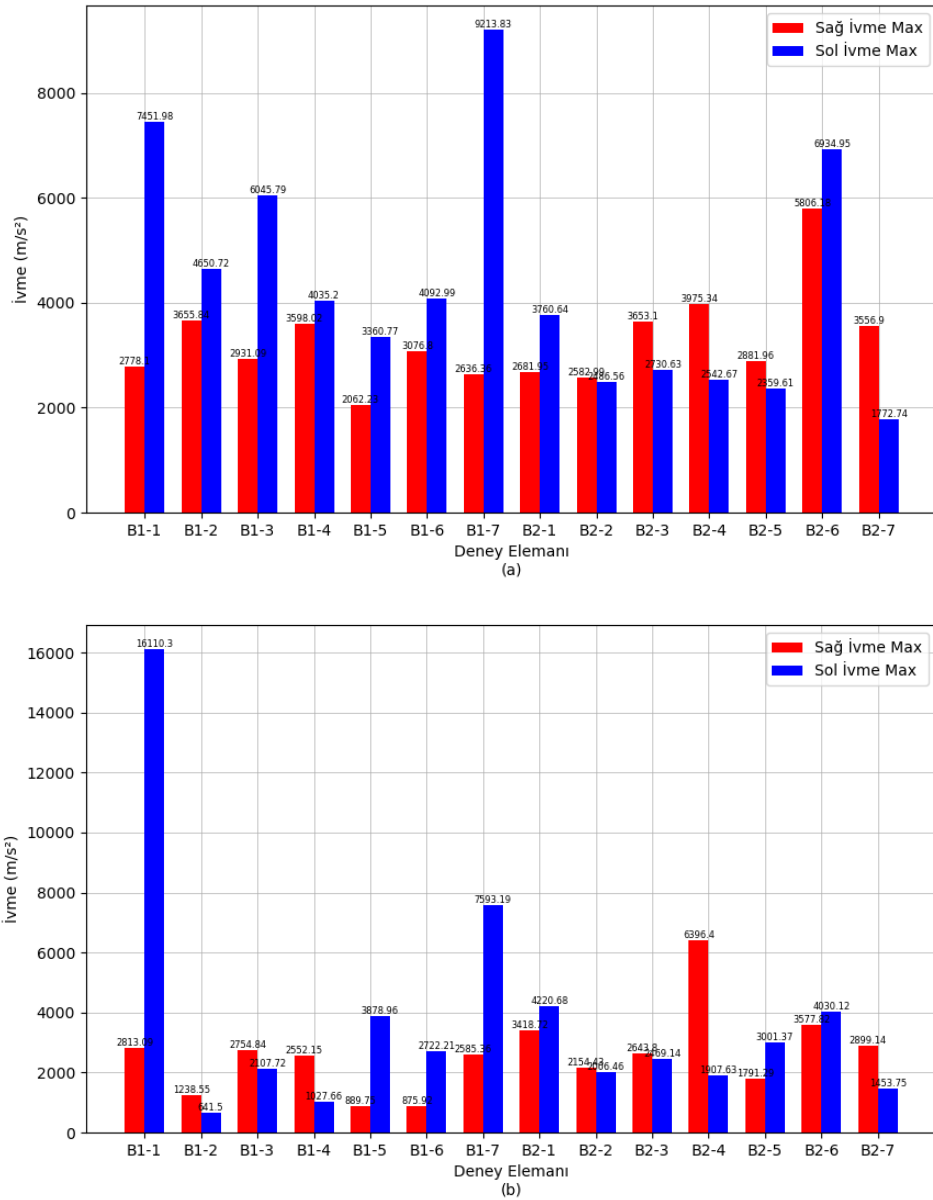
Tüm deney elemanlarında düşme yüksekliği arttıkça göçmeye götüren düşme sayısının azaldığı görülmüştür.

Tüm deney elemanlarında göçmenin gözlenmesi güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre daha yüksek düşme sayısı ile meydana gelmiştir. Düşme yüksekliği 1 m olan grup için 45° ve 135° çapraz U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-6 deney elemanında güçlendirilmemiş deney elemanına (B1-1) göre %157,14 farkla daha yüksek düşme sayısında göçme gözlenmiştir. Bunu 45° ve 135° çapraz U şerit sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-7 ve Sol tarafa 45° ve sağ tarafa 135° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-4 deney elemanı %100 fark ile takip ettiği görülmüştür.

Düşme yüksekliği 1,5 m olan grup için 45° ve 135° çapraz U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B2-6 deney elemanında güçlendirilmemiş deney elemanına (B2-1) göre %200 farkla daha yüksek düşme sayısında göçme gözlenmiştir.

Bunu 45° ve 135° çapraz U şerit sarım ile sağ ve sol mesnet bölgesine 90° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-7 deney elemanı %175 fark ile takip ettiği görülmüş ve üçüncü olarak ilk hasardaki gibi 90° U şerit yöntemi ile güçlendirilen B2-3 deney elemanının %125 fark ile takip ettiği görülmüştür.

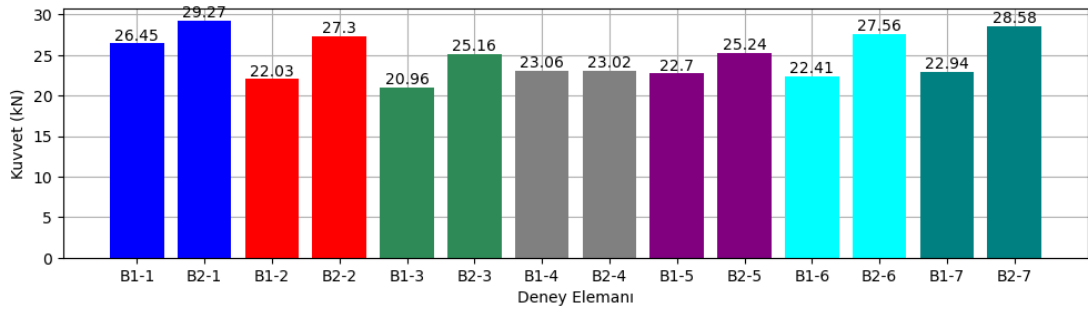
Deney elemanlarının ilk hasar ve göçme durumunda ivme değerlerinin karşılaştırılması şekil 4.120’de gösterilmiştir.



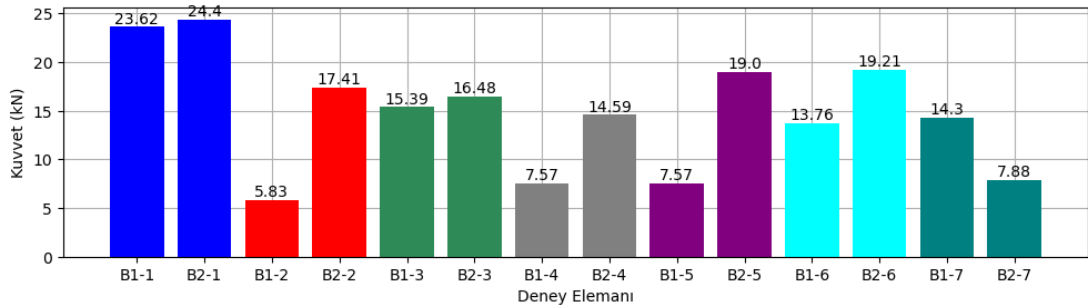
Şekil 4.120. Deney elemanlarının ivme değerlerinin karşılaştırılması: a. ilk hasar durumu, b. göçme durumu

Sağ ivme değerleri ilk hasar durumunda B1 grubunda B1-5 ve B1-7 hariç, B2 grubunda B2-2 hariç artmış; sol ivme değerleri ise B1 grubunda B1-7 hariç, B2 grubunda B2-6 hariç azalmıştır. Göçme durumunda ise B2-4 ve B2-6 sağ ivme hariç tüm ivme değerleri diğer deney elemanlarında güçlendirilmemiş deney elemanına göre azalmıştır.

Deney elemanlarının ilk hasar kuvvet değerleri şekil 4.121’de, göçme kuvvet değerleri şekil 4.122’de gösterilmiştir.



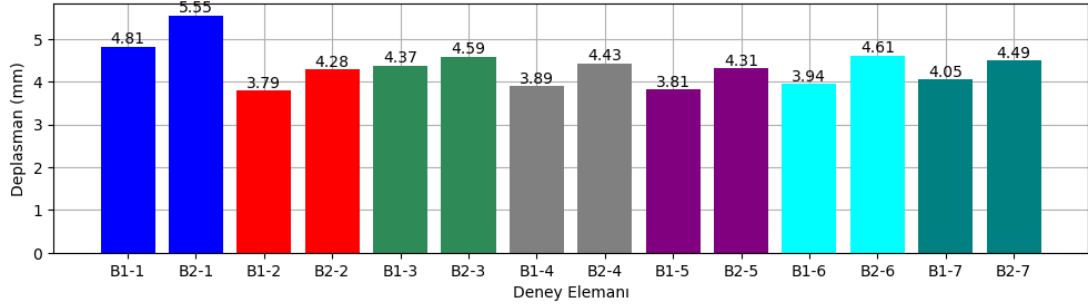
Şekil 4.121. Deney elemanlarının ilk hasar kuvvet değerleri



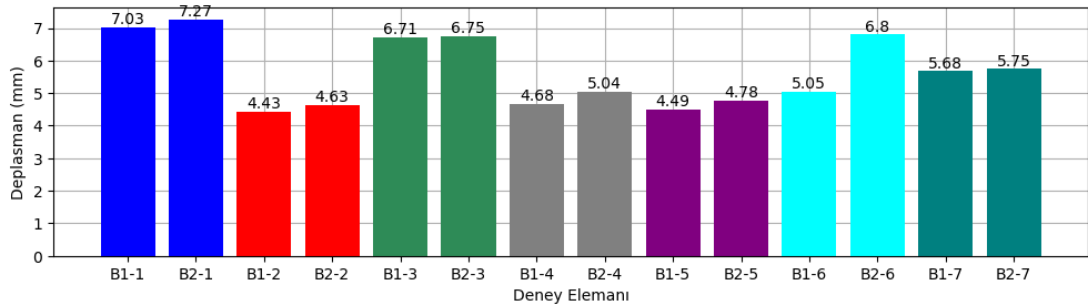
Şekil 4.122. Deney elemanlarının göçme kuvvet değerleri

İlk hasar ve göçme durumundaki değerler incelendiğinde çarpma kuvveti değerinin ilk hasardan göçme hasar durumuna doğru azaldığı görülmüştür. B1 grubu için ilk hasardaki çarpma kuvveti ortalaması 22,94 kN iken, göçme durumunda 12,58; B2 grubu için ilk hasardaki çarpma kuvveti ortalaması 26,59 kN iken, göçme durumunda 17 olduğu görülmüştür. B1-2, B1-4, B1-5 ve B2-7 deney elemanlarının göçme durumundaki kuvvet değerlerinin düşük olması CFRP ile güçlendirilen elemanların düşme sayısının artması ile monte edilen çelik plakanın altında kalan kiriş bölgelerinde meydana gelen aşınma ve beton dökülmesine bağlı olabileceği düşünülmüştür.

Deney elemanlarının ilk hasar deplasman değeri şekil 4.123'te, göçme deplasman değeri şekil 4.124'te gösterilmiştir.



Şekil 4.123. Deney elemanlarının ilk hasar deplasman değeri

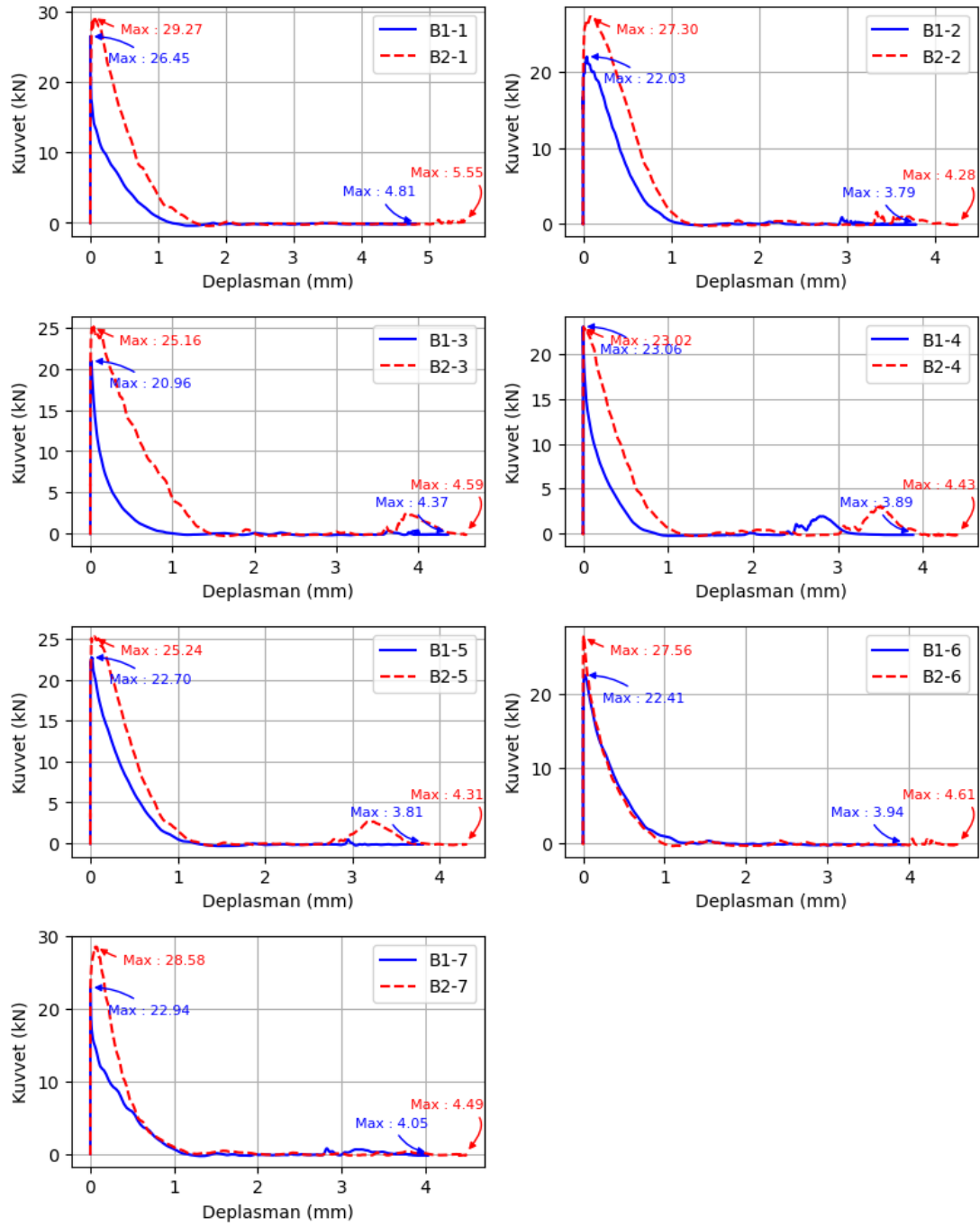


Şekil 4.124. Deney elemanlarının göçme deplasman değeri

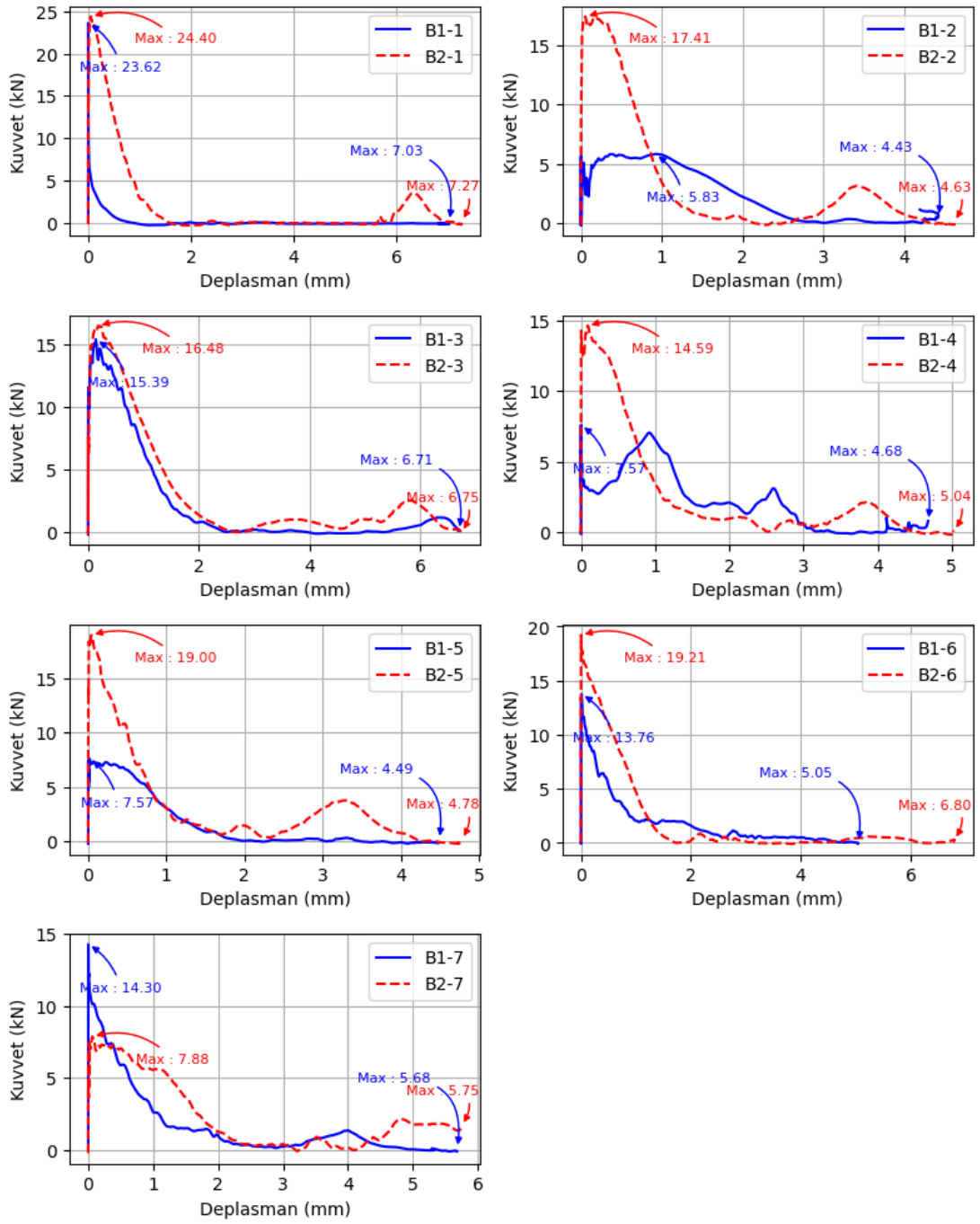
CFRP kumaş ile güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre deplasman değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. Deneysel çalışmada her iki düşme yükseklik grubunda da güçlendirilmemiş deney elemanları en büyük deplasman yapan kirişlerdir.

CFRP ile güçlendirilen kirişler arasında ise en büyük deplasman yapan kirişler 1 metre düşme yüksekliğinde 90° U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B1-3; 1,5 m yüksekliğinde ise 45° ve 135° çapraz U şerit sarım yöntemi ile güçlendirilen B2-6'dir. En küçük deplasman ise, 90° U sarım yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur (B1-2 ve B2-2).

İlk hasar kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği şekil 4.125'te ve göçme durumu kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği şekil 4.126'da gösterilmiştir.

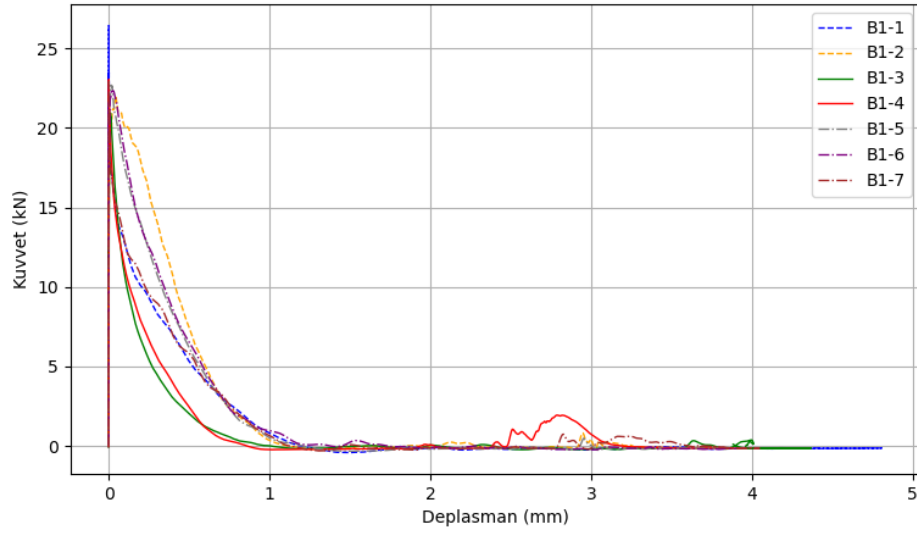


Şekil 4.125. İlk hasar kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği

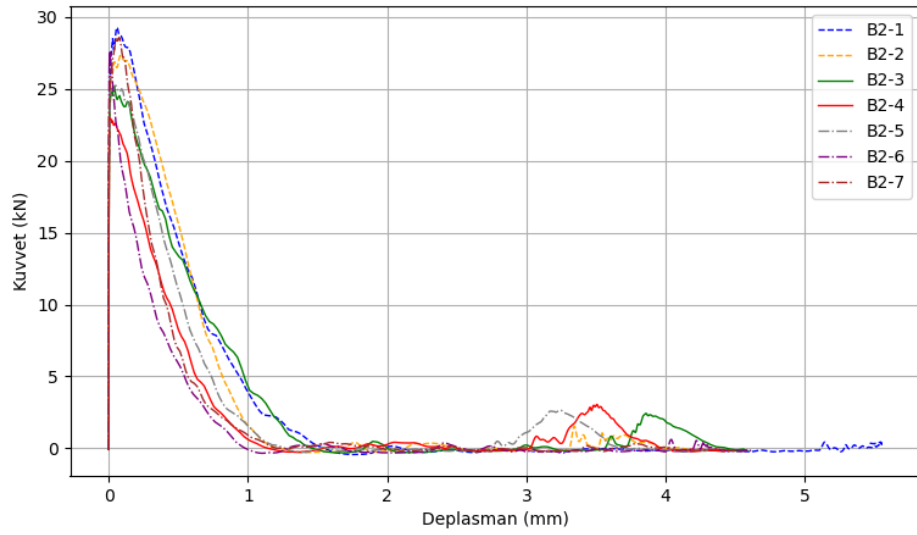


Şekil 4.126. Göçme durumu kuvvet-deplasman karşılaştırma grafiği

B1 grubu ilk hasar kuvvet-deplasman grafikleri bir arada şekil 4.127’de ve B2 grubu ilk hasar kuvvet-deplasman grafikleri bir arada şekil 4.128’de gösterilmiştir.

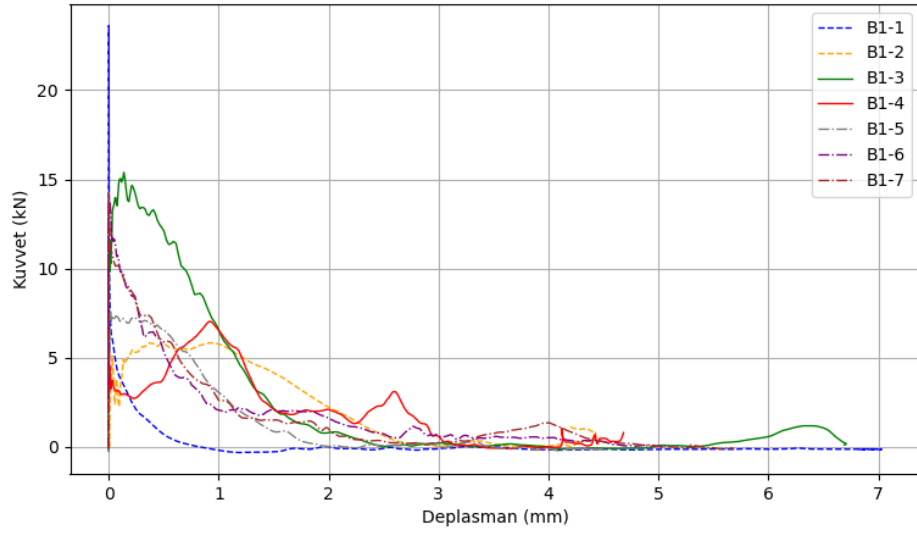


Şekil 4.127. B1 grubu deney elemanlarının ilk hasar kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması

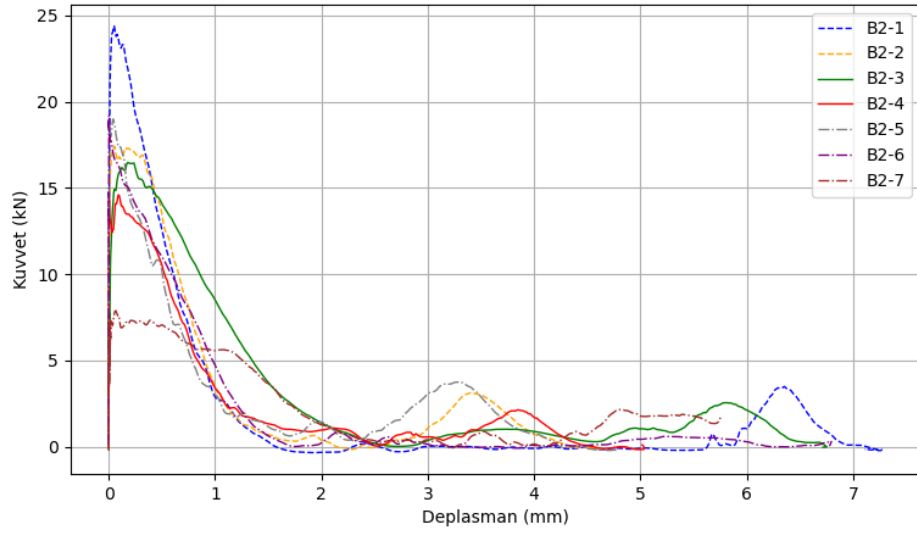


Şekil 4.128. B2 grubu deney elemanlarının ilk hasar kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması

B1 grubu göçme kuvvet-deplasman grafikleri bir arada şekil 4.129’da ve B2 grubu göçme kuvvet-deplasman grafikleri bir arada şekil 4.130’da gösterilmiştir.



Şekil 4.129. B1 grubu deney elemanlarının göçme kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması



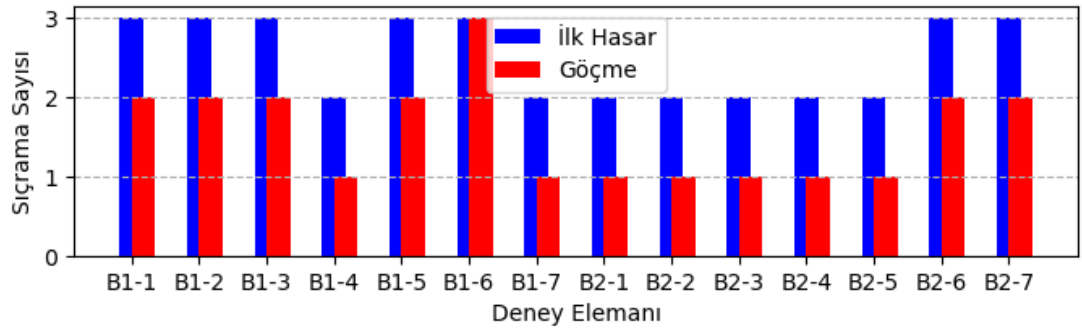
Şekil 4.130. B2 grubu deney elemanlarının göçme kuvvet-deplasman grafik karşılaştırılması

Enerji yutma kapasitesi, her bir deney elemanı için ilk hasar ve göçme durumundaki çarpma kuvveti-deplasman grafiklerinin altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilmiş olup, joule cinsinden hesaplanan değerler tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.17. Deney elemanlarının hasar durumuna göre enerji yutma kapasiteleri

Deney Elemanı	Enerji Yutma Kapasitesi (joule)	
	İlk Hasar	Göçme
B1-1	6,90	2,24
B1-2	9,42	10,14
B1-3	4,28	15,44
B1-4	5,19	9,79
B1-5	8,33	7,29
B1-6	8,59	9,51
B1-7	7,00	9,45
B2-1	17,06	16,45
B2-2	16,06	15,73
B2-3	16,48	21,51
B2-4	11,30	13,44
B2-5	13,90	15,18
B2-6	8,59	13,42
B2-7	11,09	13,42

Uygulanan çarpma kuvveti, çekice sıçrama hareketi kazandırmaktadır ve deney elemanlarında oluşan hasar durumlarına göre sıçrama sayıları şekil 4.131’de ve tablo 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.131. Deney elemanlarının hasar durumuna göre sıçrama sayıları

Tablo 4.18. Deney elemanlarının hasar durumuna göre sıçrama sayıları

Deney Elemanı	Sıçrama Sayısı	
	İlk Hasar	Göçme
B1-1	3	2
B1-2	3	2
B1-3	3	2
B1-4	2	1
B1-5	3	2
B1-6	3	3
B1-7	2	1
B2-1	2	1
B2-2	2	1
B2-3	2	1
B2-4	2	1
B2-5	2	1
B2-6	3	2
B2-7	3	2

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel tez çalışmasında farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını iki farklı yükseklikten ağırlık düşürücü test düzeneği ile deneysel olarak incelenmiştir. Birinci değişken 1 ve 1,5 m düşme yüksekliğidir. İkinci değişken ise CFRP kumaşların farklı yerleşim şekilleridir. Deney elemanları 1 m (B1 Grubu) ve 1,5 m (B2 Grubu) düşme yüksekliği değişkeni için 2 gruba ayrılmış olup, her bir gruptan birer adet deney elemanına güçlendirme uygulanmamıştır. Her grupta kalan 6 adet betonarme kiriş farklı yerleşim şekilleri uygulanarak CFRP ile güçlendirilmiştir. Bu amaçla 1.000x100x200 mm boyutlarında 14 adet betonarme kiriş deney elemanı üretilmiştir. C16/20 beton sınıfında üretilen betonarme kirişlerin her birinde üstte ve altta 2 şer adet olmak üzere toplamda 4 adet 8 mm çapında nervürlü boyuna donatı ve toplam 4 adet 6 mm çapında 25 cm aralıklarla nervürsüz (düz) enine donatı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan toplam çekiç kütlesi 12 kg olup bütün deney aşamasında sabit tutulmuştur ve çarpma etkisi göçme meydana gelene kadar uygulanmıştır. Deney elemanlarının çarpma etkisi altında verdikleri tepkiler ise sağ ve sol ivmeölçerler, kuvvet algılayıcısı, yer değişimi algılayıcı ile ölçülmüş ve veri toplama aygıtlarıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen test sonuçları kullanılarak ivme-zaman, kuvvet-zaman, deplasman-zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Deney elemanlarında meydana gelen ilk hasar ve çatlak gelişimleri incelendiğinde çatlakların, genel olarak çekicinin düşürüldüğü noktadan başlayarak yayıldığı görülmüştür.
- B1-1 ve B1-3 deney elemanlarında her bir düşme ile çatlaklar artarken, B1-4'te ise 45° açı ile sarılan CFRP şeritler çatlakların büyümesini engellemiş olduğu görülmüştür.
- Düşme yüksekliği 1 m olan gruptaki B1-4 ve B1-7 deney elemanları 28 düşme sayısı ile düşme yüksekliği 1,5 m olan gruptaki B2-4 ve B2-5 deney elemanlarının 14 düşme sayısı ile aynı düşme sayısında göçmenin gerçekleştiği görülmüştür.

- CFRP ile güçlendirilen deney elemanlarını göçmeye götüren düşme sayısı, düşme yüksekliğine bağlı olarak azalmakla birlikte, CFRP ile güçlendirilen deney elemanlarını göçmeye götüren düşme sayısının, güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre ciddi miktarda yüksek olduğu, CFRP ile güçlendirilen deney elemanlarının ise kendi aralarında farklı yerleşim yerlerine göre düşme sayılarında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. CFRP'nin daha çok çekme bölgesinde işlev gördüğü, hasarın geç oluşmasına neden olduğu görülmektedir.
- Çekicinin deney elemanına çarpması ile meydana gelen ivme, deney elemanında bir deformasyon oluşturmuştur. Bu deplasman değeri elemanın göçme haline kadar çok küçük bir artış göstermiştir.
- İlk hasar ve göçme durumundaki değerler incelendiğinde çarpma kuvveti değerinin ilk hasardan göçme hasar durumuna doğru azaldığı görülmüştür.
- CFRP kumaş ile güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında güçlendirilmemiş deney elemanlarına göre deplasman değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. En küçük deplasman ise, 90° U sarım yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur.

Ayrıca; farklı boyutlarda kiriş deney elemanları veya farklı düşme ağırlığı kullanılarak ya da düşme yükseklikleri artırılarak ya da ankraj ile güçlendirme uygulamaları eklenerek CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışları incelenebilir. Tez çalışmasındaki beton sınıfı C16/20 olarak seçilmiş olup yeni çalışmalarda farklı beton sınıfları ile çarpma etkisi araştırılabilir. Aynı zamanda farklı yerleşim şekillerine sahip CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler, sonlu eleman modellemesi kullanılarak deneysel çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Remennikov, A., Goldston, M., Sheikh, M.N. Impact performance of concrete beams externally bonded with carbon FRP sheets. Conference: Proceedings of the 24th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24), December, 2016, Perth, Australia (In: Mechanics of structures and materials: advancements and challenges-Hao & Zhang (Eds)., pp. 1695–1699).
- [2] Liu, T., Xiao, Y. Impact behavior of CFRP-strip-wrapped RC beams without stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2017, 21(5), 04017035, 1–14.
- [3] Arora, H., Hooper, P. A. and Dear, J. P. Dynamic response of full-scale sandwich composite structures subject to air-blast loading, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011, 42 (11), 1651–1662.
- [4] Morales-Alonso, G., Cendón, D. A., Gálvez, F., Erice, B., Sánchez-Gálvez, V. Blast response analysis of reinforced concrete slabs: experimental procedure and numerical simulation. *Journal of Applied Mechanics*. 2011, 78 (5), 51010, 1–12.
- [5] Pham, T., M., Chen, W., Hao, H. Review on impact response of reinforced concrete beams: Contemporary understanding and unsolved problems. *Advances in Structural Engineering*. 2021, 24 (1), 1–22.
- [6] Fujikakea, K., Soeumb, S., Matsui, T. CFRP strengthened RC beams subjected to impact loading. *Procedia Engineering*. 2017, 210, 173–181.
- [7] Chopra, A. K. Yapı Dinamiği-Teori Ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları. (Çev. Hilmi Luş), Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2015, 944 s.
- [8] Li, H., Chen, W., Hao, H. Influence of drop weight geometry and interlayer on impact behavior of RC beams. *International Journal of Impact Engineering*. 2019, 131, 222–237.
- [9] Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar H., Hung, C.C. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: a review. *Structures*. 2018, 16, 208–238.
- [10] Gorade, S.B., Joshi, D.A., Menon, R. FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading: A State Of Art. In *Recent Trends in Construction Technology and Management*. Springer, Singapore, 2022, pp. 1001–1013.
- [11] Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F., Misra, S. Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002, 14 (3), 191–209.
- [12] Gudonisa, E., Timinskasa, E., Gribniaka, V., Kaklauskasa, G., Arnautovc, A.K., Tamulėnas, V. FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design. *Engineering structures and Technologies*. 2013, 5(4), 147–158.

- [13] Pham, T.M., Hao, H. Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading. *Structures*. 2016, 7, 59–70.
- [14] Erki, M.A., Meier, U. Impact loading of concrete beams externally strengthened with CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*. 1999, 3, 117-124.
- [15] Tang, T., Saadatmanesh, H. Behavior of concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer laminates under impact loading. *Journal of Composites for Construction*. 2003, 7(3), 209–218.
- [16] Tang, T., Saadatmanesh, H. Analytical and experimental studies of fiber-reinforced polymer-strengthened concrete beams under impact loading. *ACI Structural Journal*. 2005, 102(1), 139–149.
- [17] Kantar, E. CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2009, 270 s. (Doktora Tezi)
- [18] Bhatti, A.Q., Kishi, N., Tan, K.H. Impact resistant behaviour of RC slab strengthened with FRP sheet. *Materials and Structures*. 2011, 44, 1855-1864.
- [19] Kantar, E., Arslan, A., Anıl, Ö. Beton dayanımındaki değişimin çarpma davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2011, 26(1), 115-123.
- [20] Kantar, E., Anıl, Ö. Low velocity impact behavior of concrete beam strengthened with CFRP strip. *Steel and Composite Structures*. 2012, 12(3), 207- 230.
- [21] Anıl, Ö., Yilmaz, T. Low velocity impact behavior of shear deficient RC beam strengthened with CFRP strips. *Steel and Composite Structures*. 2015, 19(2), 417–439.
- [22] Pham, T. M., Hao, H. Impact behavior of FRP-strengthened RC beams without stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2016, 20(4), 04016011-13.
- [23] Pham, T.M., Hao, H. Behavior of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads. *International Journal of Protective Structures*. 2017, 8(1), 3–24.
- [24] Kim, M., Pokhrel, A., Jung, D., Kim, S., Park, C. The strengthening effect of CFRP for reinforced concrete beam. *Procedia Engineering*. 2017, 210, 141–147.
- [25] Huo, J., Li, Z., Zhao, L., Liu, J., Xiao, Y. Dynamic behavior of carbon fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams without stirrups under impact loading. *ACI Structural Journal*. 2018, 115 (3), 775–787.
- [26] Yilmaz, T., Kiraç, N., Anıl, Ö., Erdem, R.T., Sezer, C. Low velocity impact behavior of RC two way slab strengthening with CFRP strips. *Construction and Building Materials*. 2018, 186, 1046–1063.

- [27] Naser, M.Z., Hawileh, R.A., Abdalla, J.A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: a critical review. *Engineering Structures*. 2019, 198, 109542.
- [28] Kishi, N., Komuro, M., Kawarai, T., Mikami, H. Low-velocity impact load testing of RC beams strengthened in flexure with bonded FRP sheets. *Journal of Composites for Construction*. 2020, 24(5), 04020036, 1–10.
- [29] Nigani, Y.Z., Nordström, G. FRP Strengthened RC beams subjected to drop weight impact and static load experimental study for structural response. Chalmers University Of Technology, Structural Engineering and Building Technology, Department of Architecture and Civil Engineering Division of Structural Engineering Concrete Structures, Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 240. (Master's Thesis ACEX30)
- [30] Abbood, I.S., Odaa, S., Hasan, K.F., Jasim, M.A. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 43(2), 1003–1008.
- [31] Eriksson, E., Gustafsson, V. FRP strengthened reinforced concrete beams subjected to drop weight impact and static loading. Chalmers University Of Technology, Structural Engineering and Building Technology, Department of Architecture and Civil Engineering Division of Structural Engineering Concrete Structures Gothenburg, Sweden, 2021, pp. 286. (Master's Thesis in the Master's Programme)
- [32] Eryurtlu, D., Işık, M., Uyan, M. Betonda nitelik-sertleşme deneyleri mukavemet sonuçlarının karşılaştırılması, 2002, İTÜ, İnşaat Fak., Yapı Malzemesi, ABD.