



**BOYUNA DONATI YERLEŞİM DÜZENİNİN
BETONARME KİRİŞ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Enes KANDEMİR

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU**

**2024
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BOYUNA DONATI YERLEŞİM DÜZENİNİN BETONARME KİRİŞ EĞİLME
DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Enes KANDEMİR

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Ana Bilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

26 / 01 / 2024

Enes KANDEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOYUNA DONATI YERLEŞİM DÜZENİNİN BETONARME KİRİŞ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Enes KANDEMİR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

219M403 kod numaralı "*Soğuk Havalarda (Kışın) Dökülmüş Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi*" başlıklı TÜBİTAK1001 projesi kapsamında fonlanan bu tez çalışmasında, Boyuna donatı yerleşim düzeninin betonarme kirişlerde eğilme davranışı üzerindeki etkileri hem deneysel hem de numerik olarak incelenmiştir. Deney numunelerinin tasarımında, SAP2000 ve RESPONSE2000 yazılımları ile birlikte yönetmelik formülleri kullanılarak 3 farklı tasarım kıyaslanmıştır. Toplamda 3 farklı gruptan oluşan 8 kiriş numunesi, tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin yük-deformasyon grafikleri, enerji sönümleme kapasiteleri, süneklik değerleri, başlangıç rijitliği, eğilme rijitliği ve sekant rijitliği gibi değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada donatı düzeninin etkisi irdelenirken demet donatı kavramı üzerinde yoğunlaşmış olup, aynı çekme donatısı oranına sahip demet donatılı kesit ile tekil donatılı kesit arasında anlamlı bir farklılık gözlemlenmemiştir.

2024, 148 sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, Eğilme davranışı, Tam ölçek, Demet donatı, Deneysel inceleme, Donatı düzeni

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LONGITUDINAL REINFORCEMENT PLACEMENT ON THE BENDING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Enes KANDEMİR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

In this thesis study, funded by the TÜBİTAK1001 project titled "Experimental Investigation of the Behavior of Reinforced Concrete Beams Under Bending Effect in Cold Weather (Winter)", the effects of longitudinal reinforcement arrangement on the bending behavior of reinforced concrete beams were investigated both experimentally and numerically. In the design of the test specimens, 3 different designs were compared using 3 different design methods, including the regulations and the SAP2000 and RESPONSE2000 software. A total of 8 beam specimens, consisting of 3 different groups, were subjected to full-scale four-point bending tests. The load-deflection curves, energy dissipation capacities, ductility values, initial stiffness, bending stiffness, and secant stiffness of the test specimens were calculated. While investigating the effect of reinforcement arrangement, the concept of bundled reinforcement was focused on, and no significant difference was observed between the bundled reinforcement section and the single reinforcement section with the same tensile reinforcement ratio.

2024, 148 page

Keywords: Concrete beam, Bending behavior, Full scale, Bundled reinforcement, Experimental investigation, Reinforcement arrangement

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimin ilk gününden, lisansüstü eğitimimin son gününe kadar gerek eğitim hayatımda, gerek sosyal yaşamımda her zaman yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her konuda bilgi birikimini ve deneyimlerini aktaran saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU'ya teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırmaları Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve proje danışmanları Prof. Dr. İlker KAZAZ ve Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e vermiş oldukları bütün katkılar için teşekkür ederim.

Çalışması esnasında bilgi birikimlerini aktaran ve yapıcı eleştirileriyle çalışmanın özgünlüğüne önemli katkılarında bulunan kıymetli tez savunma jüri üyelerim Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK'a ve Doç. Dr. İrfan KOCAMAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması döneminde hiçbir desteğini esirgemeyen Muhammet ŞAHİN, Oktay ÇAKAR, Burak GEDİK, Dursun Burak ÖZDOĞAN, Burak SAHİN, Muhammet Enes ÇELEBİ, Sabri AYDEMİR ve Hilmi KARADAYI'ya ve iş arkadaşlarım STATIX ailesine teşekkür ederim.

Uzun soluklu bilimsel çalışma döneminde maddi-manevi her türlü destek sağlayan kıymetli ailem; Hatice KANDEMİR, Şeref KANDEMİR, Ebubekir KANDEMİR, Ebru EMEÇ ve Esmâ KANDEMİR'e teşekkür etmeyi borç bilirim.

Son olarak motivasyon kaynağım, müstakbel eşim İpek Buse DEĞER'e teşekkürü borç bilirim.

Enes KANDEMİR

Ocak 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM	23
3.1. Deneylerle Kıyaslanacak Numunelerin, Klasik Yöntemler ve Bilgisayar Programları Yardımı ile Tasarımı ve Ön Analizi	24
3.1.1. Donatı düzeni hesaplamaları	24
3.2. Deneylerde Kullanılacak Malzemelerin Belirlenmesi	25
3.3. Ana Deneyde Kullanılacak Malzemelerinin Ön Deneylerinin Yapılması ve Gerçek Dayanım Tayini	25
3.4. Belirlenen Malzeme Dayanımlarına Göre Ön Analizin Yeniden Yapılması.....	30
3.5. Ana Deney Düzenineğin Planlanması, Deney Sonucunda İstenilen Verilere Uygun Ölçüm Materyallerinin Tayini	31
3.5.1. Ana deney düzeneğinin planlanması.....	31
3.5.2. Deney sonucunda istenilen verilere uygun ölçüm materyallerinin tayini.....	38
3.6. Deney Numunelerin Hazırlanması.....	40
3.6.1. Kalıp yapımı.....	41
3.6.2. Çelik donatı kafeslerinin yapımı	42
3.10. Deney Sonuçlarının Öngörülen Koşullar Çatısı Altında İrdelenmesi ve Kıyaslanması	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	50
4.1. Deney Numuneleri ve Kesit Özellikleri	50
4.1.1. K1-1 deney numunesi özellikleri	51

4.1.2. K1-2 deney numunesi özellikleri	52
4.1.3. K2-1 deney numunesi özellikleri	52
4.1.4. K2-2 deney numunesi özellikleri	53
4.1.5. K2-3 deney numunesi özellikleri	53
4.1.6. K3-1 deney numunesi özellikleri	54
4.1.7. K3-2 deney numunesi özellikleri	55
4.1.8. K3-3 deney numunesi özellikleri	55
4.2. Deney Kiriş Grupları.....	56
4.2.1. K1 grubu kirişler	57
4.2.2. K2 grubu kirişler	57
4.2.3. K3 grubu kirişler	58
4.3. SAP2000 Yazılımı ile Kesit Analizi	59
4.3. K1-1 Kirişi Deneysel Çalışmaları	64
4.4. K1-2 Kirişi Deneysel Çalışmaları	73
4.5. K2-1 Kirişi Deneysel Çalışmaları	82
4.6. K2-2 Kirişi Deneysel Çalışmaları	91
4.7. K2-3 Kirişi Deneysel Çalışmaları	100
4.8. K3-1 Kirişi Deneysel Çalışmaları	109
4.9. K3-2 Kirişi Deneysel Çalışmaları	117
4.10. K3-3 Kirişi Deneysel Çalışmaları	127
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	138
5.1. K1 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması	138
5.2. K2 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması.....	139
5.3. K3 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması.....	141
KAYNAKLAR	147

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°C	Santigrat derece
α	Termal genleşme katsayısı
σ	Gerilme
σ_s	Çelik çekme gerilme
ϵ	Birim şekil değiştirme
ΔL	Boy değişimi
Δt	Zaman aralığı
cm	Santimetre
E	Beton elastik modülü
f_{ck}	Betonun karakteristik eksenel basınç dayanımı
f_{ctk}	Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_u	Çelik donatı karakteristik maksimum dayanımı
f_{yk}	Çelik donatı karakteristik akma dayanımı
kN	KiloNewton
L	Boy
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
M_r	Moment taşıma kapasitesi
V	Hacim
ϕ_e	Demet donatının eşdeğer çapı

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ACI-318-11	Building code requirements for. structural concrete (Yapısal beton için bina kodu gereklilikleri)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
B	Beam (Kiriş)
FRP	Fiber reinforced polymer (Fiber takviyeli polimer)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam elyaf takviyeli polimer)
IS CODE 456	Plain and Reinforced Concrete
LVDT	Linear variable differential transformer (Doğrusal değişken diferansiyel transformatör)
NSCP	National Standard Code Of Philipines (Filipinler Ulusal Standartı)
RC	Reinforced concrete (Betonarme)
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	Türk standardı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UPS	Uninterruptible power supply (Kesintisiz güç kaynağı) UPV ultrasonik atılımlı dalga hızı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mosluw'un ihtiyaçlar hiyerarşisi piramidi	1
Şekil 1.2. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi	1
Şekil 1.3. Yapı dünyasının geçmişten günümüze değişimi	2
Şekil 1.4. Eyfel Kulesi ve Burç Halife gökdeleni	4
Şekil 1.5. Eğilme etkisi altında, pozitif momentli betonarme kiriş	5
Şekil 1.6. Çalışma kapsamı	5
Şekil 1.7. Demetlenmemiş ve demetlenmiş donatı düzeni	6
Şekil 1.8. Amerikan yönetmeliğinde önerilen demet donatı şekilleri.....	6
Şekil 1.9. Eşdeğer çap gösterimi (TS500 2000)	8
Şekil 2.1. Numune donatı düzeni (Maranan et al. 2015)	11
Şekil 2.2. Yük-deplasman eğrisi (Maranan et al. 2015)	11
Şekil 2.3. Demetlenmiş ankrajlar (Qing-wen et al. 2018)	13
Şekil 2.4. Deney numunelerinin hazırlanması (Sun et al. 2019)	14
Şekil 2.5. L2-L3 numuneleri (Sun et al. 2019)	14
Şekil 2.6. Kiriş donatı düzeni (Sun et al. 2021)	16
Şekil 2.7. Kiriş çatlak deseni (Sun et al. 2021)	17
Şekil 2.8. Eşdeğer donatı alanı (Metelli et al. 2021).....	18
Şekil 2.9. Tek ve çift donatılı kesit deney sonuçları (Walujodjati et al. 2021).....	19
Şekil 2.10. Donatı demetlenme tipleri (Walujodjati et al. 2021)	20
Şekil 2.11. Eğilme deney düzeneği (Cao et al. 2022)	20
Şekil 2.12. Çatlak desenleri (Cao et al. 2022)	21
Şekil 3.1. Nervürlü çelik donatı görünümü.....	25
Şekil 3.2. Çelik çekme deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	26
Şekil 3.3. Çelik donatının çekme deney sonu ve başlangıcındaki görünümü.....	27

Şekil 3.4. Response2000 ve SAP2000 (Section Designer) analiz ekranı	30
Şekil 3.5. Çelik çerçeve yükleme düzeneği ön görünüşü (Şahin 2023).....	32
Şekil 3.6. Yükleme düzeneği yan görünüşü (Şahin 2023).....	32
Şekil 3.7. Tekla Structures (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli (Şahin 2023)	33
Şekil 3.8. SAP2000 (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli (Şahin 2023)	33
Şekil 3.9. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne tasarımı (Şahin 2023)	34
Şekil 3.10. Maksimum moment bölgesi	35
Şekil 3.11. İmal edilen yükleme düzeneği	36
Şekil 3.12. Portatif vinçler ve yükleme çerçevesine ait görüntü (Şahin 2023).....	36
Şekil 3.13. Yükleme çerçevesine ait mesnet görüntüsü (Şahin 2023).....	37
Şekil 3.14. Hidrolik piston uzunluk kontrolü	37
Şekil 3.15. Deneylerde kullanılacak yük hücresi	38
Şekil 3.16. Deplasman ölçümlerinde kullanılan sensörler.....	38
Şekil 3.17. Betonarme kiriş numunelerinin yük ve deformasyon sensörlerinin yerleşim şeması.	39
Şekil 3.18. Çalışmada kullanılan veri toplama sistemine ait görsel	40
Şekil 3.19. Kalıp imalatı	41
Şekil 3.20. Kalıp imalatının tamamlanmış hali.....	41
Şekil 3.21. Kalıp içi temizliği	42
Şekil 3.22. Çelik donatı çekme testlerinden genel bir görünüm	43
Şekil 3.23. İmalatı devam eden kirişler	43
Şekil 3.24. İmalatı tamamlan kirişler	44
Şekil 3.25. Beton için tahribatsız malzeme dayanım tayini görüntüleri	45
Şekil 3.26. Yatay deformasyon sensörlerinin yerleşimi.	47
Şekil 3.27. Deneye hazır hale getirilen kirişin ön ve arka cephe görüntüleri	47

Şekil 3.28. Deney sonrası çatlak aralığı işaretleme çalışması	48
Şekil 3.29. Deneye tabi tutulan kirişlerin muhafaza edildiği alan	48
Şekil 3.30. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinde rijitlik hesaplamaları	49
Şekil 4.1. Kiriş boyuna donatı boyutları	51
Şekil 4.2. Kiriş numunelerine ait ortak kesit detayı.....	51
Şekil 4.3. K1-1 kesit detayı.....	52
Şekil 4.4. K1-2 kesit detayı.....	52
Şekil 4.5. K2-1 kesit detayı.....	53
Şekil 4.6. K2-2 kesit detayı.....	53
Şekil 4.7. K2-3 kesit detayı.....	54
Şekil 4.8. K3-1 kesit detayı.....	54
Şekil 4.9. K3-2 kesit detayı.....	55
Şekil 4.10. K3-3 kesit detayı.....	55
Şekil 4.11. Eşdeğer çap yöntemi (TS500 2000)	56
Şekil 4.12. K1 kiriş grubu toplu kesit detayları	57
Şekil 4.13. K2 kiriş grubu toplu kesit detayları	58
Şekil 4.14. K3 kiriş grubu toplu kesit detayları	59
Şekil 4.15. SAP2000 Section Designer menüsü (SAP2000 2000)	60
Şekil 4.16. K1 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü (SAP2000 2000).....	60
Şekil 4.17. K2 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü (SAP2000 2000).....	60
Şekil 4.18. K3 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü.....	60
Şekil 4.19. K1 grubu teorik moment-eğrilik grafiği	62
Şekil 4.20. K2 grubu teorik moment-eğrilik grafiği	63
Şekil 4.21. K3 grubu teorik moment-eğrilik grafiği	64
Şekil 4.22. K1-1 numunesinin deney öncesi görünümü	65

Şekil 4.23. K1-1 numunesi sensör yerleşim düzeni	65
Şekil 4.24. K1-1 numunesinin deney sonrası görünümü	67
Şekil 4.25. K1-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	68
Şekil 4.26. K1-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	68
Şekil 4.27. K1-1 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	69
Şekil 4.28. K1-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi	69
Şekil 4.29. K1-1 numunesi deplasman paterni	70
Şekil 4.30. K1-1 numunesi çatlak deseni.....	71
Şekil 4.31. K1-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	72
Şekil 4.32. K1-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	72
Şekil 4.33. K1-1 numunesinde kopan çekme donatısına ait görüntü.....	73
Şekil 4.34. K1-2 numunesinin deney öncesi görünümü	74
Şekil 4.35. K1-2 numunesi sensör yerleşim düzeni	74
Şekil 4.36. K1-2 numunesinin deney sonrası görünümü	76
Şekil 4.37. K1-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	77
Şekil 4.38. K1-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	77
Şekil 4.39. K1-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	78
Şekil 4.40. K1-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi	78
Şekil 4.41. K1-2 numunesi deplasman paterni	79
Şekil 4.42. K1-2 numunesi çatlak deseni.....	80
Şekil 4.43. K1-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	81
Şekil 4.44. K1-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	81
Şekil 4.45. K2-1 numunesinin çekme donatısı akma (incelme) bölgesine ait görüntü...	82
Şekil 4.46. K2-1 numunesinin deney öncesi görünümü	83
Şekil 4.47. K2-1 numunesi sensör yerleşim düzeni	83
Şekil 4.48. K2-1 numunesinin deney sonrası görünümü	85

Şekil 4.49. K2-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	86
Şekil 4.50. K2-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	86
Şekil 4.51. K1-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	87
Şekil 4.52. K2-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi	88
Şekil 4.53. K2-1 numunesi deplasman paterni	88
Şekil 4.54. K2-1 numunesi çatlak deseni.....	89
Şekil 4.55. K2-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	90
Şekil 4.56. K2-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	90
Şekil 4.57. K2-2 numunesinin deney öncesi görünümü	91
Şekil 4.58. K2-2 numunesi sensör yerleşim düzeni.....	92
Şekil 4.59. K2-2 numunesinin deney sonrası görünümü	93
Şekil 4.60. K2-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	94
Şekil 4.61. K2-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	94
Şekil 4.62. K2-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	95
Şekil 4.63. K2-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi	96
Şekil 4.64. K2-2 numunesi deplasman paterni	96
Şekil 4.65. K2-2 numunesi çatlak deseni.....	97
Şekil 4.66. K2-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	98
Şekil 4.67. K2-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	98
Şekil 4.68. K2-2 numunesinin mesnetlerinde deney sonunda ortaya çıkan görüntü	99
Şekil 4.69. K2-2 numunesi donatı akma bölgesi	99
Şekil 4.70. K2-3 numunesinin deney öncesi görünümü	100
Şekil 4.71. K2-3 numunesi sensör yerleşim düzeni.....	101
Şekil 4.72. K2-3 numunesinin deney sonrası görünümü	102
Şekil 4.73. K2-3 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	103
Şekil 4.74. K2-3 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	103

Şekil 4.75. K2-3 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	104
Şekil 4.76. K2-3 numunesi sekant rijitliği eğrisi	105
Şekil 4.77. K2-3 numunesi deplasman paterni	105
Şekil 4.78. K2-3 numunesi çatlak deseni.....	106
Şekil 4.79. K2-3 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	107
Şekil 4.80. K2-3 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	107
Şekil 4.81. K2-3 numunesine ait çubuk sensörlerin deney başlangıcı ve deney sonu görüntüsü.....	108
Şekil 4.82. K2-3 numunesi, çekme donatısının akma bölgesi	108
Şekil 4.83. K3-1 numunesinin deney öncesi görünümü	109
Şekil 4.84. K3-1 numunesi sensör yerleşim düzeni.....	110
Şekil 4.85. K3-1 numunesinin deney sonrası görünümü	111
Şekil 4.86. K3-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	112
Şekil 4.87. K3-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	112
Şekil 4.88. K3-1 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	113
Şekil 4.89. K3-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi	113
Şekil 4.90. K3-1 numunesi deplasman paterni	114
Şekil 4.91. K3-1 numunesi çatlak deseni.....	115
Şekil 4.92. K3-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	116
Şekil 4.93. K3-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	116
Şekil 4.94. K3-2 burkulma gerçekleşen basınç donatısı	117
Şekil 4.95. K3-2 numunesinin deney öncesi görünümü	118
Şekil 4.96. K3-2 numunesi sensör yerleşim düzeni.....	118
Şekil 4.97. K3-2 numunesinin deney sonrası görünümü	120
Şekil 4.98. K3-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	121
Şekil 4.99. K3-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	121

Şekil 4.100. K3-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	122
Şekil 4.101. K3-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi	123
Şekil 4.102. K3-2 numunesi deplasman paterni	123
Şekil 4.103. K3-2 numunesi çatlak deseni.....	124
Şekil 4.104. K3-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	125
Şekil 4.105. K3-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	125
Şekil 4.106. K3-2 numunesi deney sonunda ortaya çıkan mesnet görüntüsü.....	126
Şekil 4.107. K3-2 numunesi kopan bağ teli ve sıyrılan sargı donatısı görüntüsü.....	126
Şekil 4.108. K3-2 eğilme donatısında meydana gelen akma ve incelme.....	127
Şekil 4.109. K3-3 numunesinin deney öncesi görünümü	128
Şekil 4.110. K3-3 numunesi sensör yerleşim düzeni.....	128
Şekil 4.111. K3-3 numunesinin deney sonrası görünümü	130
Şekil 4.112. K3-3 numunesine ait yük-deplasman eğrisi	131
Şekil 4.113. K3-3 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi	131
Şekil 4.114. K3-3 numunesi eğilme rijitliği eğrisi.....	132
Şekil 4.115. K3-3 numunesi sekant rijitliği eğrisi	133
Şekil 4.116. K3-3 numunesi deplasman paterni	133
Şekil 4.117. K3-3 numunesi çatlak deseni.....	134
Şekil 4.118. K3-3 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü.....	135
Şekil 4.119. K3-3 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu	135
Şekil 4.120. K3-3 numunesine ait mesnetin deney sonunda ortaya çıkan durumu	136
Şekil 4.121. K3-3 numunesi yük uygulama noktasının deney sonu görüntüsü.....	136
Şekil 4.122. K3-3 numunesi burkulma gerçekleşen basınç donatısı	137
Şekil 4.123. K3-3 numunesi akma meydana gelen çekme donatısı.....	137
Şekil 5.1. K1 grubu toplu yük-deplasman eğrileri.....	139
Şekil 5.2. K2 grubu toplu yük-deplasman eğrileri.....	141

Şekil 5.3. K3 grubu toplu yük-deplasman eğrileri	143
Şekil 5.4. K1-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	144
Şekil 5.5. K1-2 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	144
Şekil 5.6. K2-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	145
Şekil 5.7. K2-2 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	145
Şekil 5.8. K2-3 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	145
Şekil 5.9. K3-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	146
Şekil 5.10. K3-2 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	146
Şekil 5.11. K3-3 kirişine ait deney sonu çatlak deseni	146

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çelik çekme deneyleri manuel verileri	26
Çizelge 3.2. Üçüncü gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar	28
Çizelge 3.3. Yedinci gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar	29
Çizelge 3.4. Yirmi sekizinci gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar	30
Çizelge 4.1. K1 kiriş grubuna ait donatı değerleri	57
Çizelge 4.2. K2 kiriş grubuna ait donatı değerleri	58
Çizelge 4.3. K3 kiriş grubuna ait donatı değerleri	59
Çizelge 4.4. K1 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi	62
Çizelge 4.5. K2 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi	63
Çizelge 4.6. K3 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi	64
Çizelge 4.7. K1-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	66
Çizelge 4.8. K1-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	75
Çizelge 4.9. K2-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	84
Çizelge 4.10. K2-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	92
Çizelge 4.11. K2-3 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	101
Çizelge 4.12. K3-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	110
Çizelge 4.13. K3-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	119
Çizelge 4.14. K3-3 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar	129
Çizelge 5.1. K1 kiriş grubu deney sonu verileri	138
Çizelge 5.2. K1 kiriş grubu rijitlik verileri	138
Çizelge 5.3. K1 kiriş grubu süneklik ve enerji sönümlleme miktarları	139
Çizelge 5.4. K2 kiriş grubu deney sonu verileri	140
Çizelge 5.5. K2 kiriş grubu rijitlik verileri	140
Çizelge 5.6. K2 kiriş grubu süneklik ve enerji sönümlleme miktarları	141

Çizelge 5.7. K3 kiriş grubu deney sonu verileri	142
Çizelge 5.8. K3 kiriş grubu rijitlik verileri	142
Çizelge 5.9. K3 kiriş grubu süneklik ve enerji sönümleme miktarları	143



1. GİRİŞ

İnsanın dünyaya ayak bastığı günden bugüne kadar, barınma ihtiyacı hep var olmuştur. Psikoloji biliminin önemli karakterlerinden Şekil 1.1’de gösterilen Abraham Moslow’un kendi adını taşıyan “İhtiyaçlar Hiyerarşisi” kuramına göre, 5 basamaktan oluşan insani ihtiyaçların ilki fizyolojik ihtiyaçlar, ikinci ise güvenlik ihtiyacıdır. Yani barınma ihtiyacı bir insanın nefes alıp verme ihtiyacından sonra en önde gelen ihtiyacıdır.



Şekil 1.1. Moslow’un ihtiyaçlar hiyerarşisi piramidi

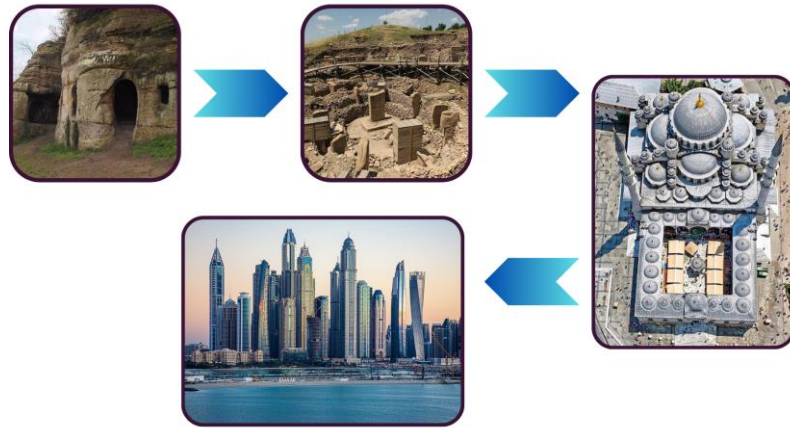
Dünyada ve özellikle ülkemizde meydana gelen, yakın tarihimizi de derinden etkileyen doğa olayları bizlere yapılarımızın taşıyıcı sistem güvenliğinin ne ölçüde önemli olduğunu göstermektedir. Şekil 1.2’de ülkemize adına son dönemlerin en yıkıcı etkilerini yaratan doğa olayı olan 6 Şubat depremine ait bir görüntü yer almaktadır.



Şekil 1.2. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yapılarında ilk olarak taş ve ahşap malzemelerini kullanmaya başladı. Ardından ilk örnekleri ülkemizde, Çatalhöyük'te yer alan kerpiç yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Ve ardından belki de yapı tarihinin en önemli malzemelerinden olan betonun kullanımı başlamıştır. Betonun icadı ile yapılara şekil verebilmek daha kolay hale gelmiştir. Bu da uygarlıklar için adeta bir güç gösterisi haline gelmiştir. Tarihte önemli uygarlıkların hükümdarları, adlarından söz ettirmek için ülkelerinin önemli konumlarına önemli yapılar yapmışlardır. Şekil 1.3'te gösterilen dünya tarihinde yapısal devrim bu alanda yaşanan gelişmeye bir ışık tutmaktadır. Bu yapıların bir kısmı günümüze ulaşmış olsa da bir kısmı doğal ya da insani etkiler ile yok olup gitmişlerdir. Tarihte çimento ve betonun mucitleri Romalılar ve Yunanlılar olarak kabul görülmektedir. Bir diğer önemli yapı malzemesi ise çeliktir. Çelik, demir elementi ile karbon elementinin yüksek sıcaklıkta karışımı ile meydana gelen bir alaşımdır. Çelik, alaşımda kullanılan karbon miktarının oranına göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Demir ve çelik kullanımı binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Eski uygarlıklar, özellikle Mısırlılar ve Romalılar, demiri yapı malzemesi olarak kullanmışlardır. Ancak bu dönemlerde yapısal çelik olarak bilinen özel alaşımların kullanıldığına dair çok az kanıt bulunmaktadır. Yapısal manada çeliğin kullanımı 18. yüzyılda Sanayi Devriminin bir neticesi olarak hayatımıza girmiştir. Yapılarımızda çelik malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasının ardından kendisine, tıpkı beton gibi yapı sektöründe önemli bir yer edinmiştir. Yapısal çelik bir yapının kendi başına direkt olarak taşıyıcı sistemini oluşturabileceği gibi, beton malzemesi ile birlikte kullanılarak da bir yapının taşıyıcı sistemini oluşturabilir. Çeliğin çubuk yapıda, betonun içerisinde adeta bir örgü gibi bir arada kullanılmasına betonarme denir.



Şekil 1.3. Yapı dünyasının geçmişten günümüze değişimi

Betonarme günümüzün en yaygın yapı malzemesidir. Betonarmeyi oluşturan beton ile çeliğin bir arada kullanılmasının en temel nedeni termal genleşme katsayılarının birbirlerine çok yakın olmasıdır. Bu değer yaklaşık olarak $(10-12) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Eğer beton ile çelik farklı termal genleşme katsayılarına sahip olsaydı bu iki malzemenin bir arada kullanılması çok zor olacaktı. Örneğin betonarme bir kesitin sıcaklığı önce artıp sonra azalsaydı çelik veya beton farklı genleşeceğinden betonda çatlama, donatı ile beton arasında aderans kaybı gibi durumlar oluşacaktı. Bu durum betonarmenin hem dayanımı hem de dayanıklılığını etkileyeceğinden önemli sorunlara yol açabilirdi. Bu sebepten ötürü betonarmeyi oluşturan malzemelerin termal genleşme katsayılarının birbirine çok yakın olması kritik bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dünyadaki mevcut yapı stoğunun çok önemli bir kısmı betonarme yapılardan oluşmaktadır. Özellikle son yüzyılın önemli trendi köylerden kentlere geçişlerde, betonarme yapılardan oluşan dikey mimarinin yaygınlaşması ve bu sayede tabanda daha az yer kaplayan ve dar bir çevrede yüzbinlerce insanın yaşamasına olanak sağlayan yapılaşma tipi önemli bir etken olmuştur. Bunun yanı sıra, ilk uygarlıklardan bizlere miras kalan yapılar üzerinden güç gösterisi yapma geleneği betonarme çağında da devam etmektedir. Günümüzde göğe yükselen rekor üzerine rekor kırılarak inşa edilen gökdelenler bunun en net göstergesi konumundadır. Bu yapıların inşasının tek sebebi güç gösterisi olmamakla beraber ülkelerin turizmine katkı sağlaması da planlanmıştır. Bu yapıların en çarpıcı örneği yılda ortalama 6 milyon kişinin ziyaret ettiği Eyfel kulesidir. Eyfel Kulesine ait görüntü Şekil 1.4'te sol tarafta görülmektedir. Eyfel Kulesi, Fransız Devrimi'nin 100. yılını kutlamak amacıyla Paris Fuarı'nın giriş kapısı olarak yapılmıştır. Asıl amaç, diğer uluslara Fransa'nın gücünü ve endüstriyel yeteneklerini göstermekti, ancak yapının ciddi bir turist potansiyeline ulaştığı görülmüştür. Bu örnekleri Burç Halife yapısı ile çoğaltabiliriz. Burç Halife'ye ait görüntü Şekil 1.4'te sağ tarafta görülmektedir. Burç Halife, 828 metre yüksekliği ile günümüzün en yüksek yapısıdır. Burç Halife'nin yapılmasının temelde iki sebebi vardır; Bunlardan birisi dünyanın en uzun binasını yaparak dünyaya güç gösterisi yapmak, diğeri ise Dubai'nin en temel gelir kaynağı petrolün sınırlı olması ve bu kaynaklar bir gün bittikten sonra ülkelerinin turizm geliri ile mevcut varlığını devam ettirmek istemesidir.



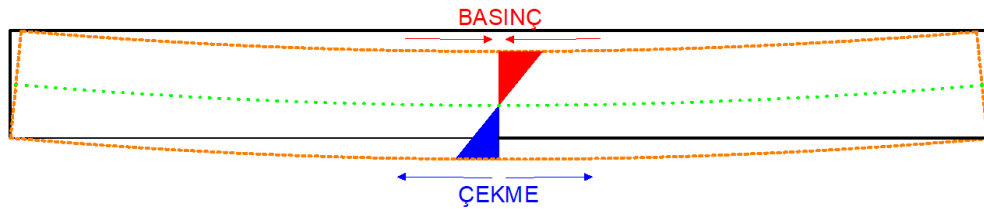
Şekil 1.4. Eyfel Kulesi ve Burç Halife gökdeleni

Eyfel Kulesinin yapıldığı 19. yüzyılın son çeyreği, yüksek katlı betonarme yapıların yaygın olmadığı bir dönemdi. Eyfel'den Burç Halife'ye kadar olan süreçte teknolojinin de gelişmesiyle birlikte yüksek katlı yapılarda betonarme kullanımının yaygınlaştığı görülmüştür. Bununla birlikte yüksek katlı yapılarda, kolon ve kiriş kesit ölçülerinin, yapı yüksekliği ile aynı oranda artırılmayacağı mimari sebeplerden dolayı mümkün gözükmemektedir. Bu süreçte yapısal tasarım mühendisleri kesit ölçülerini, yapı yüksekliği ile aynı oranda büyütmemek adına bazı çalışmalar yürütmüşlerdir.

Bu çalışmalara malzeme dayanımının artırılmasının yanı sıra taşıyıcı sistem ve kolon kiriş kesitlerinde ortaya çıkan farklılıklar, örnek olarak göstermek mümkündür. Betonarme taşıyıcı sistemler her ne kadar daha fazla çeşitlendirmek mümkün olsa da temelde kolon, kiriş ve döşeme olmak üzere 3 ana elemandan oluşmaktadır. Yük aktarım mekanizması döşemeden kirişe, kirişten kolona, kolondan ise sert zemine şeklindedir. Bu tezin kapsamında incelenecek olan kirişler, eğilme elemanı olarak nitelendirilmektedir. Kirişlerin esas görevi döşemeden gelen yükleri kolona aktarmak olsa da kolonları birbirine bağlayarak yapı stabilitesini sağlamak da kirişlerin yapılarımızdaki önemli görevlerinden birisidir. Betonarme kirişlerin çok büyük bir bölümü dikdörtgen bir kesite sahip olsa da çeşitli geometrilere sahip kirişler üretmek mümkündür.

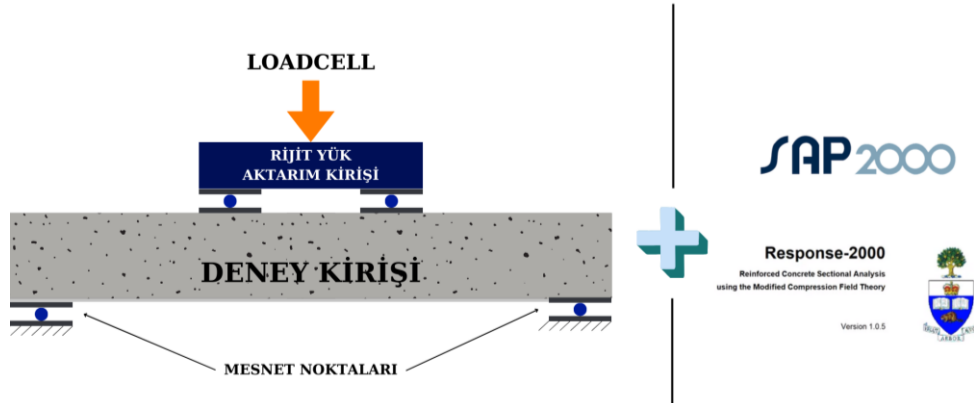
1. GİRİŞ

Ancak inşaat mühendislerince genel geçer betonarme kiriş kesiti dikdörtgendir. Dikdörtgen kesit içerisinde boyuna 3 tip boyuna donatı kullanılmaktadır. Bunlar basınç-montaj donatısı, gövde donatısı ve kirişler için en kritik boyuna donatı tipi olan çekme donatısıdır. Yukarıda belirtildiği gibi kiriş elemanları eğilme elemanı olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla kirişlerin genel deformasyon şekillerinde alt donatı çekme donatısıdır. Bu çalışmada çekme donatısının kesit içerisindeki yerleşiminin kesitin moment taşıma kapasitesine etkisi deneysel bir bakış açısıyla açıklanmaktadır. Şekil 1.5'te eğilme etkisi altında, pozitif momentli betonarme kirişin çekme ve basınç bölgeleri görülmektedir.



Şekil 1.5. Eğilme etkisi altında, pozitif momentli betonarme kiriş

Deneysel veriler, Şekil 1.6'da ifade edildiği üzere SAP2000 ve Response-2000 isimli 2 farklı bilgisayar yazılımı ile paralel şekilde desteklenmiştir.

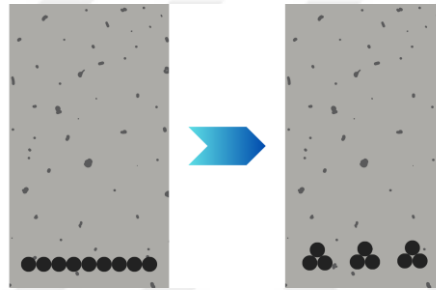


Şekil 1.6. Çalışma kapsamı

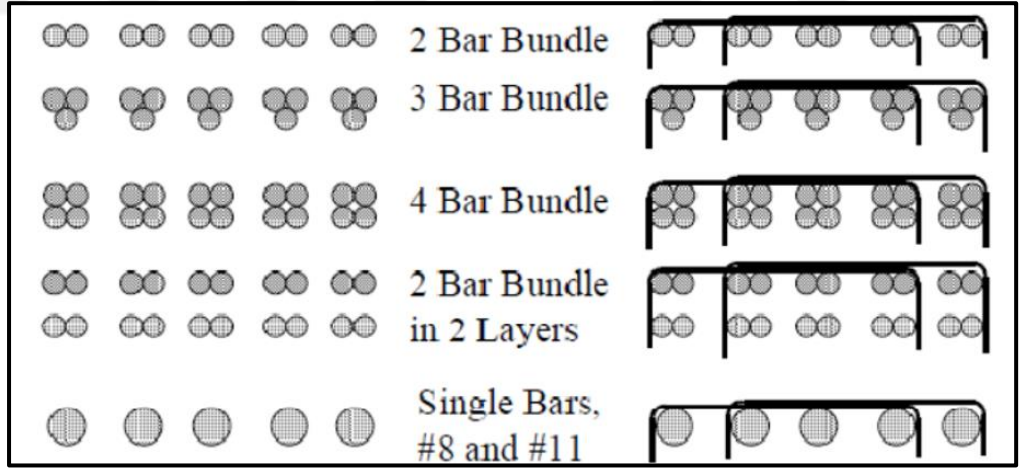
Eğilme etkisi altındaki betonarme kirişlerin çekme kuvvetine çalışan bölgesinde yer alan çekme donatıları bazı durumlarda kesite yan yana sığmamaktadır. Böyle durumlarda kimi zaman beton kesiti büyütülebilmektedir. Ancak kimi zaman kesit genişliğini artırmak mimarı nedenlerden dolayı mümkün olmayabilir.

1. GİRİŞ

Bu tür durumlarda dünyada son dönemlerde yaygın kullanılmaya başlanılan demet donatılar kullanılmaktadır. Demet donatılar, bu tezin temel kapsamıdır. Demet donatı kavramı şunu ifade etmektedir: birden fazla boyuna donatının bağ teli ya da metal kaynak vasıtası ile bir arada, tek bir donatı gibi kesite yerleştirilmesidir. Şekil 1.7’de demet donatı be tekil donatı kesitlerine ait görüntü yer almaktadır. Burada demet donatıya neden ihtiyaç duyulduğu konusu akla gelmektedir. Bu sorunun cevabı; Aşağıdaki görselde de görüldüğü üzere boyuna donatılar kesite, yan yana dizilseydi beton dökümü esnasında agregalar donatıların arasına giremeyecekti ve betonun yerleşimi tam manasıyla gerçekleşmeyecekti. Bu gibi sebeplerden ötürü demet donatının kullanımı bazı durumlarda elzem hale gelmektedir.



Şekil 1.7. Demetlenmemiş ve demetlenmiş donatı düzeni



Şekil 1.8. Amerikan yönetmeliğinde önerilen demet donatı şekilleri

Bu tez çalışmasının temel planlamaları yapılırken birçok gereksinim göz önüne alınmıştır. Bu gereksinimler aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Demetlenmiş donatıların kullanıldığı kirişlerin, eğilme etkisinin altındaki davranışlarının incelendiği ya da demet donatılara dair benzer çalışmaların literatürde yeterinde kendine yer bulamamış olması.
- Demet donatıların kullanımı ile zaman zaman daha ekonomik yapısal tasarımların mümkün olabileceği.
- Projelendirilme esnasında kullanılan malzemenin sahada temin edilememesi durumunda daha küçük çaplı demetlenmiş donatı kullanımının projelendirme üzerindeki etkisinin kolayca öngörülebilir olmasını sağlamak.
- Çalışmanın başlatıldığı dönemde çalışmayı kolaylaştıracak TÜBİTAK destekli paralel çalışmaların üniversite kapsamında yürütülüyor olması.

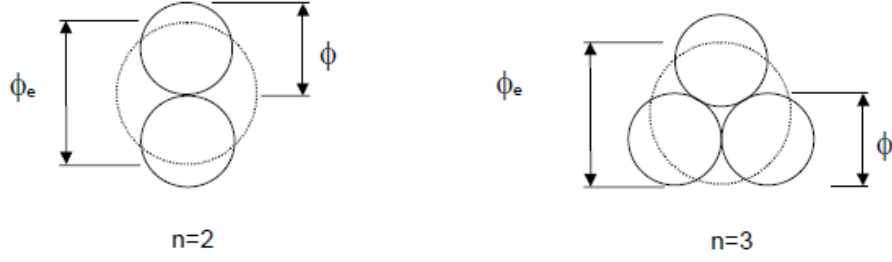
Çalışmanın temel amacı; donatı düzeninin eğilme elemanları üzerindeki etkisinin hem deneysel hem de numerik olarak irdelenmesidir. Bu kapsamda demet donatılar özelinde, demet donatı kullanımının aynı donatı alanına sahip daha büyük çapa sahip tekil donatı kullanımı ile arasındaki farklılıkların gözlemlenmesi, eğer varsa farklılıkların ya da benzerliklerin ne gibi sonuçlar doğuracağı hususunun irdelenmesidir. Bu kapsamda aşağıda detaylandırılan 3 farklı kiriş grubu kendi içerisinde kıyaslanacaktır.

Tez kapsamında yapılan deneyler 2-3-3 olmak üzere 3 farklı gruptan oluşmaktadır. Kiriş numuneleri gruplarına, çalışmanın araştırma ve bulgular bölümünde detaylandırılmak üzere K1, K2 ve K3 isimleri verilmiştir. Bu deney kirişlerinin tasarımı yapılırken, donatı çapının farklı olmasına karşın donatı oranının birbirine çok yakın olması dikkate alınmıştır. Burada temel amaç donatı oranını sabit tutup, moment kapasitesi, şekil değiştirme kapasitesi, enerji sönmleme kapasitesi, göçme biçimi, çatlak desenleri vb. durumlarda meydana gelen farklılıklar veya benzerliklerin gözlemlenebilmesidir.

“9.5.3 - Demet Donatı, yalnız nervürlü çubukların Şekil 1.9 da gösterildiği gibi demet olarak kullanılmasına izin verilir. Demetteki donatı çubuğu sayısı en çok 3 olabilir.

Demet donatının eşdeğer çapı Φ_e , aşağıda verilmiştir. Denklemdaki Φ demet yapılan çubukların çapı, “n” ise demetteki donatı sayısıdır” (TS500 2000).

$$\Phi_e = 1,2\Phi\sqrt{n}$$



Şekil 1.9. Eşdeğer çap gösterimi (TS500 2000)

Demet donatılar Hindistan betonarme standardı IS CODE 456:2000’de özellikle kolonlarda donatı çapının 32 mm’yi geçtiği durumlarda şart koşulmuştur. Bunun yanı sıra Amerikan betonarme standartlarından ACI-318-11’e göre herhangi bir durumda şart koşulmamak ile birlikte bazı durumlarda demet donatı kullanımı önerilmiştir. Amerikan standartlarına göre bir donatı demeti maksimum 4 donatının bir araya gelmesi ile oluşabilir. Bu kapsamda ilgili standartta, kesit hesabında kullanılmak üzere bir eşdeğer donatı çapı çizelgesi verilmiştir. Filipin standardı NSCP’ye göre yine Amerikan standardına benzer şekilde maksimum 4 donatının birleşmesi ile meydana gelebilir. Bu standartta demet donatıların bindirme boyları ile ilgili bazı ekstra koşullar verilmiştir. Son olarak Avustralya standardı AS3600 standardında donatı çapının 32 mm’yi aştığı bazı durumlarda ve donatının kesite belirli koşullarda sığmaması halinde demet donatı kullanımı önerilmiştir.

Demet donatıların, kullanımının bazı faydaları aşağıda sıralanmıştır.

Yer Tasarrufu: Kesit içerisinde yer sınırlaması olan durumlarda, birden fazla donatı çubuğunu bir araya getirerek daha fazla alan kazanılabilir. Ve bu sayede kesit büyütmeden kapasite artırımı yoluna gidilebilir.

Yapısal Kapasite Artışı: Yer sınırı olmaksızın büyük yapısal yükleri taşıyan elemanlarda, tekil donatı çubukları yerine demet donatılar kullanılarak yapısal kapasite artırılabilir.

Ekonomik Verimlilik: Bazı durumlarda, birden fazla küçük çaplı çubuğun bir arada kullanılması, daha büyük çaplı tek bir çubuk kullanmaktan daha ekonomik olabilir. Donatı çapı arttıkça, donatıların mikro kusurları arttığı için aynı oranda olsa dahi küçük çaplı donatıların kullanımı kapasitenin daha fazla olmasını sağlamaktadır. Örneğin küçük çaplı tellerden oluşan bir çelik halat ile aynı çaptaki dolu çelik kesitin kapasiteleri birbirinden farklıdır. Bunun temel sebebi daha önce de belirtildiği gibi kesit çapı arttıkça mikro kusurların paralel şekilde artış göstermesidir. Ayrıca belirli çapların üzerindeki donatıları satın almanın zorluğu bilinmektedir. Bu tür donatıların özel siparişi, taşıma bedeli, temin bedeli vb. maddi zorluklara yol açtığından, büyük çaplı donatıları kullanmak yerine, temin edilmesi kolay küçük çaplı donatıların demet şeklinde kullanılması daha ekonomik olabilmektedir.

Öte yandan, bu uygulamanın bazı zorlukları ve sınırlamaları vardır. Örneğin, beton dökümü sırasında hava boşluklarının oluşmasını önlemek ve betonun düzgün bir şekilde yerleşmesini sağlamak için ek dikkat gerektirir. Ayrıca, ACI ve diğer betonarme yönetmelikleri, demet donatı kullanımı için belirli kurallar ve sınırlamalar getirir. Bu kurallar, donatı sayısını, aralarındaki minimum mesafeyi ve beton kaplama kalınlığını içerebilir.

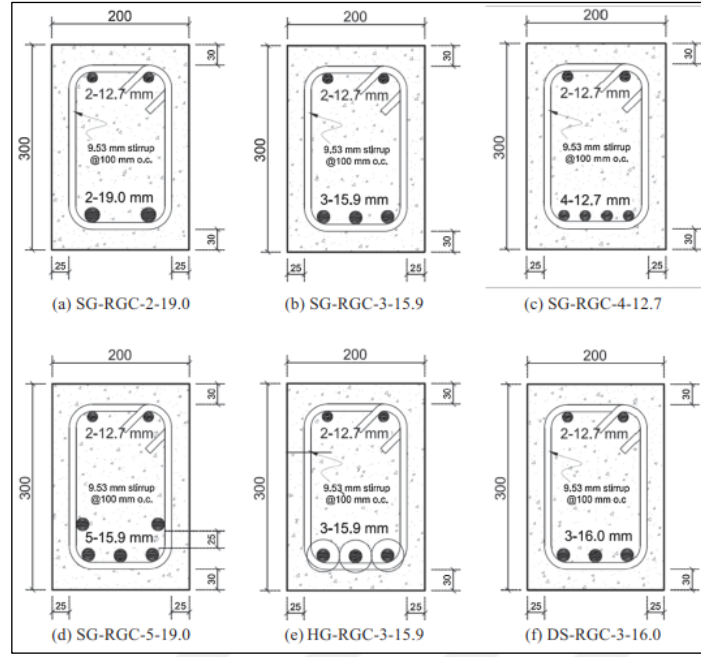
Her projede, demet donatı kullanımının gerekliliği ve uygunluğu, betonarme tasarım mühendisleri tarafından projenin özel ihtiyaçlarına ve tasarım gereksinimlerine göre değerlendirilmelidir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Özhan (2012) çalışmasında, betonarme kirişlerin eğilme davranışında beton sınıflarının etkisi üzerine bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, C20/25, C30/37 ve C40/50 beton sınıfları kullanılarak bir dizi test yapılmıştır. S420a sınıfında çelik donatılar kullanılarak üretilen, 20x35x300 cm boyutlarına sahip 15 adet betonarme kiriş numunesi test edilmiştir. Yapılan çalışmada, kesit sünekliğinin beton sınıfının yükselmesiyle azaldığı gözlemlenmiştir. Betonarme kiriş numunelerinde sünek kırılma durumunda çekme donatı miktarı oranının, eğilme taşıma gücüne olumlu etki ettiği belirtilmiştir. Özellikle, çekme donatı miktarının artmasıyla birlikte sünek kırılma için eğilme taşıma gücünde artış gözlemlenmiştir.

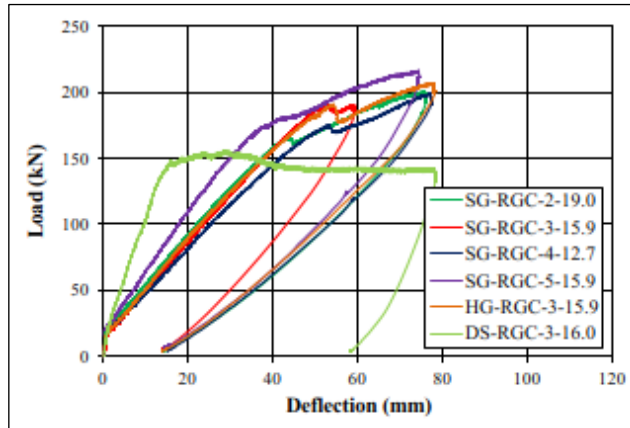
Ayrıca, sargı donatısının etkisi üzerine yapılan değerlendirmelerde, maksimum moment noktasında yapılan sıklaştırmaların etkisiz olduğu ancak kiriş mesnet bölgelerinde yapılan sıklaştırmaların kesme kuvveti ve eğilme kapasitesine olumlu bir katkı sağladığı belirlenmiştir. Maksimum moment noktasında yapılan sıklaştırma işleminin etkisizliği, betonarme kirişlerin süneklik özellikleri üzerinde belirgin bir etki göstermediği anlamına gelmektedir. Ancak, kirişin mesnet bölgelerinde yapılan sıklaştırmaların, kesme kuvveti ve eğilme kapasitesine pozitif bir katkı sağlaması önemli bir bulgu olarak vurgulanmıştır.

Maranan et al. (2015) çalışmasında, Şekil 2.1’de numune kesitleri gösterilen, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla güçlendirilmiş jeopolimer beton, yüksek dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve etkin dayanım özellikleri sunan potansiyel bir yapı malzemesi buna yönelik eğilme deneyleri üzerinde durmuştur. Ancak, bu malzemelerin bir arada kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır, bu nedenle mevcut araştırma bu boşluğu doldurmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada, GFRP çubuklarla güçlendirilmiş jeopolimer beton kirişlerin eğilme dayanımı ve servis edilebilirlik performansı, dört noktalı statik eğilme testi altında değerlendirilmiştir. İncelenen parametreler arasında nominal çubuk çapı, donatı oranı ve ankraj sistemleri bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Numune donatı düzeni (Maranan et al. 2015)

Deneysel sonuçlar, çubuk çapının kirişlerin eğilme performansı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Genel olarak, donatı oranının artması, bir kirişin kullanılabilirlik performansını iyileştirmiştir. Kum kaplaması tarafından sağlanan mekanik kilitleme ve sürtünme kuvvetleri, GFRP çubukları ile jeopolimer beton arasında etkili bir bağ sağlamak için yeterli olmuştur. Ayrıca, ACI 4401.R-06 ve CSA S806-12 tahmin denklemlerinin, elde edilen sonuçları hafife aldığı gözlemlenmiştir. Test edilen kirişlerin eğilme momenti kapasitesi, önceki çalışmalarda rapor edilen FRP takviyeli beton kirişlerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Şekil 2.2’de kesitlere ait yük deplasman eğişine yer verilmiştir.



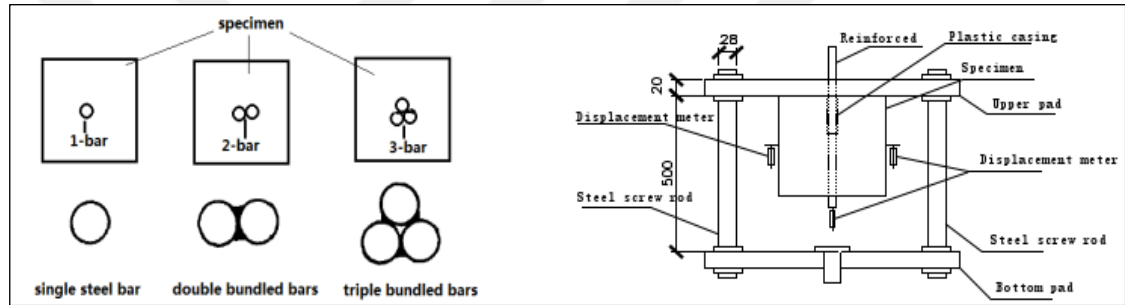
Şekil 2.2. Yük-deplasman eğrisi (Maranan et al. 2015)

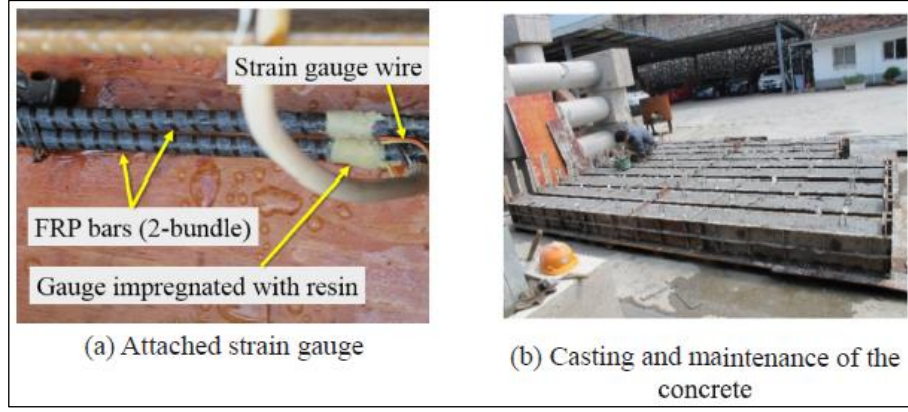
Bu sonuçlar, GFRP çubuklar ve jeopolimer beton birleşiminin, eğilme dayanımı ve servis edilebilirlik performansı açısından etkileyici bir yapısal çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, ileriki araştırmalara temel teşkil edecek ve bu alandaki bilgi boşluğunu kapatmaya katkıda bulunacaktır.

Yılmaz (2016) çalışmasında, farklı donatı düzenlerine sahip betonarme yüksek kirişlerin davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemeyi hedeflemektedir. Çalışma, dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, yüksek kirişlerin genel özellikleri, uygulama alanları, tasarım ilkeleri ve bu çalışmanın amaç ve kapsamını içeren temel bilgileri sunmaktadır. İkinci bölüm, çalışmanın amaçları doğrultusunda dört farklı donatı düzenine sahip yüksek kirişlerin üretim sürecini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Donatı türleri, miktarları ve düzenlemeleri, belirli bir strateji doğrultusunda seçilmiştir. Üçüncü bölüm, gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır ve bu sonuçlar, günümüzde geçerli olan yönetmeliklerde belirtilen çubuk model yöntemi kullanılarak hesaplanan kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmaktadır. Son olarak, dördüncü bölümde yapılan çalışmalardan çıkarılan genel sonuçlar ve öneriler detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, diyagonal olarak yerleştirilen basınç donatılarının, yüksek kirişlerin taşıma kapasitesini ve enerji emme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu nedenle, bu donatı düzenlemesi diğerlerine göre daha sünek bir davranışa neden olmuştur. Bu bulgular, yüksek kirişlerin tasarımı ve performansını iyileştirmek isteyen tasarımcılara önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

Qing-wen et al. (2018) çalışmasında, 9 adet HRB500 bağlama-ankraj numunesinin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. HRB500 demetli çubukların bağlama-ankraj davranışı üzerinde, demetli çubuk sayısının ve ankraj uzunluğunun etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneyler sırasında, demetli çubuğun yük kayma eğrisi elde edilmiş ve çelik çubuk ile beton arasındaki bağlama-ankraj mekanizması detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, HRB500 demetli çubukların iki temel başarısızlık deseni gösterdiğini ortaya koymaktadır: çekme başarısızlığı ve yarılmış başarısızlık.





Şekil 2.4. Deney numunelerinin hazırlanması (Sun et al. 2019)

Üç çubuk demetli beton kirişin hem başlangıç rijitliği hem de akma sonrası rijitliği, çift çubuk demetli kirişinkinin yaklaşık %50'si kadar olmuştur. Tüm beton kirişlerin yer değiştirme süneklikleri, tek çubuk takviyeli kirişin sünekliğinden daha fazla olmuştur. Ayrıca, bağ davranışındaki farklılıklar nedeniyle, üç çubuk demetli ve altı çubuk demetli kirişlerin nihai yer değiştirmeleri, tek çubuk takviyeli kirişin nihai yer değiştirmesinin sırasıyla yaklaşık 1,6 ve 1,9 katıdır. Bu bulgular, çeşitli donatı tiplerinin beton kirişlerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini anlamamıza ve güçlendirme stratejilerini geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Şekil 5'te deney numunelerinin deney sonundaki görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 2.5. L2-L3 numuneleri (Sun et al. 2019)

Guo et al. (2020) çalışmasında, kesme güçlendirmesi, özellikle küçük ve orta açıklıklı betonarme (RC) kirişlerde, mesnet bölgelerinde ve çeyrek açıklıklarda ortaya çıkan ciddi çatlaklar nedeniyle günümüzde önemli bir mesele haline gelmiştir. Bu çatlaklar, köprü yapılarında kesme hastalıklarının ciddi bir olgu olduğunu ortaya koymaktadır.

Çeşitli yöntemlerle betonarme kirişlerin kesme güçlendirmesi gerçekleştirilmektedir, ancak bu yöntemlerin bazıları düşük donatı verimliliği ve zayıf dayanıklılık gibi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Bu çalışmada, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmayı hedefleyen ve harici olarak bağlanmış fiber takviyeli polimer (FRP) kullanım verimliliğini iyileştirmeyi amaçlayan bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem, U-tipi ve yandan bağlı FRP'yi birleştiren kapalı bir FRP makası içermektedir. Hesaplama modeli, teorik çalışmalar, model testleri ve sayısal simülasyonlar kullanılarak FRP makası ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesini tahmin etmek üzere oluşturulmuştur.

FRP makası, RC kirişlerin kesme kapasitesini artırmanın yanı sıra FRP'nin kullanım verimliliğini açıkça iyileştirir. Sonlu elemanlar yöntemi, etriye oranının FRP kafes kirişin güçlendirme verimliliği üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bu analiz, etriye oranının azaldıkça donatı etkilerinin kademeli olarak arttığını göstererek, FRP kafes kirişinin çekme başarısızlığına yol açtığı ideal koşullarda etriye oranının %0,18'den az olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

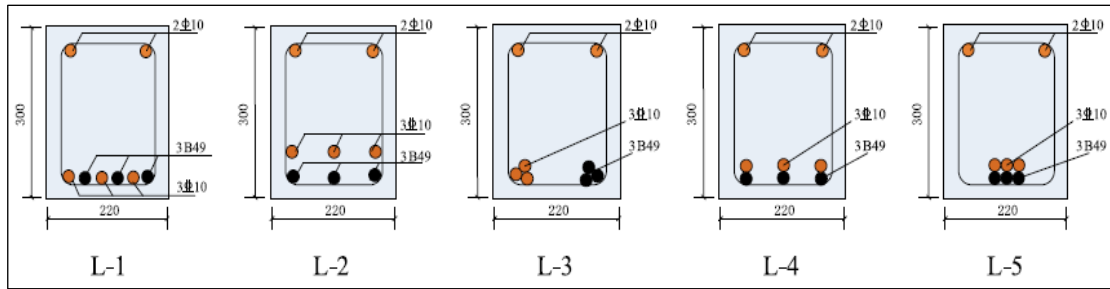
Zhou et al. (2021) çalışmasında, hibrit fiber takviyeli polimer (FRP)-çelik betonarme (RC) kirişler, değişen donatı oranlarına bağlı olarak çeşitli eğilme kırılma modları sergilemektedir. Ayrıca, kirişin çekme ve basınç bölgelerinin eğilme davranışına olan katkıları, donatı oranlarının değişimine paralel olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle, genel eğilme kırılma modlarına özgü hibrit FRP-çelik RC kirişlerin küresel doğrusal olmayan davranışını öngörebilen bir model, analiz ve tasarım açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada, hibrit bir FRP-çelik betonarme kirişin eğilme davranışı, FRP ve çelik betonarme kirişlerin mekanik davranışlarının sistemli bir birleşimi olarak ele alınmaktadır. Çelik için Gerginlik Akor Modeli (TCM) ve FRP için genişletilmiş uygulaması, çekme bölgesindeki gerilim sertleştirme etkisini temsil etmek amacıyla FRP/çelik donatı ile çevreleyen beton arasındaki bağ performansını uygun şekilde dikkate alır.

Ayrıca, basınçlı betonun yumuşama davranışını tahmin etmek için, basınç kırılma enerjisini içeren ve hapsedme etkisini dikkate alan Doğrusal Yumuşama Modeli (LSM) kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilen iki model, birincil denge ve uyumluluk ilkelerine dayanarak bir araya getirilmiştir, böylece gelişmiş moment-eğrilik ilişkisi ve eğilme davranışı sayısal olarak değerlendirilebilir. Mekanik modellerin uygun kombinasyonu ve uygulanması sayesinde, küresel değerlendirme süreci önemli ölçüde basitleştirilmiş ve geleneksel sayısal yöntemlerde gerçekleştirilen uzun yinelemeli hesaplamalardan kaçınılmıştır. Son olarak, önerilen hesaplama modeli, literatürde mevcut olan hibrit FRP-çelik betonarme kirişlerin yaygın eğilme kırılma modlarına dair tahminlerini ve deneysel sonuçlarını karşılaştırarak doğrulanmıştır.

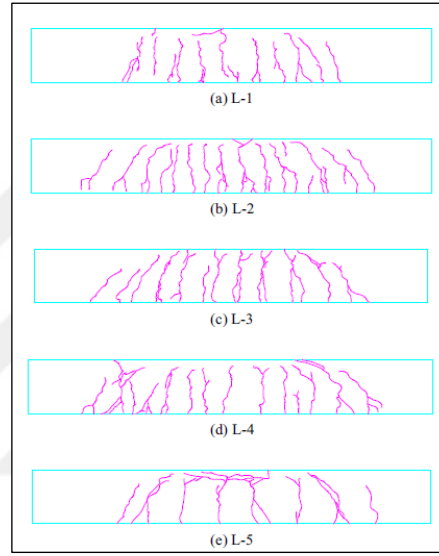
Sun et al. (2021) çalışmasında, demetlenmiş hibrit donatıların kontrol edilebilir bağ performansı ve yüksek verimli yapısı, prekast beton yapıların sismik performansını artırarak ve inşaat süreçlerini hızlandırarak belirgin bir avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar, deforme çelik çubuklar ve bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) çubukların (tek, çift, üç demet) monotonik yük altında test edilen on sekiz çekme numunesi üzerinde temellendirilmiştir. Dometlenmiş donatıların kullanımıyla birlikte, takviye demetleri sayısının artmasıyla tepe bağ kuvveti %40,7 oranında azalmıştır.

Şekil 2.6’da kesitleri gösterilen ve çeşitli demetli donatılarla takviye edilmiş beş beton kirişi üzerinde yapılan deneysel araştırmalar, sıradan yayılı donatıya sahip bir kirişle (kontrol kirişi) karşılaştırıldığında, üç demetli ve altı demetli kirişlerin nihai yer değiştirmesinin sırasıyla %60 ve %90 oranında arttığını göstermiştir. Ayrıca, altı demetli kirişin yük taşıma kapasitesi, kontrol kirişinkinden %9,6 oranında daha büyüktü.



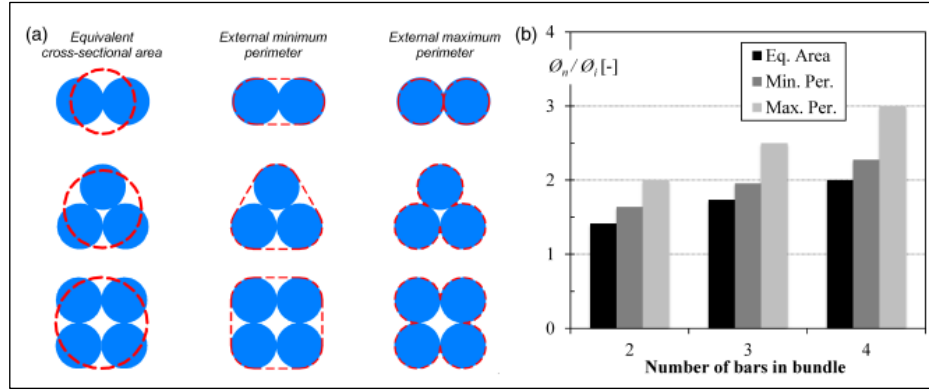
Şekil 2.6. Kiriş donatı düzeni (Sun et al. 2021)

Bu deneysel bulgulara dayanarak, eşdeğer bağ alanı kavramına dayalı basitleştirilmiş bir modeli önerilmiş ve bu modelin test sonuçlarıyla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, donatı ile beton arasındaki bağ-kayma etkileşimini dikkate alan sonlu elemanlar analizi yapılarak, yeni kompozit kirişin yük-sehim ilişkileri tahmin edilmiştir. Analitik modelin, demet halindeki hibrit takviyeli kirişlerin hasar modlarını, yük-sehim ilişkilerini ve gerinim gelişimlerini doğru bir şekilde tahmin edebildiği, analitik ve Şekil 2.7’de çatlak deseni gösterilen deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla ortaya konmuştur.



Şekil 2.7. Kiriş çatlak deseni (Sun et al. 2021)

Metelli et al. (2021) çalışması, betonarme elemanlarda bireysel çubuklar yerine paketlenmiş çubukların kullanılması, donatı yoğunluğunu azaltma veya ortadan kaldırma potansiyeli taşır. Bu durum, taze betonun daha kolay yerleştirilmesine ve sıkıştırılmasına izin verir, çünkü paketler (yan yana iki veya daha fazla çubukla) taze beton akışına daha az direnç gösterirler. Ancak, çubukların demetler halindeki bağ davranışları hakkında temel fenomenlerle ilgili olarak hala yetersiz bilgi mevcuttur. Yazarlar Şekil 2.8’de demet donatılar için eşdeğer çap modeli sunmuştur. Bu bağlamda, çekme testleri için ankraj ve birleştirme tasarım kuralları, Uluslararası Standartlar arasında (Eurocode 2, fib Model Code 2010 ve ACI 318–19) önemli farklılıklar sergiler.

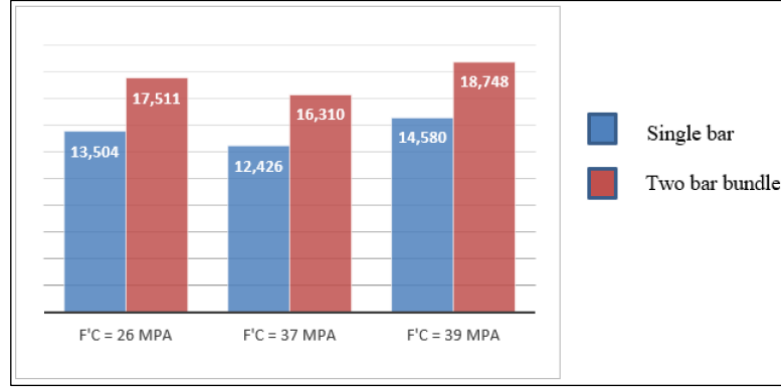


Şekil 2.8. Eşdeğer donatı alanı (Metelli et al. 2021)

Bu çalışmada, kısa gömülü uzunluklu 100'den fazla çekme testinin sonuçlarını rapor ederek, demetlerin yerel bağ davranışını ilgili teorik bireysel çubuklarla karşılaştırma amacını taşımaktadır. Demetli ve bireysel çubukları karşılaştırmak için tanımlanmış üç kriter arasından, "eşdeğer kesit alanı" ve "minimum veya maksimum kesit çevresi" kavramlarına dayanan ilk ikisi bu makalede ele alınmıştır. Deneysel sonuçlar, her iki kriterin de demetli çubuk ankrajının taşıma kapasitesini değerlendirmek için uygun yöntemler olduğunu göstermektedir, ancak eşdeğer alan kriterinin biraz daha korumacı olduğu görülmektedir.

Ayrıca, deneysel sonuçlar, çubuk çapı ile artan kaburga kuvvetleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Son olarak, deneysel sonuçlar, fib Model Code 2010 tarafından belirlenen demetli çubukların ankraj dayanımı için tasarım kuralları ile karşılaştırılmaktadır.

Walujodjati et al. (2021) çalışmalarında, beton dayanımı, güçlendirilmiş betonun önemli bir parametresidir ve bu dayanım, donatı demetlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ile ilişkilidir. Beton basınç dayanımı testi, sırasıyla 26 MPa, 37 MPa ve 39 MPa değerlerini ortaya koymuştur, bu değerler, güçlendirilmiş betonun basınç altında sergilediği dayanım seviyelerini belirlemektedir. Donatı çeliği çekme testi, 462 MPa akma gerilmesi ve 628 MPa nihai gerilme değerleri sunarak, donatı elemanının çekme dayanım karakteristiklerini belirlemiştir. Aynı zamanda, beton silindirik numunesinin çekme testi, 150 mm x 200 mm çapında çeşitli bağlanma stresi değerlerini üreterek, donatı demetleri ile beton arasındaki bağın mekanik davranışını değerlendirmiştir.

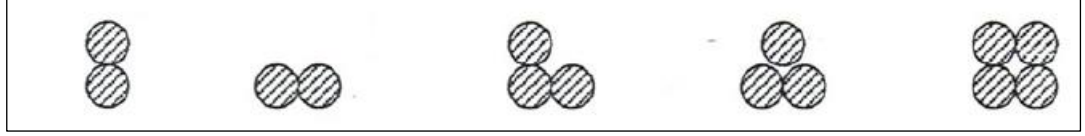


Şekil 2.9. Tek ve çift donatılı kesit deney sonuçları (Walujodjati et al. 2021)

Yapılan kapsamlı analizler neticesinde, donatı demetindeki beton basma dayanımındaki değişikliklerin, bağlanma stresi değerini önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak, sadece bağlanma stresinde gözle görülür bir artışın, betonun dayanımı ve demet içindeki çubuk sayısı ile doğru orantılı bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, donatı demetlerinin bağlanma performansının değerlendirilmesi ve güçlendirilmiş betonun dayanımının etkin bir şekilde optimize edilmesi açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

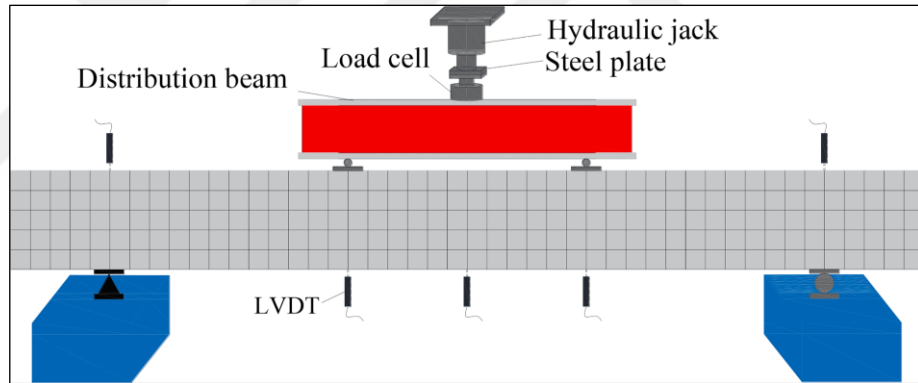
Walujodjati et al. (2021) çalışmalarında, Yapısal elemanlar arasında sıklıkla rastlanan donatılı beton kirişler, yük taşıma görevinde önemli bir rol oynayan oldukça büyük elemanlardır. Donatılı beton kirişlerin çekme kuvvetini taşıma fonksiyonu açısından, farklı sayıda ve alanlarda donatı ile üretilmiş beton kirişlerin mümkün olup olmadığını değerlendirmek mümkündür. Donatı koşullarının karşılanmadığı durumlarda, kesit boyutu sınırlamaları olduğunda donatı demetleri kullanılır. Yazarlar Şekil 2.10'da bu demet donatıların tipleri ile ilgili bir görsel sunmuşlardır.

Bu çalışmada, 150 mm x 200 mm x 1.050 mm boyutlarındaki kirişler üzerine 10 mm çapında iki adet donatı demeti monte edilmiştir. Dört noktalı eğilme testi ile nominal eğilme momenti elde edilmiştir. Donatı demetinin eşdeğer çap kullanılarak elde edilen kesit alanı ile tek kesitli kare kesit analizi, eğilme testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneme ve analiz arasında elde edilen eğilme kapasitesi değerleri uygun sonuçları göstermiştir. İkili donatı demetinin eğilme kapasitesi değeri oldukça yüksek çıkmıştır.



Şekil 2.10. Donatı demetlenme tipleri (Walujodjati et al. 2021)

Cao et al. (2022) çalışmasında, UHPC kirişlerin boyutunun eğilme davranışı üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde değerlendirmeyi amaçlayarak önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, HRB400 çelik takviyeli UHPC kirişlerde eğilme mukavemeti, normalize edilmiş deformasyon ve kırılma dayanıklılığının boyut etkisinden etkilenmediğini gösterirken, GFRP takviyeli UHPC kirişlerde ise normalleştirilmiş deformasyon açısından nihai taşıma kapasitesinde belirgin bir boyut etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu etkinin tüm deformasyon süreci boyunca devam etmediği dikkat çekici bir bulgudur. Yazarlar çalışmalarında Şekil 11’de görüldüğü üzere 4 noktalı eğilme deney düzeneği kullanmışlardır.

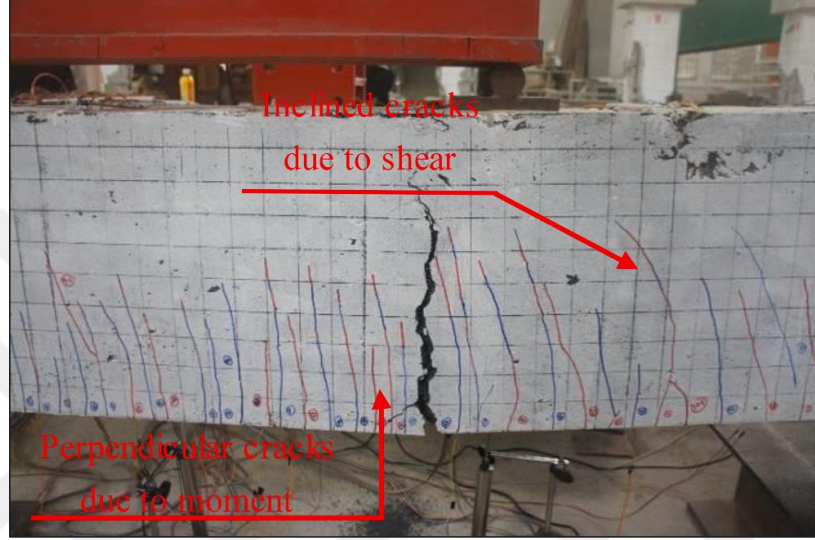


Şekil 2.11. Eğilme deney düzeneği (Cao et al. 2022)

GFRP takviyeli UHPC kirişlerin eğilme mukavemeti ve kırılma dayanıklılığı üzerindeki boyut etkisinin donatı oranıyla birlikte değişiklik gösterdiği görülmüştür. Donatı oranının artmasıyla birlikte, boyut etkisinin belirgin hale geldiği gözlenirken, bu durumun tasarım ve uygulama süreçlerinde dikkate alınması önem arz etmektedir.

Bununla birlikte, her iki UHPC kirişinin maksimum çatlak genişliği, çatlak sayısı ve ortalama çatlak aralığının numune boyutuna duyarlı olması, yapısal performansın belirli yönlerinin boyutla ilişkili olduğunu göstermektedir.

Ancak, süneklik açısından belirgin bir boyut etkisi görülmemesi, materyalin belirli mekanik özelliklerinin boyuta bağlı olarak değişmediği ve bu bağlamda tasarım parametrelerinin seçiminde dikkatli olunması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, UHPC kiriş tasarımında optimize edilmiş boyutlandırma stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir temel oluşturmaktadır. Yapılan deneylerde Şekil 2.12’de gösterilen eğilme ve kesme çatlakları meydana gelmiştir.



Şekil 2.12. Çatlak desenleri (Cao et al. 2022)

TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı kanalı tarafından **219M403** proje kodu ile desteklenen tez çalışması kapsamında laboratuvar koşullarında mekanik özellikleri belirlenen malzemeler üzerinden tasarımı yapılarak şantiye ortamında imalatı yapılan betonarme taşıyıcı sistemlerin birbiriyle ne denli uyumlu olduğu üzerine yapılan bir araştırma çalışmasıdır. Bu amaç doğrultusunda sabit sıcaklık altında laboratuvar koşullarında ve değişken sıcaklığa maruz atmosfer koşullarında farklı kür şartı olarak ortam şartlarının sıcaklık parametresi üzerinden 1:1 ölçekli betonarme kiriş numuneleri imalatı yapılarak 4 noktalı eğilme deneyi ile incelenmiştir. Bu konuda 4 noktalı eğilme deneyleri (deney yöntemleri, deney süresince dikkat edilen parametreler) ve kür şartları etkileri üzerine yapılan literatür araştırmalarına aşağıda yer verilmiştir.

Şahin (2023) çalışmasında, aynı beton karışımından imal edilmiş toplam altı adet 4,5 m açıklığındaki tam ölçekli betonarme kiriş, sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında ve açık alanda yaz koşullarında eğilme etkisi altındaki davranışları deneysel olarak karşılaştırmak üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmanın temel hedefi, beton dökümü sonrasında sabit sıcaklık altında bekletilen betonarme kirişlerin atmosferik hava koşullarında bekletilen kirişlerle kıyaslanarak eğilme davranışlarını değerlendirmektir.

Deney sonuçlarına göre, laboratuvarda bekletilen betonarme kirişlerin çatlama momentlerinin atmosferik koşullarda bekletilen benzer numunelere kıyasla %10-40 arasında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, akma momentleri açısından anlamlı bir farklılık gözlemlenmemiştir. Başlangıç rijitliği, enerji sönümleme kapasitesi, kesit ve eleman süneklik değerleri ile çatlak dağılımları göz önüne alındığında, laboratuvar ortamında bekletilen betonarme kiriş numunelerinin atmosferik koşullarda bekletilen numunelere göre daha üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, betonarme yapı elemanlarının atmosferik maruziyetin etkilerine karşı geliştirilen dayanıklılığını anlamak ve optimize etmek için önemli bir katkı sunmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışması, **Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı'nın 219M403 proje kodu** ile yürütülen çalışma kapsamında yapılmıştır. Proje kapsamında, yaz aylarında imalatı yapılan tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda tam ölçekli betonarme kirişler, donatı düzenine göre gruplandırılarak dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Tez çalışması kapsamında toplamda 6 ana deney (tam ölçekli kiriş deneyi) yapılmış olup bunların 4'ü 219M403 proje kodlu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamındaki deneylerdir. Tez çalışması aşağıda belirtilen aşamalara göre yürütülmüş olup bahsedilen aşamaların detayları tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacaktır.

1. Deneylerle kıyaslanacak numunelerin, klasik yöntemler ve bilgisayar programları yardımı ile tasarımı ve ön analizi.
2. Deneylerde kullanılacak malzemelerin belirlenmesi.
3. Ana deneyde kullanılacak malzemelerinin ön deneylerinin yapılması ve gerçek dayanım tayini.
4. Belirlenen gerçek malzeme dayanımlarına göre ön analizin yeniden yapılması.
5. Ana deney düzeneğinin planlanması, deney sonucunda istenilen verilere uygun ölçüm materyallerinin tayini ve deney numunelerin hazırlanması.
6. Deney numunelerinin hazırlanması ile ana deney arasındaki süreçte numunelerin tahribatsız deneyler ile gözlenmesi.
7. Tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneylerinin (ana deneyler) yapılması
8. Deneylerde kullanılan ölçüm aletlerinden alınan ham verilerin işlenmesi çalışmaları.
9. Deney sonuçlarının öngörülen koşullar çatısı altında irdelenmesi ve kıyaslanması.

3.1. Deneylerle Kıyaslanacak Numunelerin, Klasik Yöntemler ve Bilgisayar Programları Yardımı ile Tasarımı ve Ön Analizi

Bu çalışmanın temelini oluşturan materyal ve yöntemler, başta Türk Standartları (TS) olmak üzere dünyada genel geçer standartlar çerçevesinde seçilmiştir. Özellikler “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” (TBDY 2018) ve "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” (TS 500) kapsamında belirlenen prensiplere sıkı sıkıya bağlıdır.

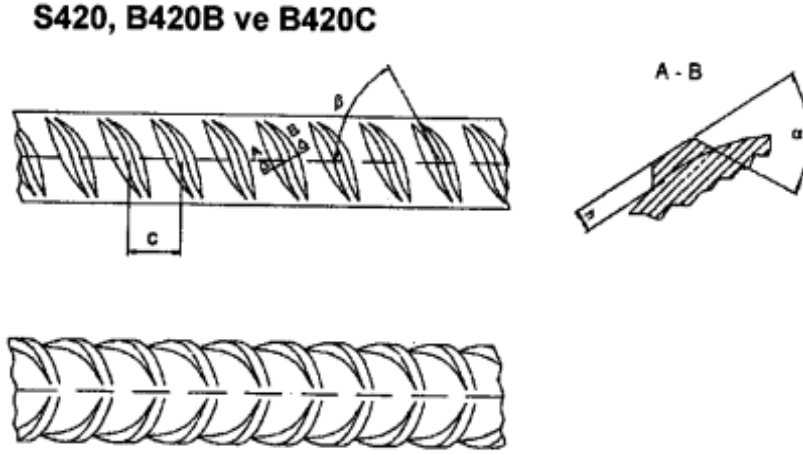
Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, TS 500 standardına uygun olarak seçilmiştir. Bu standart, beton, çelik, donatı ve diğer yapı malzemeleri için genel tasarım prensiplerini belirler. Donatı malzemesi olarak TS 708 "Çelik - Betonarme için - Donatı Çeliği" standardına uygun kalite ve çapta çelik çubuklar tercih edilmiştir.

3.1.1. Donatı düzeni hesaplamaları

Donatı düzeni hesaplamaları, TBDY 2018 ve TS 500 yönetmeliklerinde belirtilen hesaplama prensipleri ve katsayılar dahilinde gerçekleştirilmiştir. Bu yönetmelikler, betonarme yapı tasarımı için bütünlük, dayanıklılık ve güvenlik prensiplerini içermektedir. Donatı düzeni, kirişin geometrisi, yük durumları, malzeme özellikleri ve dayanıklılık kriterleri dikkate alınarak TS 500 ve TBDY 2018'e uygun bir şekilde belirlenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan temel parametreler arasında kirişin genişliği, yüksekliği, beton dayanım sınıfı, çelik donatı çapı, yük kombinasyonları ve dayanıklılık faktörleri bulunmaktadır. Bu parametreler, yine TS 500 ve TBDY 2018'in belirlediği kurallar çerçevesinde seçilmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca hesaplamalar yapılırken, her bir tip kirişin, donatı çapı ve sayısı birbirinden farklı olmasına karşın donatı oranının sabit tutulması hedeflenmiştir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak donatı düzeni optimize edilmiştir.

Güncel standartta (TBDY 2018) betonarme yapıların ana taşıyıcı sistemlerinde (yapının stabilitesini sağlayan; kolon, perde, kiriş, döşeme vb.) kullanılacak minimum beton dayanımı C25/30 olarak belirlenmiştir. Ancak bu tez çalışması 219M403 proje kodu ile yürütülen TÜBİTAK 1001 çalışması ile paralel yürütüldüğünden deney numunelerinde C30/37 dayanım sınıfında yer alan beton kullanılmıştır.

Deney numunelerinde kullanılacak donatı çeliğinin sınıfı hem ülkemizde yaygın kullanılması hem de kolay temin edilebilir olması sebebiyle Şekil 3.1’de detaylan gösterilen S420-B420C olarak seçilmiştir.



Şekil 3.1. Nervürlü çelik donatı görünümü

3.2. Deneylerde Kullanılacak Malzemelerin Belirlenmesi

Deneylerde kullanılacak numunelerde beton sınıfı olarak C25/30, çelik donatı sınıfı olarak ise B420C seçilmiştir. Bunun temel sebepleri; kolay bulunabilir malzemeler olmaları ve mevcut inşaat sektöründe sık kullanılmalarıdır. Çalışmanın, bilimsel çalışmaları destekler niteliği dışında sektörde soru işareti uyandıran hususları giderme niteliği de bulunmaktadır. Bu sebeple yaygın kullanılan malzemeler seçilmiştir. Çalışmada kullanılan 22 mm’lik donatı, sektörde sık kullanılmamaktadır. Bu donatının seçilme sebebi ise tam olarak budur. Mevcut sektörde belirli bir çapın üzerindeki donatıların temini nispeten zor olduğundan, bu çalışmanın kapsamı olarak aynı donatı oranında, daha küçük çaplı ve temini kolay donatıların kullanılması durumundaki davranış farklılıklarının gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

3.3. Ana Deneyde Kullanılacak Malzemelerinin Ön Deneylerinin Yapılması ve Gerçek Dayanım Tayini

Planlanan deneylerde numunelerin, bilgisayar yazılımlarında ve el hesaplarında kapasitelerinin tayininde kullanılmak üzere bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bahsi geçen ön deneylerde, deney numunelerinde kullanılacak olan donatıların çekme testleri

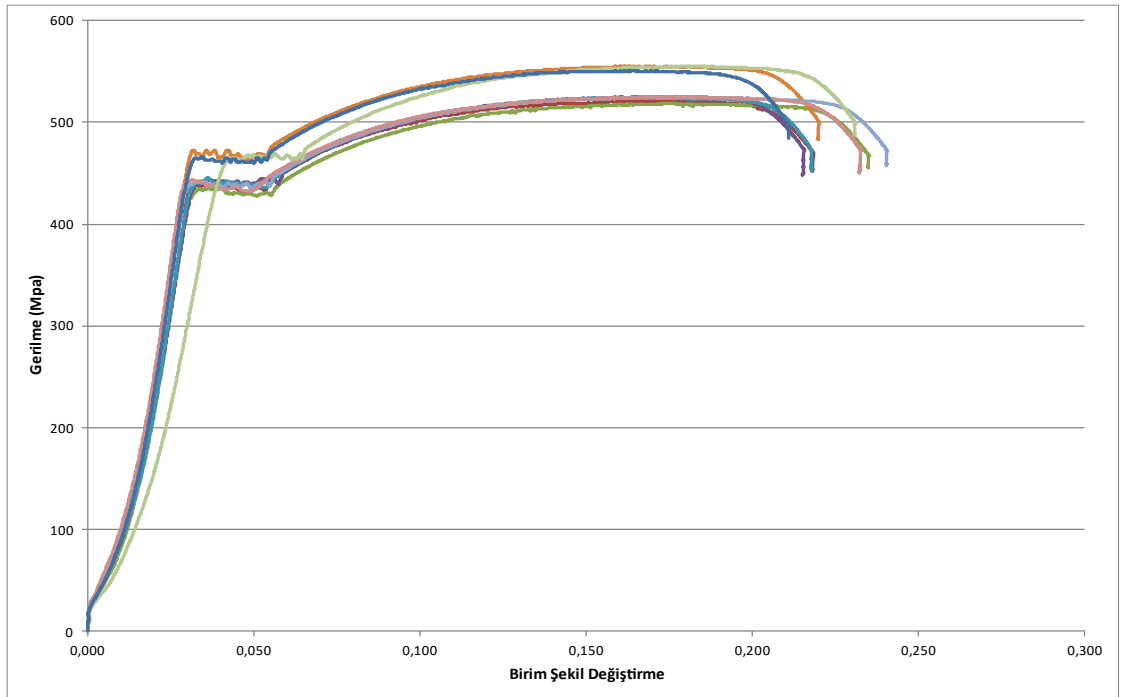
3. MATERYAL ve YÖNTEM

yapılmıştır. Bu deneylere ait Çizelge 3.1’de gösterilen ve manuel olarak alınan değerler aşağıda gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Çelik çekme deneyleri manuel verileri

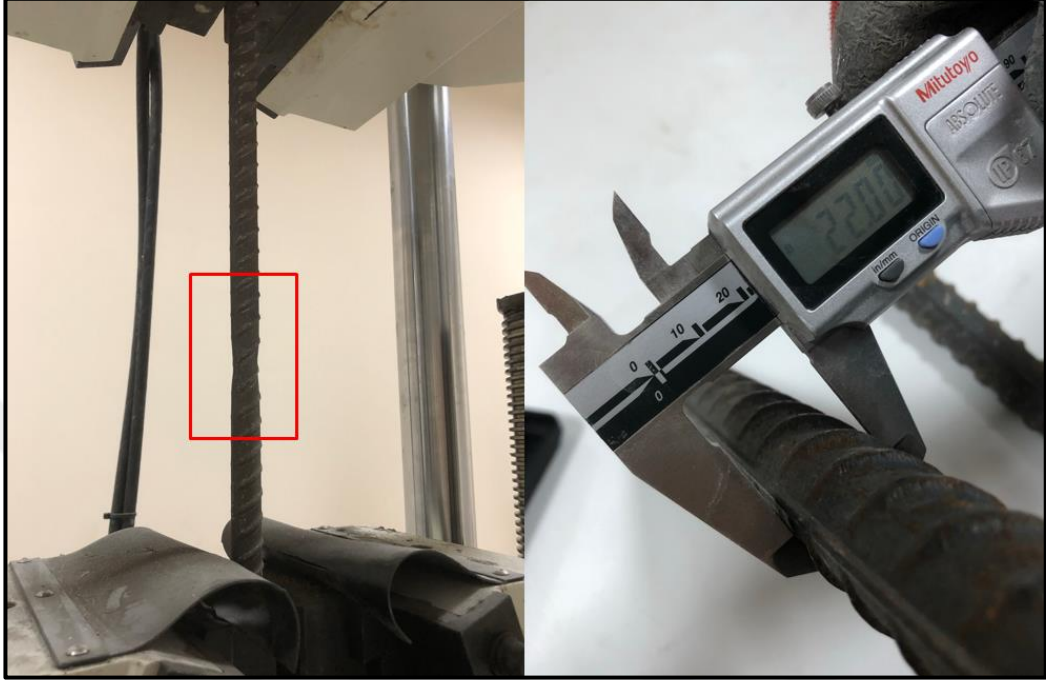
	Numune İlk Boy (mm)	Numune Son Boy (mm)	Çeneler Arası İlk Boy (mm)	Çeneler Arası Son Boy (mm)	Yükleme Hızı (mm/dk)
Pilot_1	376	431	255	-	10
Pilot_2	385	443	256	-	20
Numune-1.1	480	541	339	294	20
Numune-1.2	512	578	348	420	20
Numune-2.1	475	541	345	414	20
Numune-2.2	516	578	358	426	20
Numune-3.1	495	550	345	410	20
Numune-3.2	510	575	365	433	20
Numune-4.1	486	540	334	390	20
Numune-4.2	516	582	333	395	20
Numune-5.1	502	572	332	404	20
Numune-5.2	516	585	333	401	20
Numune-6.1	497	563	334	402	20
Numune-6.2	514	578	364	431	20

Yapılan ön deneylerden elde edilen birim şekil değiştirme – gerilme eğrisi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Ortalama donatı akma noktası 448,58 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Çelik çekme deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Yapılan deneylerden önce ve sonra numune çapı, dijital kumpas ile ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda donatı akma bölgesinde gelen inceltme Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Çelik donatının çekme deney sonu ve başlangıcındaki görünümü

Beton dökümü yapıldıktan sonra her bir kiriş için belirli sayıda küp numune alınmıştır. Deney kirişleri, beton dökümünü takip eden 3. 7. ve 28. gün tahribatsız deneylere tâbi tutulmuştur. Bununla eş zamanlı olarak, döküm esnasında alınan küp numunelere hem tahribatlı hem de tahribatsız deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda sunulmuştur. Buna göre Çizelge 3.2’de 3. gün, Çizelge 3.3’de 7. gün ve Çizelge 3.4’de ise 28. güne ait tahribatlı ve tahribatsız deneylerin ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.2. Üçüncü gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar

Döküm No	Numune No	Schmidt (sertlik)			Ultra Ses Rauf Ali kalibrasyonu Mpa			Ultra Ses Turgut kalibrasyonu Mpa			Basınç Dayanımı		
		1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	Alan	Mpa	KN
1. Döküm	KÜP_1	20	18	21	24	22	23	27	24	24	Yüzey_1	26	26,1
		20	18	18									
		19			23			25					
	KÜP_2	21	18	18	30	24	20	30	26	21	Yüzey_1	17	16,77
		20	20	17									
		19			25			26					
	KÜP_3	19	14	19	23	21	25	24	21	27	Yüzey_1	24	24,45
		18	16	20									
		18			23			24					
2. Döküm	KÜP_1	16	18	17	17	20	20	17	21	21	Yüzey_1	17	16,63
		14	17	15									
		16			19			20					
	KÜP_2	18	16	16	19	17	20	19	16	21	Yüzey_1	16	16,08
		17	13	16									
		16			19			19					
	KÜP_3	17	15	14	16	15	20	15	15	21	Yüzey_1	17	17,07
		13	16	13									
		15			17			17					

Çizelge 3.3. Yedinci gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar

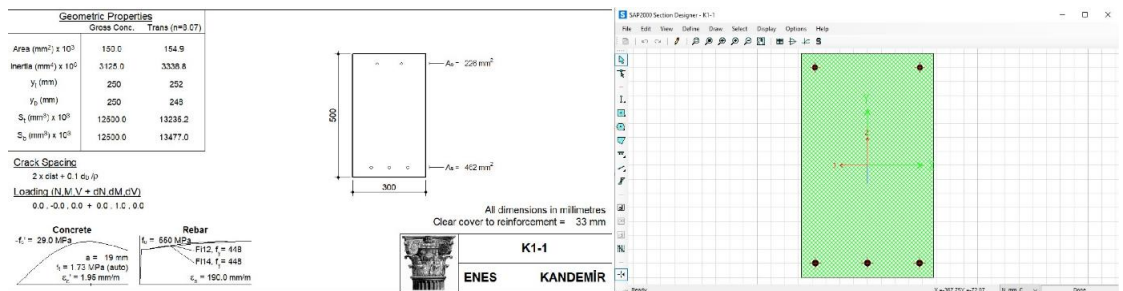
Döküm No	Numune No	Schmidt (sertlik)			Ultra Ses Rauf Ali kalibrasyonu Mpa			Ultra Ses Turgut kalibrasyonu Mpa			Basınç Dayanımı		
		1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	Alan	Mpa	KN
1. Döküm	KÜP_1	20	21	20	22	25	25	24	27	27	Yüzey_1	30	29,55
		18	20	19									
		20			24			26					
	KÜP_2	20	20	21	24	29	29	25	32	34	Yüzey_1	34	34,25
		20	21	21									
		21			27			30					
	KÜP_3	21	20	20	23	25	25	25	28	29	Yüzey_1	32	31,58
		20	19	19									
		20			24			27					
2. Döküm	KÜP_1	17	16	16	20	21	18	21	22	16	Yüzey_1	22	21,58
		18	17	16									
		17			20			20					
	KÜP_2	16	18	18	21	21	18	22	24	18	Yüzey_1	24	23,584
		17	17	17									
		17			20			21					
	KÜP_3	18	18	18	21	21	19	22	22	20	Yüzey_1	21	21,288
		19	17	16									
		18			20			21					

Çizelge 3.4. Yirmi sekizinci gün tahribatlı ve tahribatsız deneylere ait sonuçlar

Döküm No	Numune No	Schmidt (sertlik)			Ultra Ses Rauf Ali kalibrasyonu Mpa			Ultra Ses Turgut kalibrasyonu Mpa			Basınç Dayanımı		
		1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	Alan	Mpa	KN
1. Döküm	KÜP_1	26	24	20	30	29	25	35	33	28	Yüzey_1	39	39,09
		26	22	20									
		23											
	KÜP_2	20	22	20	28	27	20	30	30	24	Yüzey_1	33	32,70
		20	22	20									
		21											
	KÜP_3	20	24	21	30	29	26	35	33	28	Yüzey_1	38	37,93
		21	22	23									
		22											
2. Döküm	KÜP_1	22	24	23	22	22	16	21	23	16	Yüzey_1	25	25,20
		21	22	22									
		22											
	KÜP_2	21	21	23	22	21	19	24	23	18	Yüzey_1	26	25,73
		23	24	22									
		22											
	KÜP_3	24	23	24	20	21	19	21	22	19	Yüzey_1	26	25,65
		25	22	23									
		24											

3.4. Belirlenen Malzeme Dayanımlarına Göre Ön Analizin Yeniden Yapılması

Sap2000 ve Response2000 yazılımları ile ilgili deney numunelerinin tasarımı ve deney numunelerinin planlanması yeniden yapılmıştır. İlgili yazılımlara ait görüntüler Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



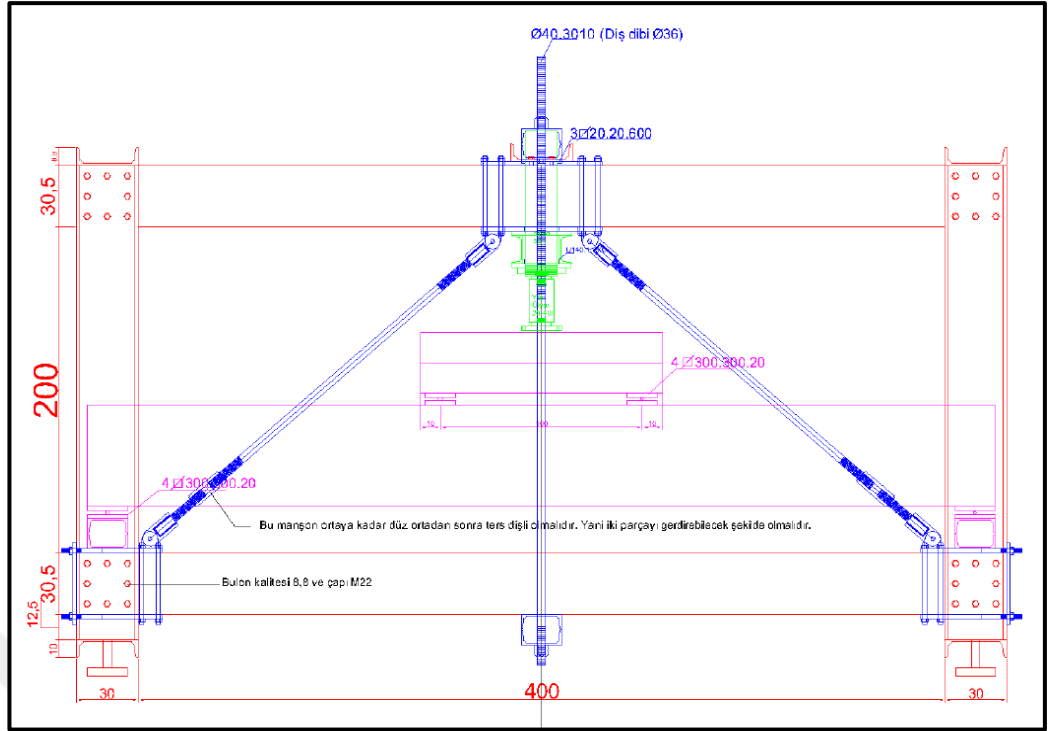
Şekil 3.4. Response2000 ve SAP2000 (Section Designer) analiz ekranı

3.5. Ana Deney Düzeneğinin Planlanması, Deney Sonucunda İstenilen Verilere Uygun Ölçüm Materyallerinin Tayini

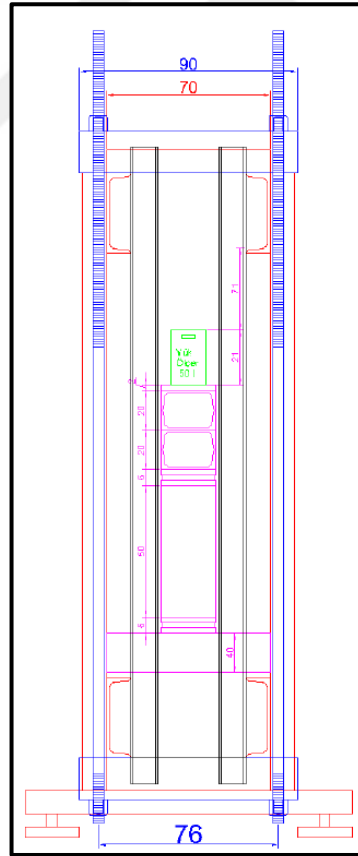
3.5.1. Ana deney düzeneğinin planlanması

Çalışma kapsamında tam ölçekli betonarme kiriş imal edilmiş ve dört noktalı, eğilme etkisi altında deneyleri yapılarak kiriş numunelerinin davranışı araştırılmıştır. Çalışma dahilinde geniş çaplı literatür araştırılması yapılmış ve kullanılabilecek deney düzenekleri incelenmiştir. Karahan (2008) çalışmasında kapalı devre olarak adlandırılan kiriş yükleme mekanizmasını uygulamıştır. Kapalı devre deney düzeneği kullanılmasının temel sebebi; deney yapılacak laboratuvar zemininin bu deney düzeneğine uygun tasarlanmamış olmasıdır.

Analizlerden elde edilen verilere göre, K3 kesitli betonarme kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesinin $M_r = 322,1 \text{ kN.m}$ seviyesine kadar çıkabileceği belirlenmiş ve bu kapasiteye ulaşmak için gereken maksimum tekil yükün $P_{mak} = 390,4 \text{ kN}$ olduğu hesaplanmıştır. Çelik yükleme sistemi için önerilen 50 ton kapasitenin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Bu bulgular ışığında, bir sonraki aşama olarak çelik çerçeve yükleme düzeneğinin tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan çelik çerçeve yükleme düzeneğinin ön görünüşüne ve yan görünüşüne dair görseller, Şekil 3.5'te ve Şekil 3.6'da sunulmuştur (Şahin 2023).



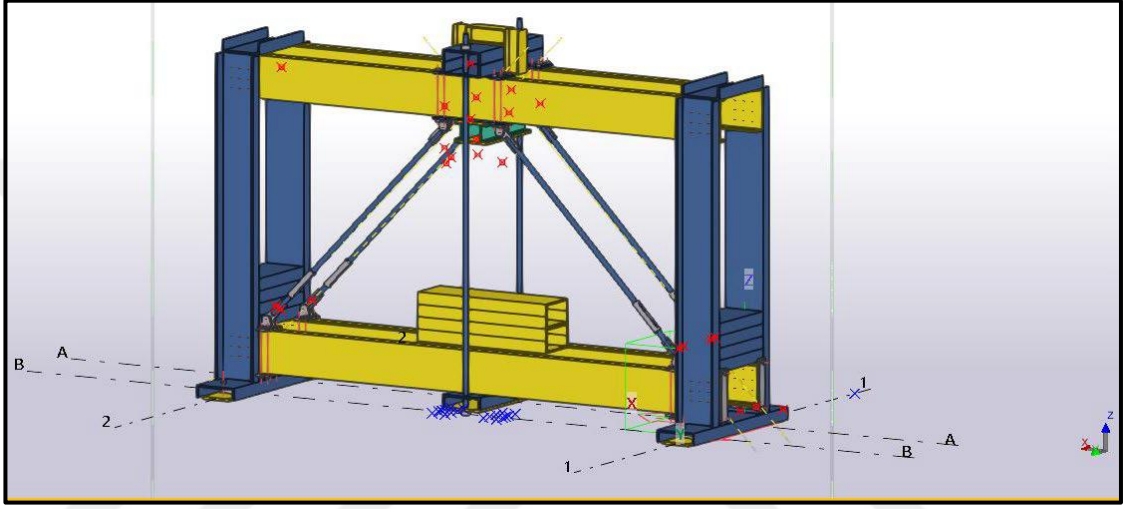
Şekil 3.5. Çelik çerçeve yükleme düzeneği ön görünüşü (Şahin 2023)



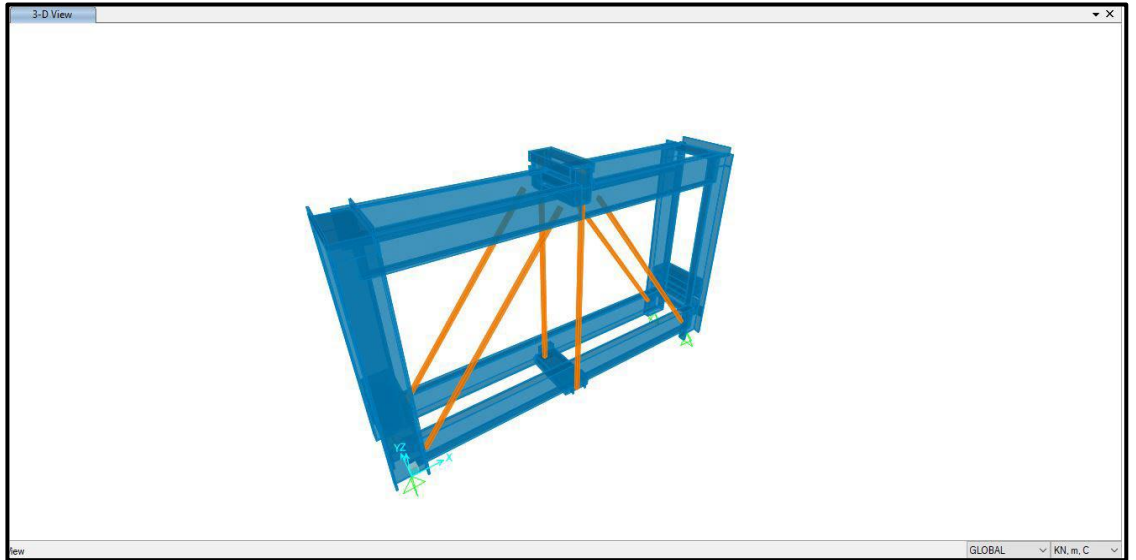
Şekil 3.6. Yükleme düzeneği yan görünüşü (Şahin 2023)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Mimari çizim sürecinin tamamlanmasının ardından, yükleme çerçevesi Tekla Structures (2021) ve SAP2000 (2021) yazılımları kullanılarak detaylı bir modellenme ve analiz sürecinden geçirilmiştir. Ana taşıyıcıların belirlenmesi için UPN350 ve UPN300 çelik profilleri üzerinde titiz bir çalışma yapılmıştır. Analiz sonuçları, UPN300 çelik profilin yeterli olduğunu göstermiş ve bu profilin imalatında kullanılmasına karar verilmiştir. Modelleme ve analiz aşamalarına dair görsel materyaller, sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görülmektedir (Şahin 2023).

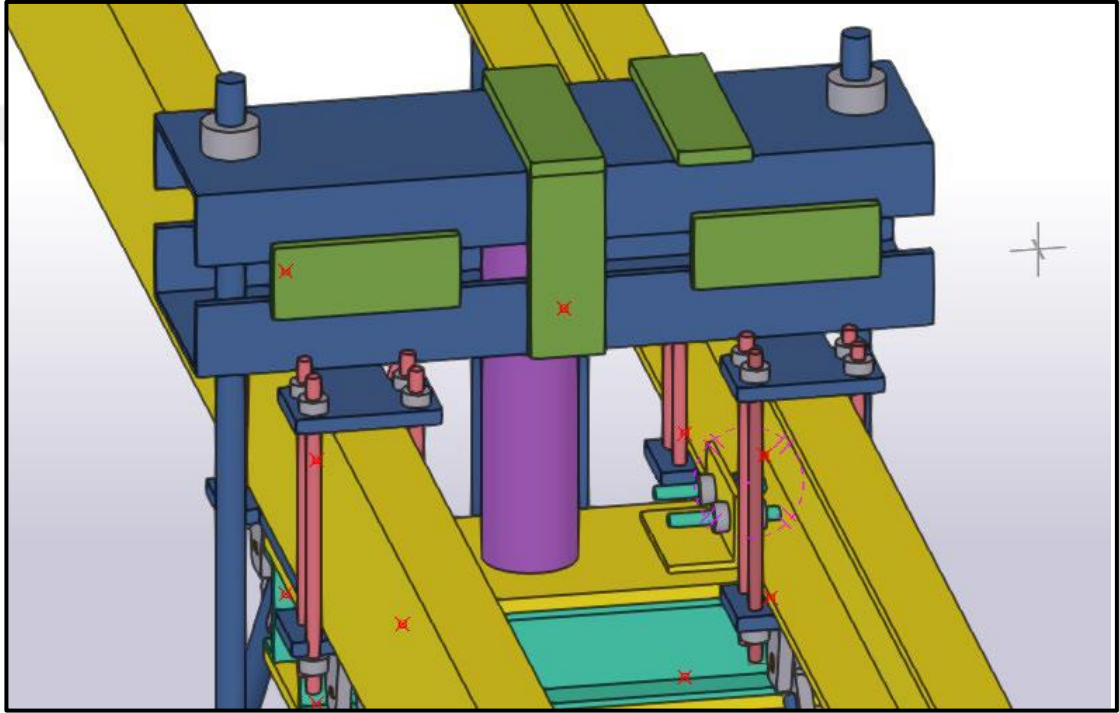


Şekil 3.7. Tekla Structures (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli (Şahin 2023).



Şekil 3.8. SAP2000 (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli (Şahin 2023)

Yapısal modelleme analizlerinde, 50 ton yük etkisi altında UPN300 profil kullanıldığında, sistemde meydana gelen elastik deformasyonlar orta dikmede 3,92 mm uzamaya neden olmuştur. Bu yük etkisiyle üst kiriş profillerinde 2,24 mm, alt kiriş profillerinde ise 3,08 mm sehim oluşmuştur. Oluşan iç kuvvetler dikkate alınarak yapılan tekrarlı kontrollerin ardından imalat aşamasına geçilmiştir. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne bölümü özenle çalışılmış ve Şekil 3.9'da sunulan hidrolik piston haznesi detayında, profil ve bağlantılarla birlikte, 2 cm kalınlığındaki plakalar için ek güçlendirmeler kullanılarak üretilmiştir (Şahin 2023).



Şekil 3.9. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne tasarımı (Şahin 2023)

Çelik yükleme çerçevesinin imalatı için gereken malzemeler temin edildi ve bu süreç, teknik uzmanlar tarafından Erzurum Teknik Üniversitesi'nin garaj ve atölyeler bölgesinde bulunan laboratuvar alanında gerçekleştirildi. Profil ve diğer çelik bileşenlerin montajı, TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen 219M403 kodlu proje ekibi ve bursiyerlerinin gözetiminde yapıldı. Yükleme çerçevesinin imalatı, uygulama sürecini kolaylaştırmak amacıyla giriş kapısına yakın bir konumda gerçekleştirildi (Şahin 2023).



Şekil 3.11. İmal edilen yükleme düzeneği

Yükleme çerçevesinin mesnetleri ve betonarme kirişlere tekil yükün dağıtımında kullanılacak profiller, uç uca eklenmiş 2 U profilden seçilmiştir. Kiriş numuneleri kolayca yükleme düzeneğine yerleştirilebilmesi için şekil 3.12’de görüldüğü gibi 2 ton taşıma kapasitesine sahip 2 adet portatif vinç kullanılmıştır. Şekil 3.13’de yükleme çerçevesine ait mesnet görsellerine yer verilmiştir.

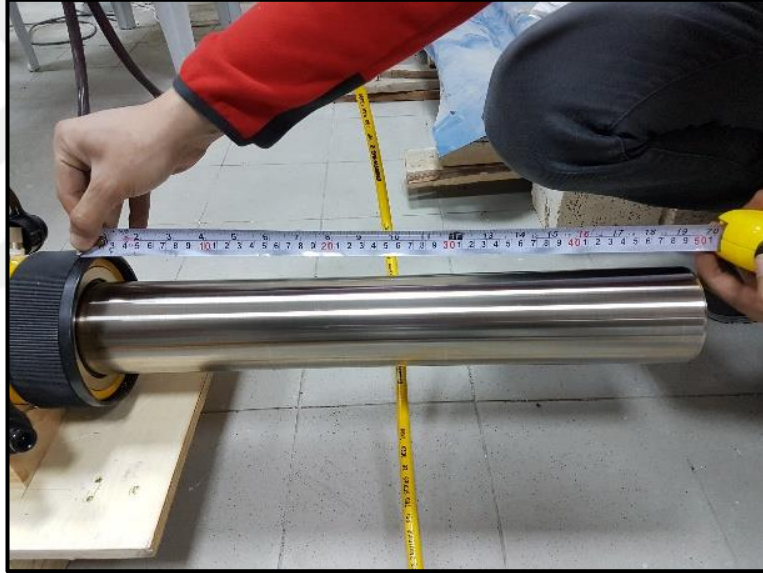


Şekil 3.12. Portatif vinçler ve yükleme çerçevesine ait görüntü (Şahin 2023)



Şekil 3.13. Yükleme çerçevesine ait mesnet görüntüsü (Şahin 2023)

Hidrolik piston için betonarme kiriş numunelerinin orta nokta çökme değerleri baz alınarak 50 ton kapasiteli ve 511 mm strok uzunluğuna sahip Şekil 3.14’de görseli sunulan hidrolik piston ve el pompası yükleme çerçevesine entegre edilmiştir.



Şekil 3.14. Hidrolik piston uzunluk kontrolü

Betonarme kiriş deneylerinde kullanılacak yük hücresi (loadcell) 100 ton kapasiteye sahip olup Şekil 3.15’de sunulmuştur. Yük hücresinin (loadcell) kalibrasyonları yapıldıktan sonra hidrolik pistonla beraber çalışması için entegre edilmiştir. Yük aktarma kontrolleri tamamlandıktan sonra deney numuneleri için sistem hazırlanmıştır.



Şekil 3.15. Deneylerde kullanılacak yük hücresi

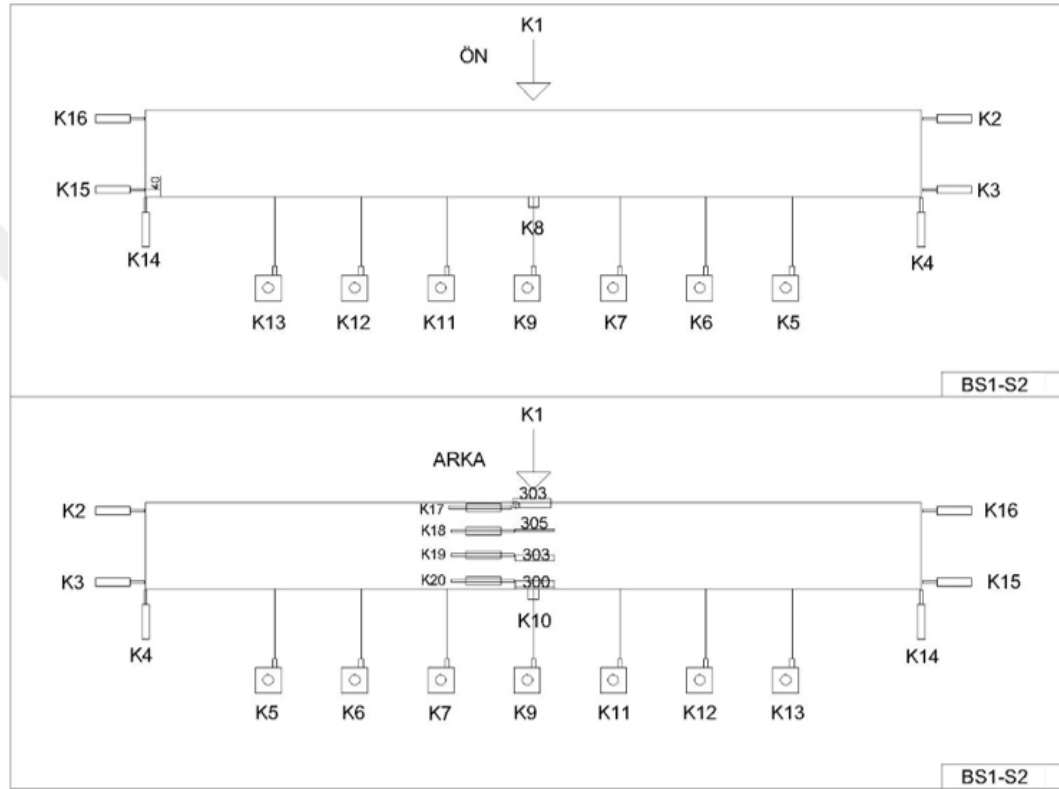
3.5.2. Deney sonucunda istenilen verilere uygun ölçüm materyallerinin tayini

Üzerinde çalışılan deneysel çalışmada en önemli konu yük ölçümüne ek olarak mekanik davranış parametresi olan kiriş numunelerinin ortalama düşey çökme değeridir. Ek olarak betonarme kiriş numunelerinin maksimum moment değerlerini hesaplamak için potansiyometrik cetvel olarak adlandırılan yatay deformasyon cihazı ve LVDT cihazı kullanılmıştır. Sensörlerin kalibrasyonları yapılmış ve daha sonra kontrolü dijital cetvel ile yapılmıştır. Şekil 3.16’da deney ölçüm düzeneğinde kullanılacak sensörlerin görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 3.16. Deplasman ölçümlerinde kullanılan sensörler

Çalışmanın en mühim olan datası, orta noktada düşey çökme değerini ölçen sensörlerde olası sorunların önüne geçmek için kiriş numune örneğinin orta noktasına 3 adet düşey sensör bağlanmıştır. Yeterli sayıda sensör mevcut olduğunda, kiriş açıklığı boyunca yapacağı sehim belirleyebilmek için yaklaşık 50 cm aralıklarla dikey yer değiştirme sensörleri yerleştirilmiştir. Kirişe ait ön ve arka sensör yerleşim şeması Şekil 3.17’de gösterilmiştir (Şahin 2023).



Şekil 3.17. Betonarme kiriş numunelerinin yük ve deformasyon sensörlerinin yerleşim şeması.

Şekil 17’de belirtilen sensör yerleşim şemasındaki K harfi her sensörün veri toplama cihazındaki kısaltmayı göstermektedir. K harfinin yanında gösterilen sayılar ise veri toplama cihazındaki kanal bağlantısının hangi kanala bağlandığını ifade etmektedir. Her bir harfin neyi temsil ettiğini incelediğimizde K1 yük hücresini, K3 ve K4 mesnet noktalarında düşey yer değiştirmeyi, ön ve arka sensör yerleşim görünümüne bakıldığında ise K8 K9 ve K10 orta nokta düşey deformasyon ölçen sensörler olduğu görülmektedir. Bu üç sensörün yanı sıra K5, K6, K7, K11, K12 ve K13 kodları da düşey deformasyonu ölçerek gerekli yük altında deformasyon eğrisini çizdirmek için kullanılmıştır.

Eğriliğin hesaplanması amacıyla yatay gerinim sensörlerini temsil eden K17 K18 K19 ve K20 numaralı sensörler kirişin arka tarafından ortasına merkezlenerek 300 mm mesafede ölçüm alınması için yerleştirilmiştir. Betonarme kiriş numunelerine K2, K3, K15 ve K16 kodlu sensörler yerleştirilmesinin temel nedeni uç bölgelerde oluşacak dönme hareketini ölçmek içindir.

Yük ve deformasyon ölçümü deneysel çalışmanın ana değerlendirilmesi gereken verilerdir. Sensörlerin bağlanması 3 adet 8 kanallı statik veri toplama sistemi 24 kanal olacak şekilde seri olarak bağlanmıştır. Veri toplama sistemini bilgi işlem ortamına aktarmak için Testlab Basic (2021) yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışma esnasında elektrik kesintisi veya oluşabilecek herhangi bir elektrik sorununu önlemek için UPS güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi deneyde kullanılan veri toplama sistemine ait görsel sunulmuştur.



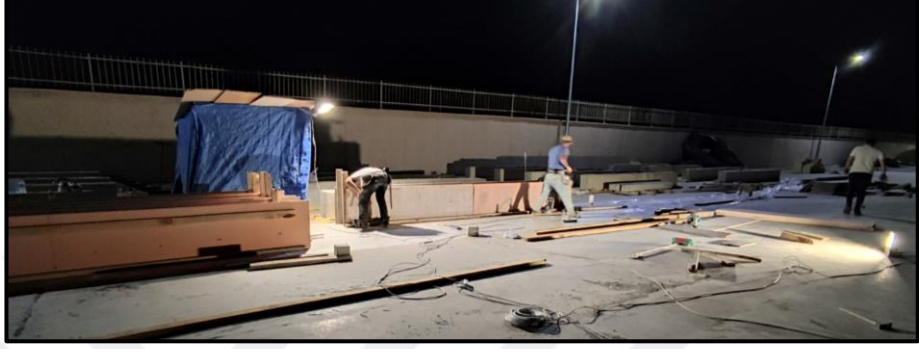
Şekil 3.18. Çalışmada kullanılan veri toplama sistemine ait görsel

3.6. Deney Numunelerin Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında yaz koşullarında imalatı gerçekleştirilen betonarme kiriş numunelerinin hazırlanması başlıklar halinde aşağıda anlatılmıştır.

3.6.1. Kalıp yapımı

Kalıplar şantiye ortamında birebir uygunluğunu yansıtmaları için daha önce uygulamada kullanılmış malzemeler tercih edilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen plastik, ahşap kalıplar Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de sunulmuştur.



Şekil 3.19. Kalıp imalatı



Şekil 3.20. Kalıp imalatının tamamlanmış hali

Ahşap kalıp yapım işlemi bittikten sonra kalıp 1 gün döküm şartlarında bekletilmiştir. Bu aşama sonunda Şekil 3.21’de görüldüğü gibi kalıp içi temizliği yapılmış ve daha sonrasında kalıp içi düzgün bir şekilde yağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra çelik donatı kafesini (pas payı için kullanılan malzemeler takılarak) dikkatli bir şekilde yerleştirmiş olup beton dökümü gerçekleşene kadar kalıplar bekletilmiştir.

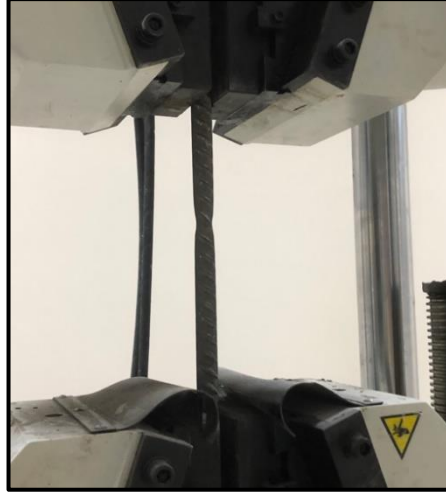


Şekil 3.21. Kalıp içi temizliği

3.6.2. Çelik donatı kafeslerinin yapımı

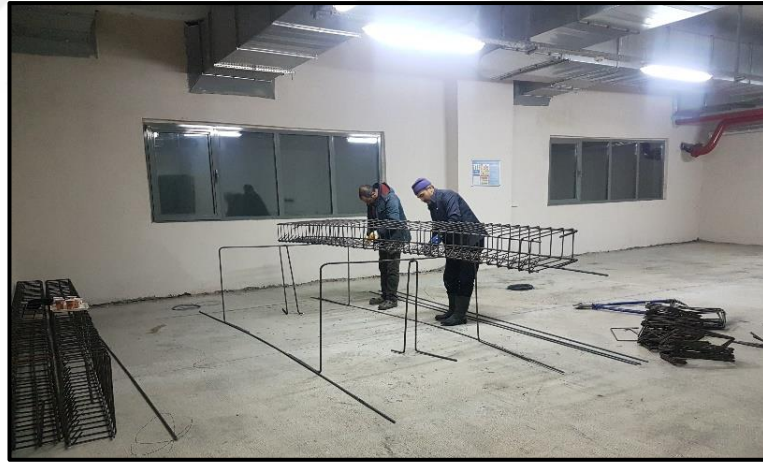
Boyuna donatının mekanik özelliklerinin, betonarme yapı elemanlarının eğilme altındaki davranışını etkilediği bilinmektedir. Bu deneysel çalışmanın bir parçası olarak, betonarme kiriş örneklerinin aynı bağdan donatı kafesleri üretilerek eğilme davranışında enine ve boyuna donatının aynı mekanik özellikleri kullanılarak bu parametrenin etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Çalışma kapsamında üretimde kullanılacak $\Phi 8$, $\Phi 12$, $\Phi 14$ ve $\Phi 22$ çaplarındaki her bağdan gelişigüzel numune seçilerek TS 708 (2016) uyarınca fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel yöntemle saptanmıştır. Şekil 3.22’de sunulan UTEST marka 1000 kN çekme kapasitesine sahip olan cihazda numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kullanılan cihazın, deneylerde gerçekleştireceği yükleme hızı 20 mm/dk olarak şekilde ayarlanmıştır. Deneylere başlanmadan önce çeneler arası ilk boy ölçümü yapılmış ve deney tamamlandıktan sonra son boy ölçümü yapılarak donatı boyundan bağımsız olarak birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Deney sonucunda veri toplama yazılımı tarafından kaydedilen yük ve uzama değerleri dosya halinde alınarak, gerilme – birim şekil değiştirme parametrelerine dönüştürülmüştür. Bununla birlikte, deney süresince donatı çapında meydana gelen değişimin takibi amacıyla herhangi bir ölçüm yapılmamıştır. TS708 (2016) uyarınca yapılan fiziksel ve mekanik inceleme sonucunda temin edilen tüm donatıların B420C sınıfı nervürlü çelik olduğu görülmüş ve kiriş donatı kafesi imalatı aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.22. Çelik donatı çekme testlerinden genel bir görünüm

Demir işçileri yardımıyla çelik donatı kafesi imalatları Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi garaj katındaki depo alanında yapılmıştır. İmalat yapımı sırası ve tamamlandıktan sonraki görseller Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de sunulmuştur.



Şekil 3.23. İmalatı devam eden kirişler



Şekil 3.24. İmalatı tamamlan kirişler

3.7. Deney Numunelerinin Hazırlanması ile Ana Deney Arasındaki Süreçte Numunelerin Tahribatsız Deneyler ile Gözlenmesi

Tez çalışma kapsamında betonarme kiriş numunelerinin tahribatsız yöntemlerle eksenel basınç dayanımı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız muayene yöntemleri olarak TS EN 12504-2 (2021)'e göre geri sıçrama (beton test çekici) deneyi ve TS EN 12504-4 (2021)' e göre ultrasonik atımlı dalga hızı (UPV) ölçüm deneyi uygulamaları yapılmıştır.

Beton test çekici deneylerinde Proceq marka N tipi sertlik çekici kullanılırken, ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümü deneylerinde de benzer şekilde Proceq marka ses dalgası ölçüm cihaz kullanılmıştır. Darbe çekici deneylerinde okunan sertlik değerleri, vuruş yönüne bağlı olarak, cihazın kalibrasyon eğrisi üzerinde eksenel basınç dayanımı değerleri ile kesiştirilmiştir. Benzer şekilde numuneler üzerinde ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri yapılmış ve Raouf and Ali (1983) ve Turgut and Küçük (2006) çalışmalarında sunulan kalibrasyon bağıntılarında yerlerine yazılarak eksenel basınç dayanımı için çıkarımlar yapılmıştır. Tahribatsız deneyler ile malzeme dayanım tayini çalışmalarını ilişkin görsel materyal Şekil 3.25'de sunulmaktadır.



Şekil 3.25. Beton için tahribatsız malzeme dayanım tayini görüntüleri

3.8. Tam Ölçekli 4 Noktalı Eğilme Deneylerinin (Ana Deneyler) Yapılması

Deneyisel uygulama süresince betonarme kiriş numuneler dâhil olmak üzere toplam 8 adet tam ölçekli kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranış durumu dört noktalı eğilme deneyleri ile değerlendirilmiştir. Kiriş yükleme deneyinde takip edilen tahkik aşağıdaki verilmiştir.

1. Deney numunesi kiriş yükleme düzeneğine alınmıştır. Herhangi bir çatlak, hasar olup olmadığı incelendi.
2. Hasarsız olduğu tespit edilen numuneye, deney esnasında çatlakların daha kolay teşhisi amacıyla, ince bir tabaka kireç badanası uygulandı.
3. Kiriş orta bölgesine çelik yük aktarma kirişi mesnetleri yerleştirildi. 30x30x2 cm ölçülerindeki mesnet plakası ince bir tabaka kartonpiyer alçısı ile sabitlendi. Plaka üzerinde çelik mesnet çubukları ortalandı ve teşkil edilen mesnet üzerine kutu profilden mamul çelik yük aktarma kirişi yerleştirildi. Yük aktarma kirişi mesnetlerinin merkezleri arasındaki mesafe 1 m olacak şekilde uygulama yapıldı.
4. Düşey sehimlerin ölçümü için deformasyon ölçüm sensörlerinin kirişe bağlantıları yapıldı. Bu aşamada, ölçüm alınacak noktada mafsallı sensör ucunun bağlanacağı 5x5x1 cm ölçülerinde ve ortasında diğ açılmış olan alüminyum plakalar çift bileşenli epoksi yardımıyla yüzeye tutturuldu. Sensör uçları kirişe bağlandıktan sonra diklikleri şakul yardımıyla kontrol edildi ve sensörlerin veri toplama sistemine kablo bağlantıları yapıldı.
5. Verisi eğrilik hesaplamalarında kullanılmak üzere; kiriş arka yüzüne yatay konumda ~300mm ölçüm boyu için deformasyon ölçüm sensörleri yerleştirildi.

Sensörlerin kiriş yüzeyine montajı mekanik bağlantılarla yapıldı, ölçüm boyu ~300mm olacak şekilde misine ile gerdirme işlemi yapılarak uç sabitlemesi gerçekleştirildi.

6. Göçme anı için bir güvenlik önlemi olarak; kiriş üzerindeki iki adet kancadan, numunenin düşey deplasmanını engellemeyecek şekilde çelik zincir geçirilerek mapa yardımıyla zincir uçları çelik çerçeve içerisinde kalacak biçimde birbirine bağlandı.
7. Kiriş ortasına yerleştirilmiş çelik yük dağıtma kirişi ortasına 30x30x2 cm ölçülerinde çelik plaka yerleştirilerek yük uygulama noktası deneye hazır hale getirildi.
8. Tüm sensörlerin veri toplama sistemi bağlantısı kontrol edildi.
9. Deney esnasında meydana gelen hasarın daha kolay takibi için iki adet projektör ile deney numunesi aydınlatıldı.
10. El pompası ile yük uygulaması gerçekleştirilerek deney başlatıldı.
11. Kiriş ön ve arka tarafında çatlak ve hasar oluşumu takip edilir. Çatlak oluştuğu andan itibaren kırmızı kalem ile kiriş üzerinde işaretleme yapıldı.
12. Deney süresince çatlak ve hasar oluşumları önceden hazırlanmış olan çizelge üzerine not edildi. Her aşamada fotoğraf çekimi yapıldı. Deney kamera ile kayıt altına alındı.
13. Deney tamamlandığında, kiriş numunesi üzerinde çatlak genişlikleri ölçülerek işaretleme yapıldı, kurulumun tersi sırayla çalışma yapılarak numune düzenden alını ve laboratuvar dışındaki rezerv alanına aktarımı sağlandı.

Eğrilik hesaplarında kullanılacak olan yatay deformasyon sensörlerinin yüklemeden hemen önceki görüntüsü Şekil 3.26'da sunulmuştur.



Şekil 3.26. Yatay deformasyon sensörlerinin yerleşimi

Deney numunesi üzerine sensör yerleşimi yapıldıktan sonra, deneye hazır hale getirildiği duruma ait ön ve arka görünüm Şekil 3.27’de sunulmaktadır.



Şekil 3.27. Deneye hazır hale getirilen kirişin ön ve arka cephe görüntüleri

Deney sonrası kiriş numune çatlak aralıklarının çizim çalışmasına ilişkin görsel materyal Şekil 3.28’de proje kapsamında deneye tabi tutulan kirişlerin muhafaza edildiği rezerv alanı Şekil 3.29’da sunulmaktadır.



Şekil 3.28. Deney sonrası çatlak aralığı işaretleme çalışması



Şekil 3.29. Deneye tabi tutulan kirişlerin muhafaza edildiği alan

3.9. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Aletlerinden Alınan Ham Verilerin İşlenmesi Çalışmaları

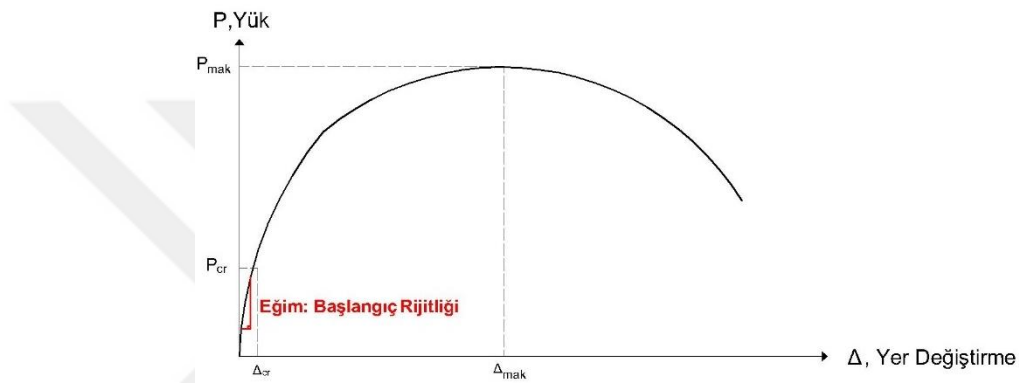
Tam ölçekli betonarme kiriş yükleme deneylerinde aşağıdaki ölçümler yapılmıştır.

1. Uygulanan kuvvet (yük).
2. Yük doğrultusundaki düşey yer değiştirmeler (sehim).
3. Eğrilik hesaplamalarında kullanılmak üzere tarafsız eksen alt ve üst bölgelerinde; kirişin ortası, sağ ve solunda, belirlenen noktalardan alınan yatay deplasmanlar.
4. Mesnet bölgelerinde alınan düşey yer değiştirme değerleri.

Bu sayısal değerler kullanılarak aşağıdaki grafikler elde edilmiştir; ilk çatlak anındaki eğilme momenti, akma momenti, maksimum moment vb. belirlenen parametreler çizelgeleştirilmiş ve karşılaştırılarak mütalaa edilmiştir.

1. Yük-yer değiştirme (deplasman) grafikleri
2. Moment – eğrilik grafikleri
3. Yük-orta nokta yer değiştirme grafiği üzerinde başlangıç rijitliğinin hesaplanması

Maksimum yükten ($P_{\max}$) sonra yükün $0,85 P_{\max}$ nokta ile başlangıç arasında kalan alan enerji sönümleme kapasitesi olarak hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği ise ilk çatlağın oluştuğu yükleme anına kadar olan grafik parçasının eğimi olarak değerlendirilmiştir ve parametrik olarak şekil 3.30’da sunulmuştur.



şekil 3.30. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinde rijitlik hesaplamaları

3.10. Deney Sonuçlarının Öngörülen Koşullar atısı Altında İrdelenmesi ve Kıyaslanması

Kiriş deneyi verisi kullanılarak yapılan bir diğer çalışma, betonarme yapı elemanlarının hesap ilkelerini konu alan TS 500 (2000) ve depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkelerini içeren TBDY (2018) ulusal normlarında yer verilen betonarme kiriş hesapları irdelenmesi olmuştur. Deneye tabi tutulan kirişlerin moment taşıma kapasiteleri Taşıma Gücü Yöntemi uyarınca hesaplanarak deneysel kapasite ile karşılaştırılmıştır. Her bir kiriş için deneysel olarak elde edilen malzeme dayanımları kullanılarak Response2000 (2000) ve SAP2000 yazılımı ile kesit analizleri yapılmış; teorik ve deneysel moment eğrilik ilişkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünün odak noktası, donatı düzeninin eğilme elemanlarının davranışları üzerinedir. Eğilme elemanı olarak kirişler seçilmiş olup bu bölüm, söz konusu elemanların hem deneysel hem de teorik olarak nasıl incelendiğini detaylandırmaktadır. İlk olarak, deneysel metodoloji ele alınmıştır. Bu kapsamda, yapılan tam ölçekli deneyler sırasında kullanılan numunelerin çeşitli özellikleri, özellikle malzeme ve kesit donatı düzeni özellikleri üzerinde durulmuştur. Donatı düzeni ise, daha çok demet donatılar ile yan yana sıralanmış donatılar açısından incelenmiştir. Bu kıyaslama için deney kesitleri oluşturulurken donatı oranının birbirine yakınlığı göz önünde bulundurulmuştur.

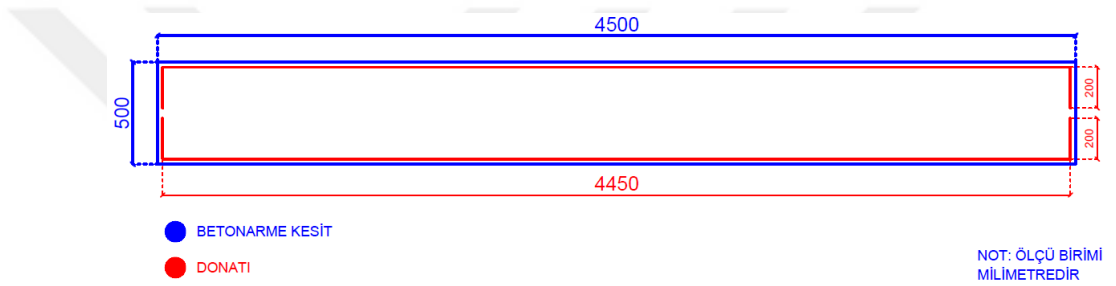
İlgili deney numunelerin malzeme özellikleri, ana deney öncesi ve ana deney gününde gerçekleştirilen yardımcı deneylerle test edilmiştir. Bu yardımcı deneyler, ana deneyin geçerliliğini artırmak ve ana deney hakkında bir takım ön çalışmalar yapmak için tasarlanmıştır. Yardımcı deneylerde hem tahribatlı yöntemler hem de tahribatsız yöntemler kullanılmıştır.

Ayrıca, bu bölümde deneysel çalışmaların sonuçları teorik çerçevelerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama, eğilme elemanlarının davranışlarını anlamada hem deneysel bulguların hem de teorik modellerin önemini vurgulamaktadır. Deney sonuçları, detaylı olarak analiz edilmiş ve elde edilen veriler, var olan teorik modellerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme süreci, eğilme elemanlarının davranışlarını daha iyi anlamak ve mevcut modellerin doğruluğunu test etmek için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak bu bölüm, eğilme elemanlarının davranışlarını anlamak için yapılan kapsamlı bir deneysel ve teorik inceleme sunmaktadır. Bu inceleme hem konunun mevcut durumunu yansıtmakta hem de gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmayı hedeflemiştir.

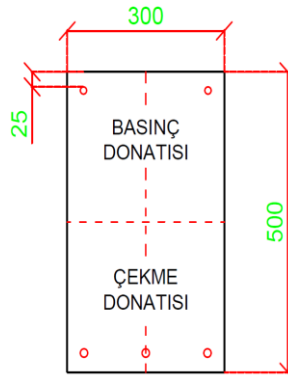
4.1. Deney Numuneleri ve Kesit Özellikleri

Donatı düzenleri birbirinden farklı kirişlerin, deneysel metot ile incelenmesi için 3 farklı gruptan oluşan toplamda 8 adet deney numunesi tasarlanmıştır. Bu numuneler

tasarlanırken aynı kesit geometrisinden oluşan (eşit genişlik ve eşit yükseklik) kirişlerin farklı donatı çapları ve farklı donatı sıralamaları kullanılarak, aynı veya birbirine yakın çekme donatısı oranına sahip olması göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de standart deney kesiti gösterilmektedir. Standart deney kirişi; 300 mm genişliğinde, 500 mm yüksekliğinde ve 4.500 mm uzunluğunda, çekme ve basınç donatılarından oluşan yaygın betonarme bir kiriş düzenidir. Kirişlerde sargı donatısı, standart olarak 8 mm çapında nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Sargı donatısı, sıkılaştırma bölgelerinde 10 mm aralıklarla, geri kalan bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır. Deney numunelerinde C30 beton ve B420C nervürlü yapısal çelik donatı kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kiriş boyuna donatı boyutları

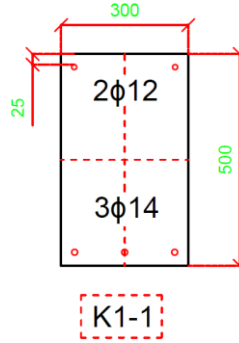


Şekil 4.2. Kiriş numunelerine ait ortak kesit detayı

4.1.1. K1-1 deney numunesi özellikleri

K1-1 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.3’te verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 2Φ12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise 3Φ14 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500

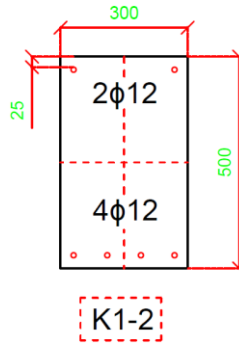
mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.



Şekil 4.3. K1-1 kesit detayı

4.1.2. K1-2 deney numunesi özellikleri

K1-2 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.4’de verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 2Φ12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise 4Φ12 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.

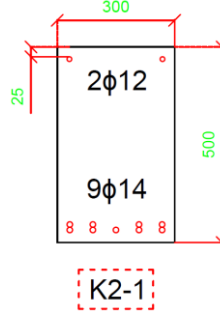


Şekil 4.4. K1-2 kesit detayı

4.1.3. K2-1 deney numunesi özellikleri

K2-1 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 2Φ12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise ikişerli gruplardan meydana gelen beş sıralı demet donatı ve ortada tek konumlanan

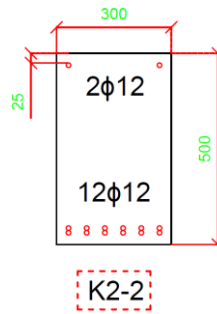
donatıdan oluşan 9 Φ 14 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.



Şekil 4.5. K2-1 kesit detayı

4.1.4. K2-2 deney numunesi özellikleri

K2-2 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 2 Φ 12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise ikişerli gruplardan oluşan altı sıralı demet donatı halinde 12 Φ 12 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.

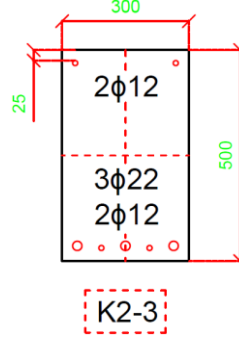


Şekil 4.6. K2-2 kesit detayı

4.1.5. K2-3 deney numunesi özellikleri

K2-3 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 2 Φ 12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise

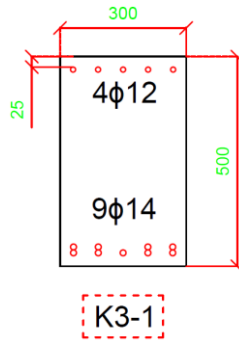
2Φ12 + 3Φ22 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.



Şekil 4.7. K2-3 kesit detayı

4.1.6. K3-1 deney numunesi özellikleri

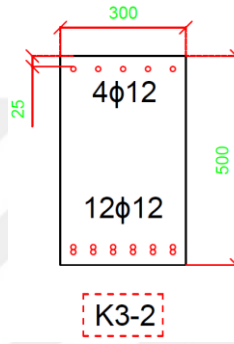
K3-1 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 4Φ12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise ikişerli gruplardan meydana gelen beş sıralı demet donatı ve ortada tek konumlanan donatıdan oluşan 9Φ14 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.



Şekil 4.8. K3-1 kesit detayı

4.1.7. K3-2 deney numunesi özellikleri

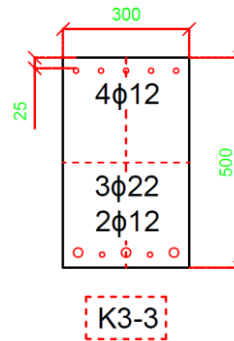
K3-2 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 4 Φ 12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise Çekme donatısı olarak ise ikişerli gruplardan oluşan altı sıralı demet donatı halinde 12 Φ 12 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.



Şekil 4.9. K3-2 kesit detayı

4.1.8. K3-3 deney numunesi özellikleri

K3-3 deney elemanının donatı düzeni Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu kesitte basınç donatısı olarak 4 Φ 12 nervürlü yapısal çelik kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak ise 2 Φ 12 + 3 Φ 22 kullanılmıştır. Kiriş kesiti 300 mm x 500 mm ölçülerinde olup, kiriş uzunluğu 4.500 mm olarak belirlenmiştir. Etriye sıklaştırma bölgelerinde 10 mm diğer bölgelerde ise 20 mm aralıklarla kullanılmıştır.

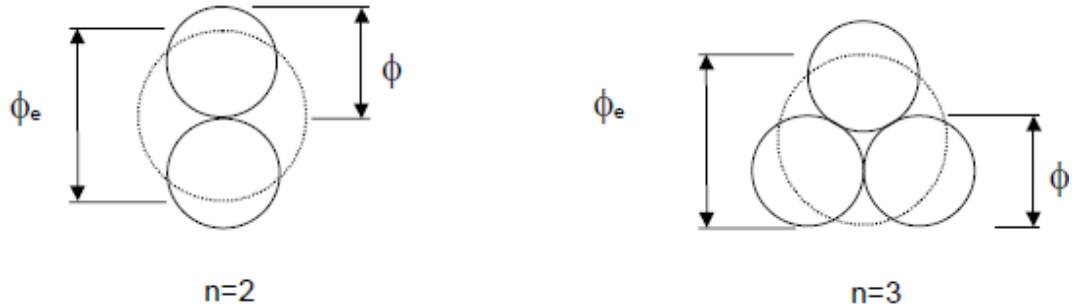


Şekil 4.10. K3-3 kesit detayı

4.2. Deney Kiriş Grupları

Deney grupları tasarlanırken K1, K2 ve K3 olmak üzere üçe ayrılmıştır. Genel hatlarıyla K1 grubu diğer iki gruba göre daha düşük eğilme momenti kapasitesine ve daha düşük donatı oranlarına sahiptir. K2 ve K3 grubu kirişleri ise K1 grubuna oranla daha yüksek eğilme momenti kapasitesine sahiptir. Bu iki grubu ayıran temel farklılık ise basınç donatıları arasındaki farklılıklardır. K2 grubunda K3 gruba kıyasla daha az oranda basınç donatısı kullanılmıştır. Bunun temel amacı; betonarme eğilme elemanlarında boyuna donatı temel olarak çekme tesirlerinin karşılanması amacıyla kullanılır. Bununla birlikte, basınç bölgesinde montaj ya da basınç donatısı olarak kullanılan boyuna donatılar yüklenme derecesine bağlı olarak moment taşıma kapasitesine ve kullanılabilirlik özelliklerine önemli ölçüde katkı sunmalarıdır. Bu farklılığın gözlemlenebilmesi adına benzer çekme donatı kapasitesine sahip ancak basınç donatısı oranları birbirinden farklı iki farklı deney grubu tasarlanmıştır. Deney grupları aşağıda, kendi içerisinde başlıklar halinde daha detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

Türk standardı TS 500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları) kirişlerde, donatılar arasındaki net mesafe için aşağıdaki koşulların uygulanması gerektiğini ifade etmektedir. Kirişlerde sıra içinde veya sıralar arasında donatı çubukları arasında kalan net aralık, 20 mm'den ve donatı çapından ve en büyük agrega boyutunun 4/3 ünden az olmamalıdır. Demet donatı kullanıldığında anma çapı ϕ esas alınmalıdır, Şekil 4.11'de yönetmelikte belirtilen eşdeğer çap görseli sunulmuştur. Buna göre birden fazla sıra oluşturulduğunda, üst üste çubuklar aynı hizaya getirilmelidir.



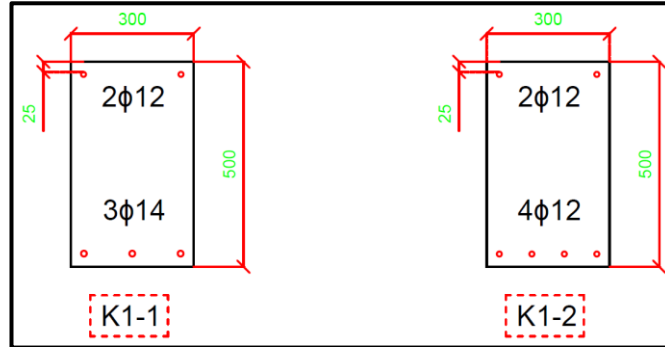
Şekil 4.11. Eşdeğer çap yöntemi (TS500 2000)

4.2.1. K1 grubu kirişler

Bu grupta yer alan kirişlerde aynı miktarda basınç donatısı kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de de görüldüğü üzere K1-1 kesitinde 3 Φ 14 çekme donatısı kullanılmış olup buna karşın K1-2 kesitinde 4 Φ 12 çekme donatısı kullanılmıştır. K1 deney grubu donatı düzeni planlanırken baz alınan nokta, diğer iki gruba göre nispeten düşük moment kapasitelerinde olan, demet donatı kullanımına ihtiyaç duyulmayan, benzer donatı oranına sahip iki kesitin, farklı donatı çaplarında imal edilerek tam ölçekli deneylere tabi tutulmasıdır. Şekil 4.12’de kesitleri gösterilen K1 grubu kesitleri yukarıda Türk standardı TS 500’de ifade edilen betonarme kirişlerde donatılar arasındaki net mesafe koşullarına uymaktadır. Bu sebepten ötürü demet donatı kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır.

Çizelge 4.1. K1 kiriş grubuna ait donatı değerleri

K1	Kiriş	BASINÇ DONATISI			ÇEKME DONATISI			
		Donatı Çapı	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)	Donatı Çapı	Donatı Alan (mm ²)	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)
	K1-1	ϕ 12	2	226,2	ϕ 14	153,9	3	461,8
	K1-2	ϕ 12	2	226,2	ϕ 12	113,1	4	452,4



Şekil 4.12. K1 kiriş grubu toplu kesit detayları

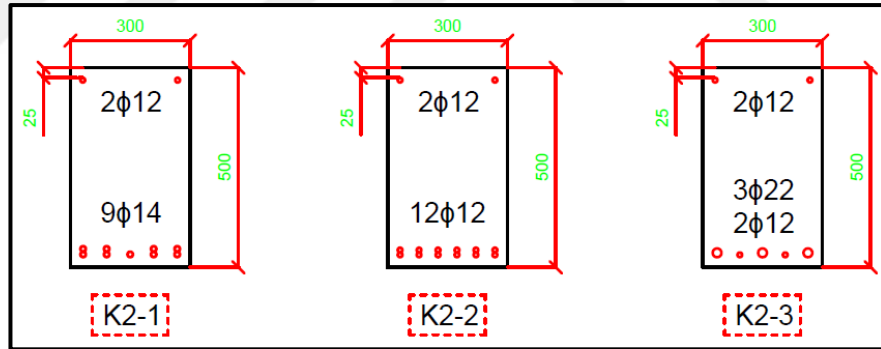
4.2.2. K2 grubu kirişler

K2 grubu deney numunelerinde K1 grubuna benzer şekilde, kendi içerisinde, aynı oranda basınç donatısı kullanılmıştır. K2-1 kesitinde 9 Φ 14, K2-2 kesitinde 12 Φ 12 ve K2-3 kesitinde ise 2 Φ 12 + 3 Φ 22 çekme donatısı kullanılmıştır. Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere

K2 grubundaki kesitlerin toplam donatı alanları birbirine çok yakın seçilmiştir. Yaklaşık olarak %0,7 ile %2 arasında değişen bu farklılık ihmal edilebilecek düzeydedir. K2 deney grubu donatı düzeni tasarlanırken Türk standardı TS 500 dikkate alınmıştır. Yukarıda bahsedildiği üzere TS 500, betonarme kirişlerde donatılar arasında kalan net mesafe için başı koşullar koymaktadır. Bu grupta yer alan K2-1 ve K2-2 kesitleri ilgili koşulu sağlamadığından demet donatı kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede bir tanesi çekme donatıları yan yana sıralı, diğer ikisi demet donatılı 3 kirişin, eğilmede çekme etkisi altındaki davranışının gözlemlenebilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.13’de bu gruptaki kirişlerin kesit detayları ve aralarındaki farklılıklar gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.2. K2 kiriş grubuna ait donatı değerleri

K2	Kiriş	BASINÇ DONATISI			ÇEKME DONATISI			
		Donatı Çapı	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)	Donatı Çapı	Donatı Alan (mm ²)	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)
	K2-1	φ12	2	226,2	φ14	153,9	9	1385,4
	K2-2	φ12	2	226,2	φ12	113,1	12	1357,2
	K2-3	φ12	2	226,2	φ22 + φ12	380,1 + 113,1	3+2	1366,6



Şekil 4.13. K2 kiriş grubu toplu kesit detayları

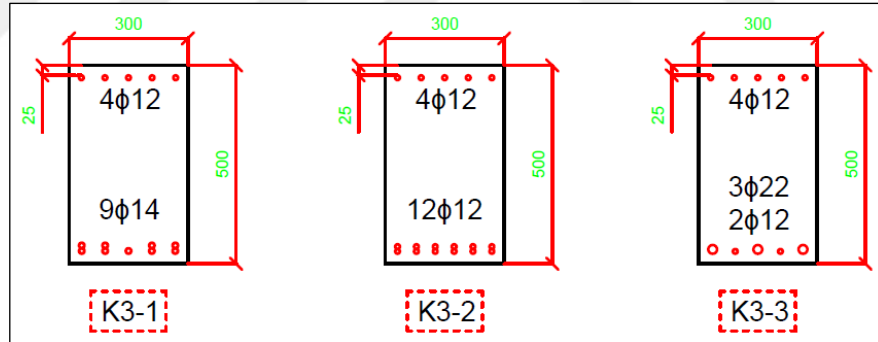
4.2.3. K3 grubu kirişler

K3 grubu kirişlerde diğer iki gruba benzer şekilde, kendi içerisinde aynı oranda basınç donatısı kullanılmıştır. Ancak bu grupta K2 grubundan farklı olarak 5φ12 basınç donatısı kullanılmıştır. K3-1 kesitinde 9φ14, K3-2 kesitinde 12φ12 ve K3-3 kesitinde ise 2φ12 + 3φ22 çekme donatısı kullanılmıştır. Çizelge 4.3’de görüldüğü üzere K3 grubundaki kesitlerin toplam donatı alanları birbirine çok yakın seçilmiştir.

Yaklaşık olarak %0,7 ile %2 arasında değişen bu farklılık ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu deney grubu için çekme donatısı düzeni tasarlanırken, Türk standardı TS 500 dikkate alınmıştır. Yukarıda bahsedildiği üzere TS 500, betonarme kirişlerde donatılar arasında kalan net mesafe için başı koşullar koymaktadır. Bu grupta yer alan K3-1 ve K3-2 kesitleri ilgili koşulu sağlamadığından demet donatı kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede bir tanesi çekme donatıları yan yana sıralı, diğer ikisi demet donatılı 3 kirişin, eğilmede çekme etkisi altındaki davranışının gözlemlenebilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.14'te bu gruptaki kirişlerin kesit detayları ve aralarındaki farklılıklar gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.3. K3 kiriş grubuna ait donatı değerleri

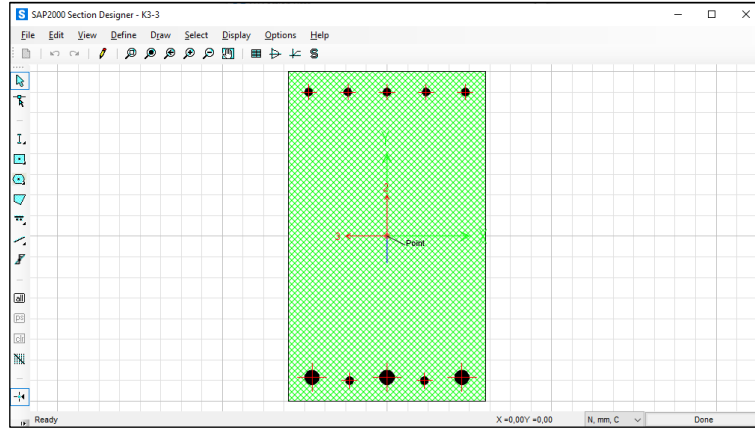
K3	Kiriş	BASINÇ DONATISI			ÇEKME DONATISI			
		Donatı Çapı	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)	Donatı Çapı	Donatı Alan (mm ²)	n (Adet)	Toplam Donatı Alanı (mm ²)
	K3-1	φ12	5	565,5	φ14	153,9	9	1385,4
	K3-2	φ12	5	565,5	φ12	113,1	12	1357,2
	K3-3	φ12	5	565,5	φ22 + φ12	380.1 + 113.1	3+2	1366.6



Şekil 4.14. K3 kiriş grubu toplu kesit detayları

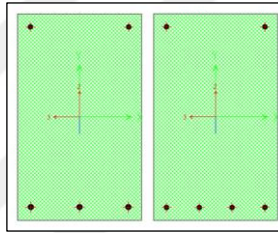
4.3. SAP2000 Yazılımı ile Kesit Analizi

Deney numunelerine ait kiriş kesitleri, deney öncesi SAP2000 yazılımının Şekil 4.15'te gösterilen Section Designer menüsü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu Analiz ilk olarak B420C çelik sınıfı ve C30 beton sınıfına göre yapılmıştır. Ön tasarım aşamasın bu veriler kullanılmıştır. Ancak daha sonra, ana deney günü, deneylerde kullanılan beton ve çelik donatılardan alınan numunelerin test edilmesiyle elde edilen gerçek verilere göre yeniden hesaplanmıştır.

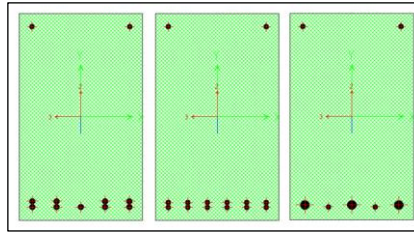


Şekil 4.15. SAP2000 Section Designer menüsü (SAP2000 2000)

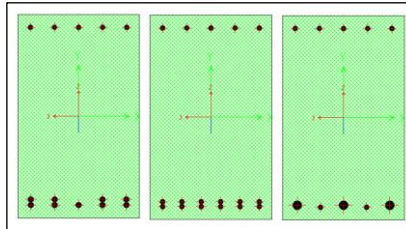
Aşağıda Şekil 4.16’da K1 kiriş grubuna ait, Şekil 4.17’de K2 kiriş grubuna ait ve Şekil 4.18’de K3 kiriş grubuna ait tasarım modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.16. K1 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü (SAP2000 2000)



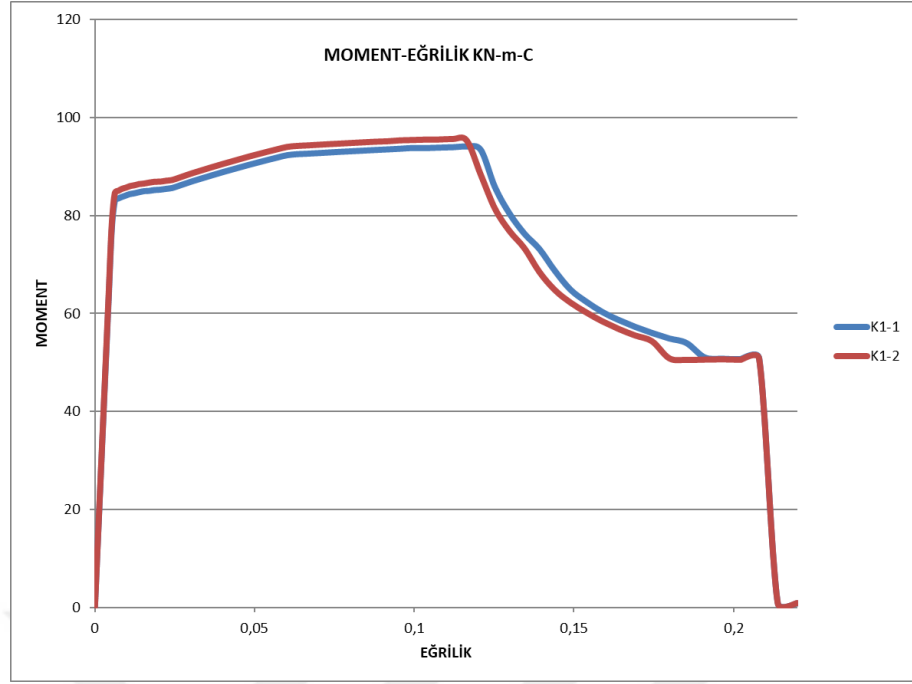
Şekil 4.17. K2 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü (SAP2000 2000)



Şekil 4.18. K3 kiriş grubu SAP2000 görüntüsü

Deney numunelerine ait kesitlerin, SAP2000'den alınan moment-eğrilik grafikleri birbirleriyle kıyaslanabilmesi için grup içerisinde tek bir grafik olarak irdelenmiştir. Moment-eğrilik grafikleri hakkında; grafiğin başlangıç bölümü genellikle doğrusaldır. Bu, kirişin elastik davranışını temsil eder, yani yük kaldırıldığında kirişin orijinal şekline döneceği anlamına gelir. Burada grafiğin geniş bir alana yayılması ya da başka bir deyişle grafiğin altında kalan alanın diğerinden daha yüksek olması, o kirişin diğer kirişe veya kirişlere nispeten daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu gösterir. Bu durum, kirişin daha büyük deformasyonlara ulaşabileceği ve ani göçme yerine uyarı vererek göçeceği anlamına gelir. Grafiğin en yüksek noktası, kirişin ulaşabileceği maksimum moment kapasitesini temsil eder. Bu noktadan sonra, kirişin kapasitesi azalmaya başlar ve nihayetinde kırılma meydana gelir. Donatının akma noktasına ulaştığı andan itibaren, kiriş artık elastik davranış göstermez ve kalıcı deformasyonlar başlar. Bu bölge, grafiğin daha düz bir hale geldiği noktadır. Beton çatladığında, grafik doğrusallıktan sapar. Bu nokta, genellikle moment kapasitesinde bir artış ile karakterize edilir çünkü çelik donatı daha fazla yük taşımaya başlar.

K1 grubu deney numunelerine ait kiriş kesit analizi aşağıdaki Şekil 4.19'da sunulmuştur. K1-1 (3Φ14 çekme donatısı) kesiti, K1-2 (4Φ12 çekme donatısı) kesitine göre %2,08 daha fazla çekme donatısına sahip olmasına karşın %1,6'lık daha fazla maksimum moment kapasitesine sahiptir. Çizelge 4.4'te her iki kesite ait maksimum moment değerleri gösterilmiştir. Ancak yapılan analize ve grafiğe göre K1-2 kesiti K1-1 kesitine göre daha sünek bir davranış göstermiştir. K1-2 kesiti K1-1 kesitine göre daha büyük eğrilik değerinde, maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır.

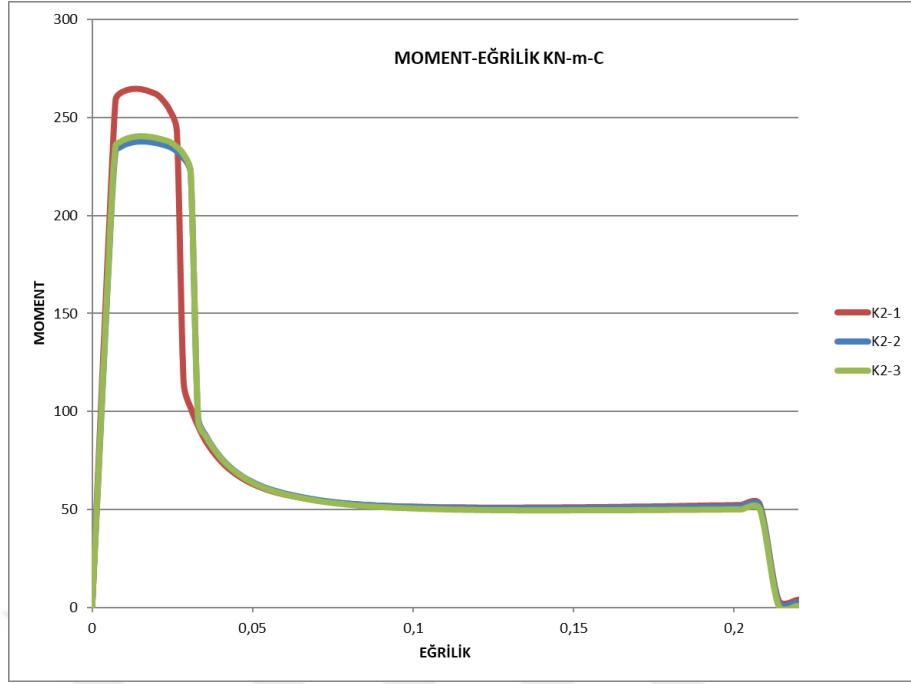


Şekil 4.19. K1 grubu teorik moment-eğrilik grafiği

K1	Kiriş	Maksimum Moment (kN)
	K1-1	95,6
	K1-2	94,1

Çizelge 4.4. K1 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi

K2 grubu deney numunelerine ait kiriş kesit analizi aşağıdaki Şekil 4.20’de sunulmuştur. K2-1 kesiti K2-2 kesitine göre %1,4 daha fazla donatı oranına sahipken, %11,3 daha fazla maksimum eğime momenti değerine ulaşmıştır. Yine K2-1 kesiti K2-3 kesitine göre %2,1 daha fazla donatı oranına sahipken, %10,1 daha fazla maksimum eğime momenti değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.5’te K2 grubunda yer alan kesitlere ait maksimum moment değerleri gösterilmiştir. Yapılan analize ve grafiğe göre K2-2 ve K2-3 kesitleri K2-1 kesitine göre daha büyük eğrilik değerinde, maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır.

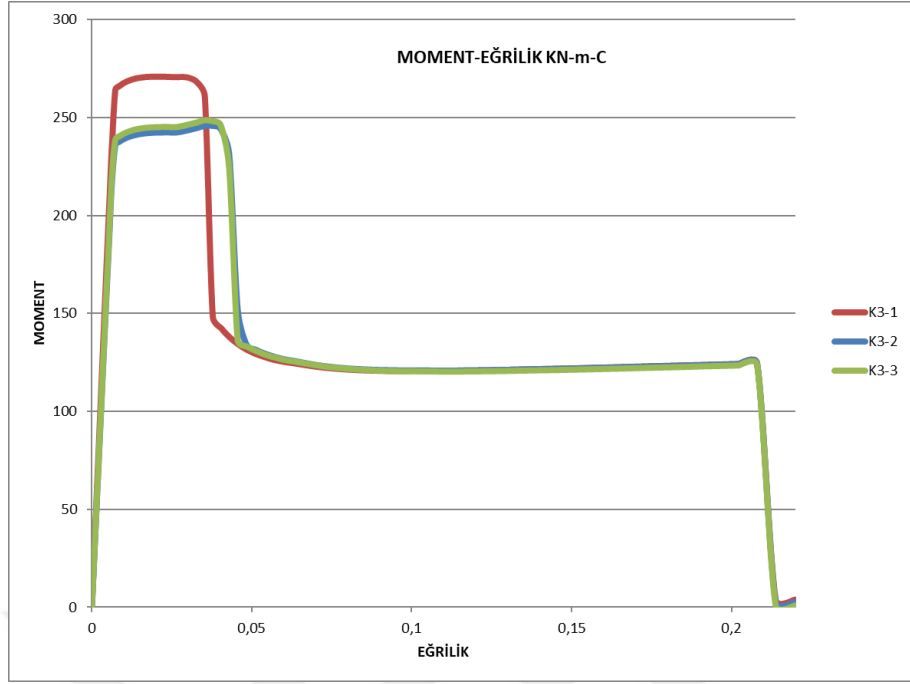


Şekil 4.20. K2 grubu teorik moment-eğrilik grafiği

Çizelge 4.5. K2 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi

	Kiriş	Maksimum Moment (kN)
K2	K2-1	264,7
	K2-2	237,9
	K2-3	240,5

K3 grubu deney numunelerine ait kiriş kesit analizi aşağıdaki Şekil 4.21’de sunulmuştur. K3-1 kesiti K3-2 kesitine göre %1,4 daha fazla donatı oranına sahipken, %10,2 daha fazla maksimum eğime momenti değerine ulaşmıştır. Yine K3-1 kesiti K3-3 kesitine göre %2,1 daha fazla donatı oranına sahipken, %8,7 daha fazla maksimum eğime momenti değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.6’da K3 grubunda yer alan kesitlere ait maksimum moment değerleri gösterilmiştir. Yapılan analize ve grafiğe göre K3-2 ve K3-3 kesitleri K3-1 kesitine göre daha büyük eğrilik değerinde, maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 4.21. K3 grubu teorik moment-eğrilik grafiği

Çizelge 4.6. K3 kiriş grubu maksimum moment çizelgesi

	Kiriş	Maksimum Moment (kN)
K3	K3-1	270,9
	K3-2	245,8
	K3-3	248,6

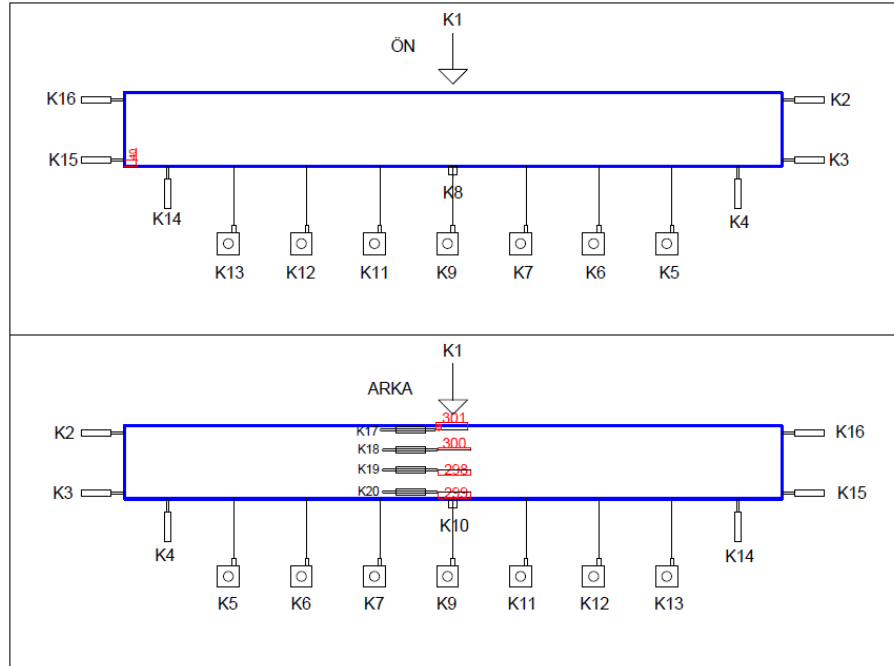
4.3. K1-1 Kirişi Deneyel Çalışmaları

K1-1 kirişi, 18.06.2022 tarihinde imalatı yapılmış olup, 02.08.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 29 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.22'de sunulmuştur.



Şekil 4.22. K1-1 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.23'te gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.23 K1-1 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.7’de belirtildiği üzere K1-1 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 2,5 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Orta nokta düşey deplasmanı 16,2 mm olduğunda çatlaklar basınç bölgesine doğru çatallanmaya başlamıştır. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 70 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 167 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Son olarak orta nokta deplasmanı 280 mm’ye ulaştığında çekme donatısı kopmuştur.

Çizelge 4.7. K1-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
2,5	İlk çatlak meydana geldi
16,2	Çatlaklarda çatallanma başladı
70	İlk yatay çatlak meydana geldi
167	Basınç donatısı burkuldu
280	Çekme donatısı koptu

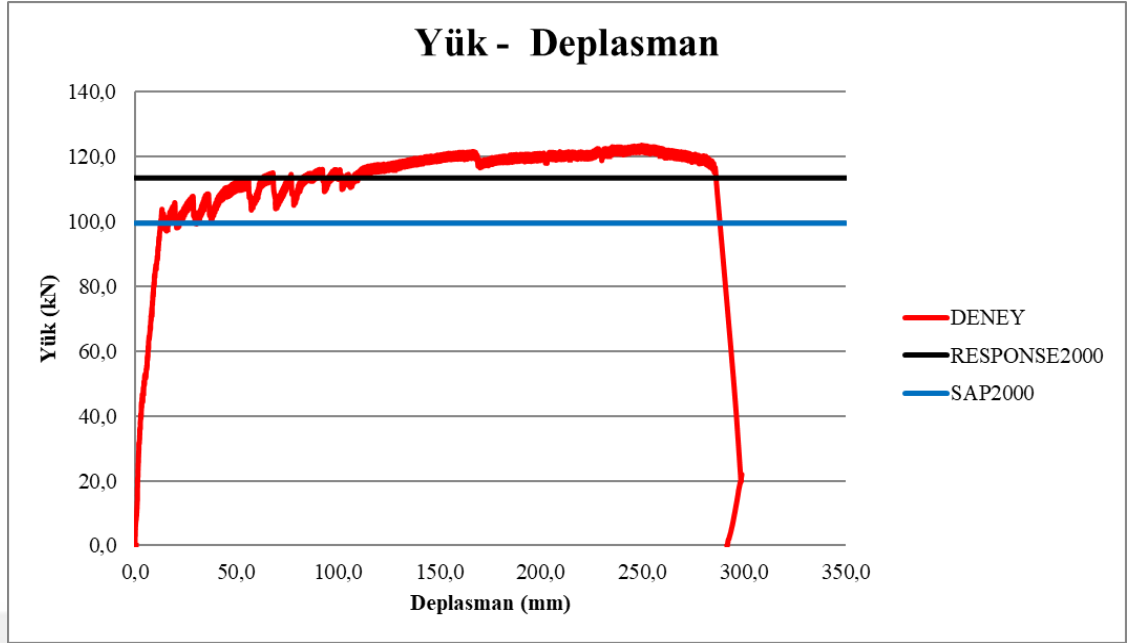
K1-1 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.24’te sunulmuştur. K1-1 kirişi 123,6 kN’luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 105,05 kN.m’lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.24. K1-1 numunesinin deney sonrası görünümü

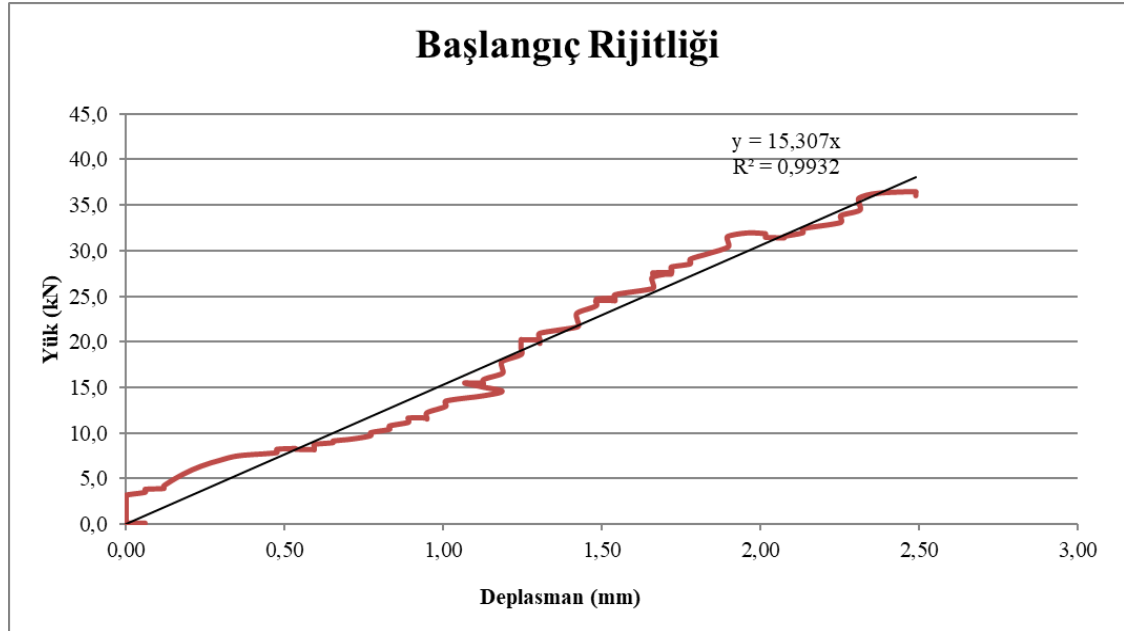
K1-1 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 2,5 mm'yi yük değeri ise 36,05 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.25'te görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



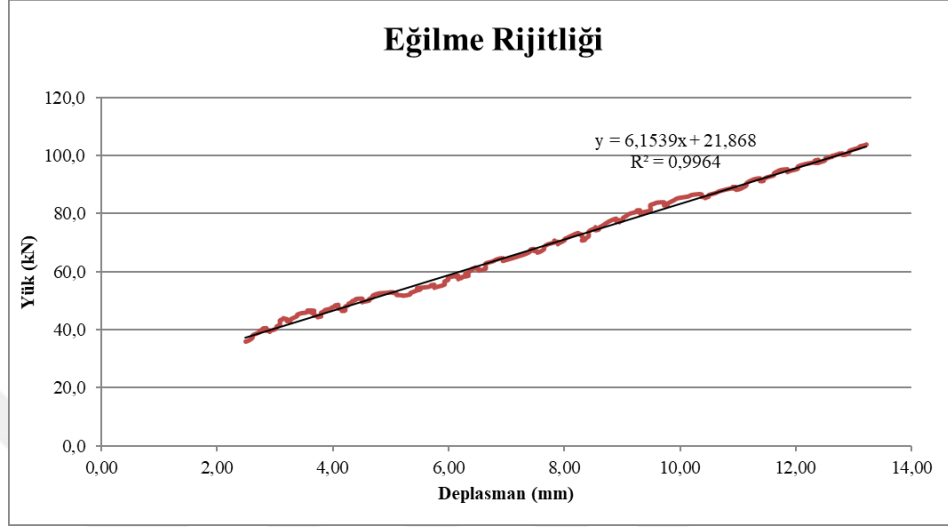
Şekil 4.25. K1-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K1-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 15,307x$ ” olarak bulunmuştur.



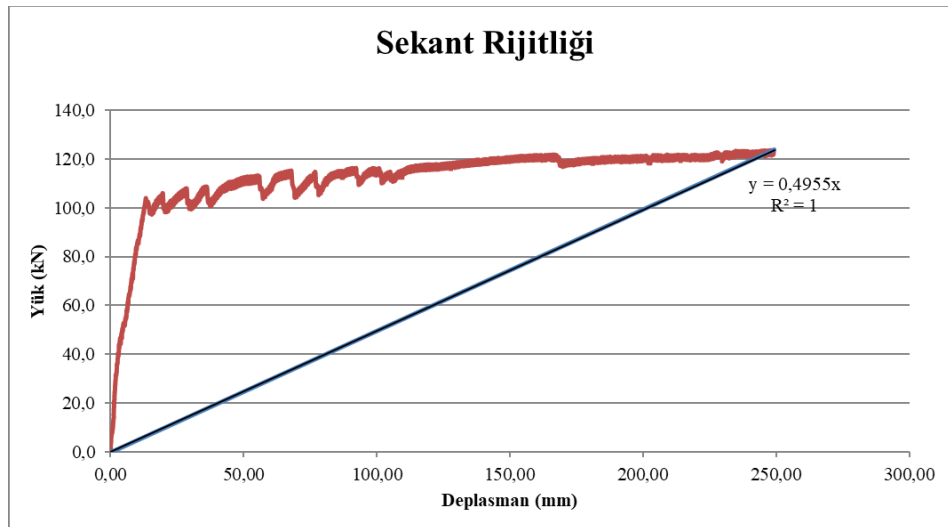
Şekil 4.26. K1-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K1-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 6,1539x + 21,868$ ” olarak bulunmuştur.



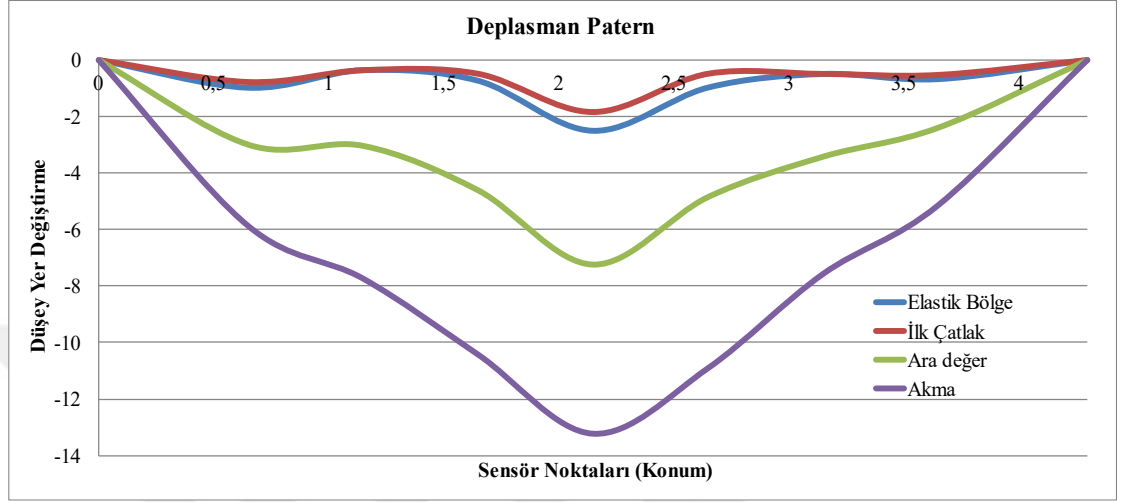
Şekil 4.27. K1-1 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K1-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 0,4955x$ ” olarak bulunmuştur.



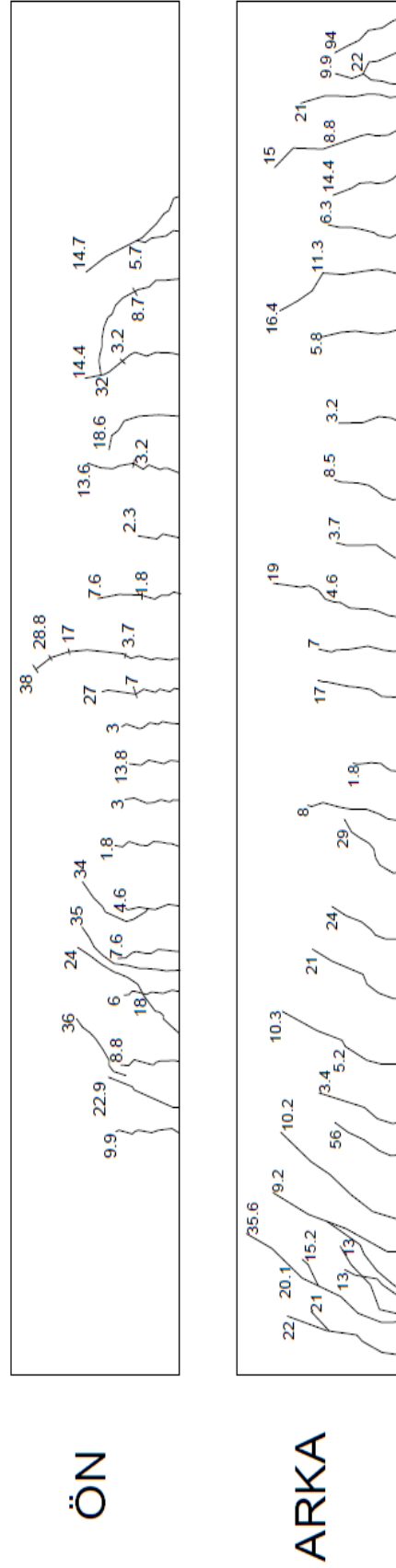
Şekil 4.28. K1-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K1-1 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.29’da gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.29. K1-1 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.30’da K1-1 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



Şekil 4.30. K1-1 numunesi çatlak deseni

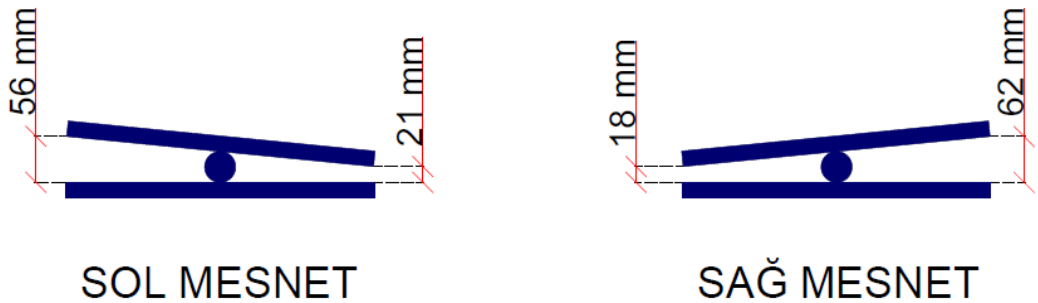
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Aşağıda yer alan Şekil 4.31’de K1-1 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.31. K1-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.32’de K1-1 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.32. K1-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu

K1-1 numunesinin deneyi sonlandırılırken belirli bir yükte durdurulmamış olup donatı kopma noktasına kadar deney devam ettirilmiştir. Önce akan ardından kopan çelik boyuna donatıların görüntüsü Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33. K1-1 numunesinde kopan çekme donatısına ait görüntü

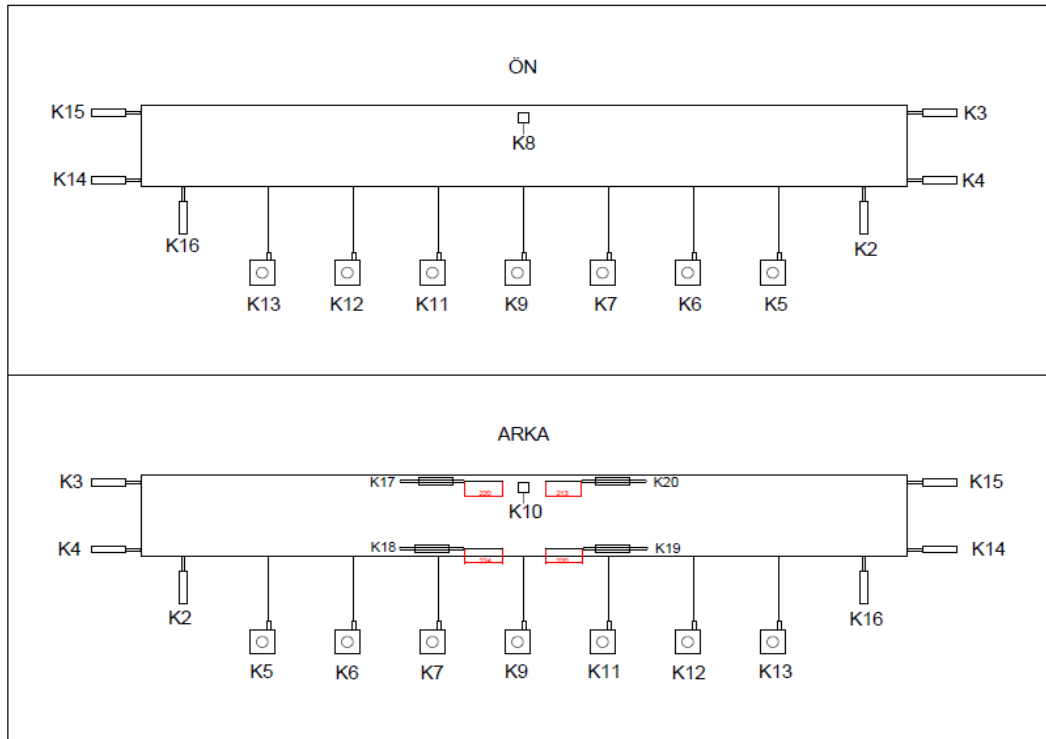
4.4. K1-2 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K1-2 kirişi, 18.06.2022 tarihinde imalatı yapılmış olup, 02.08.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lik boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 21 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.34'de sunulmuştur.



Şekil 4.34. K1-2 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.35'te gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.35. K1-2 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.8’de belirtildiği üzere K1-2 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 2.5 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Orta nokta düşey deplasmanı 16.2 mm olduğunda çatlaklar basınç bölgesine doğru çatallanmaya başlamıştır. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 70 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 167 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Son olarak orta nokta deplasmanı 280 mm’ye ulaştığında çekme donatısı kopmuştur.

Çizelge 4.8. K1-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
1,86	İlk çatlak meydana geldi
15,5	Çatlaklarda çatallanma başladı
80,48	İlk yatay çatlak meydana geldi
147,9	Basınç donatısı burkuldu

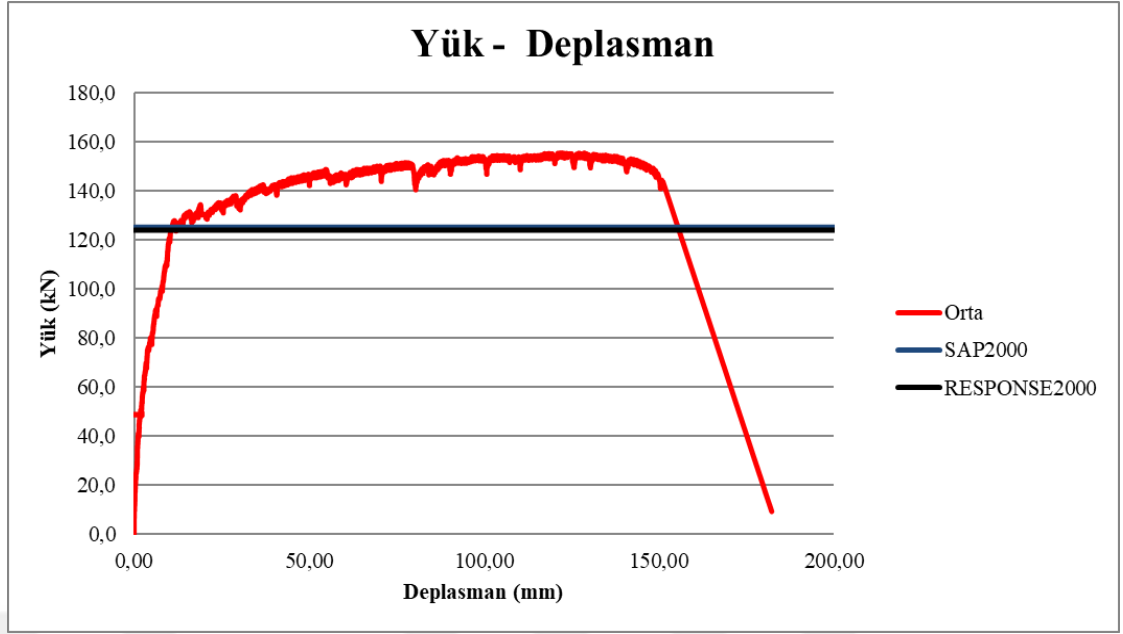
K1-2 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.36’da sunulmuştur. K1-2 kirişi 155,5 kN’luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 132,17 kN.m’lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.36. K1-2 numunesinin deney sonrası görünümü

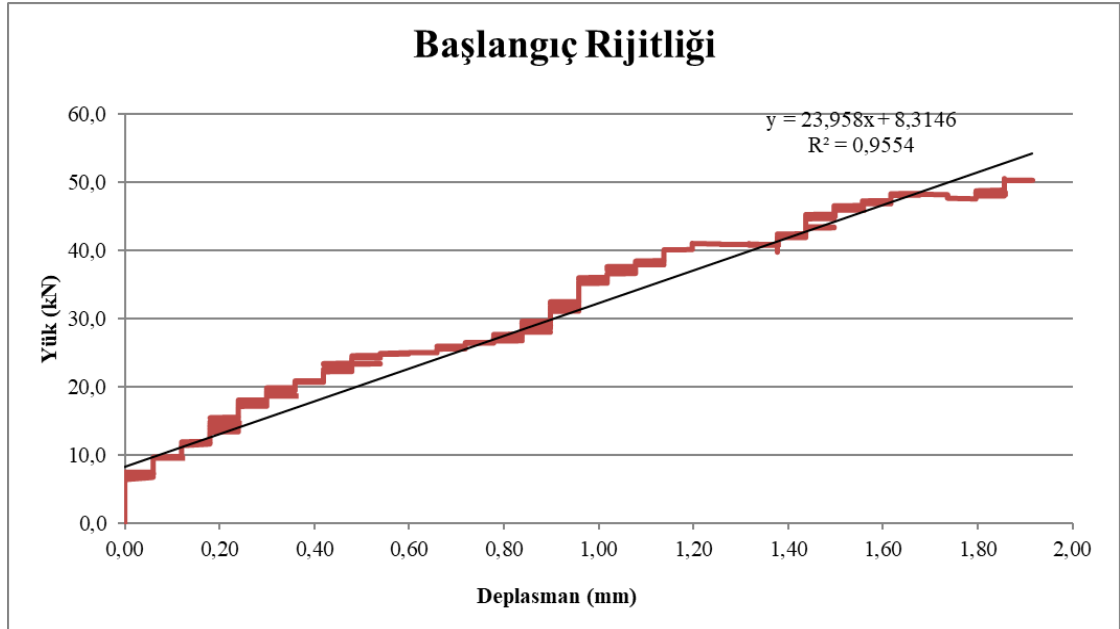
K1-2 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 1,9 mm'yi yük değeri ise 50,26 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.37'de görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



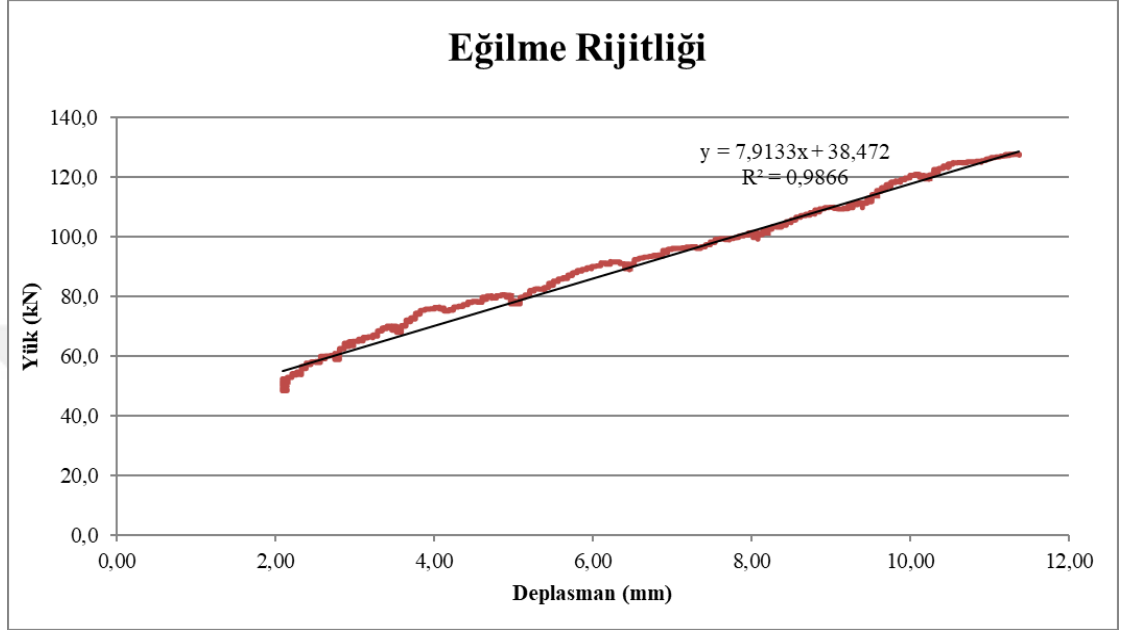
Şekil 4.37. K1-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K1-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 2,958x + 8,3146$ ” olarak bulunmuştur.



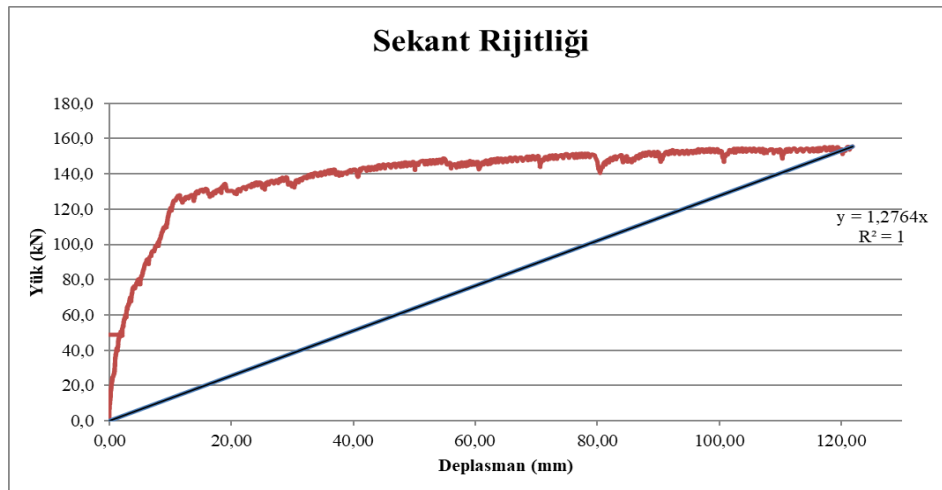
Şekil 4.38. K1-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K1-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.39’da gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 7,9133x + 38,472$ ” olarak bulunmuştur.



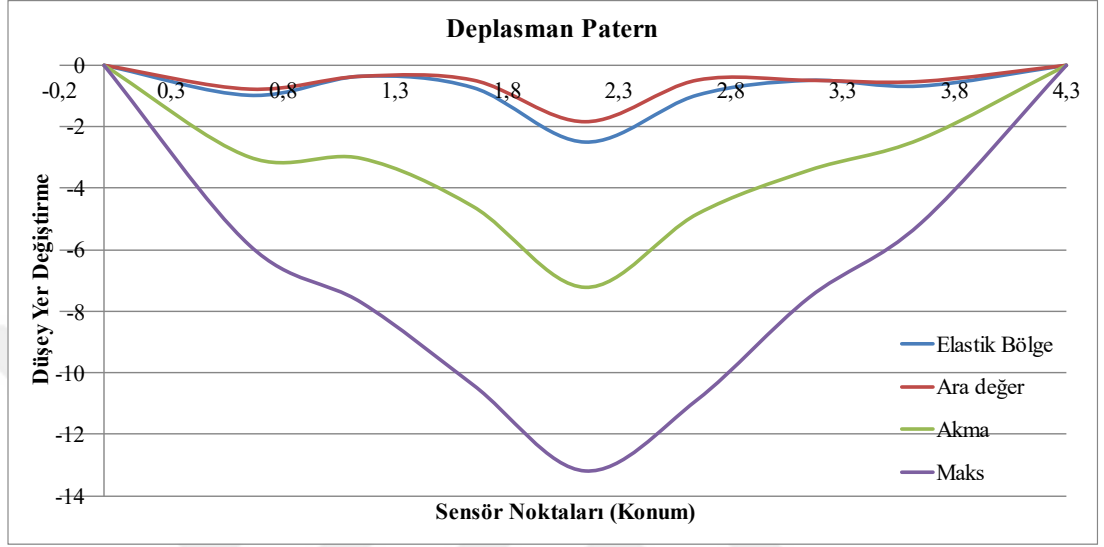
Şekil 4.39. K1-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K1-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.40’da gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 1,2764x$ ” olarak bulunmuştur.



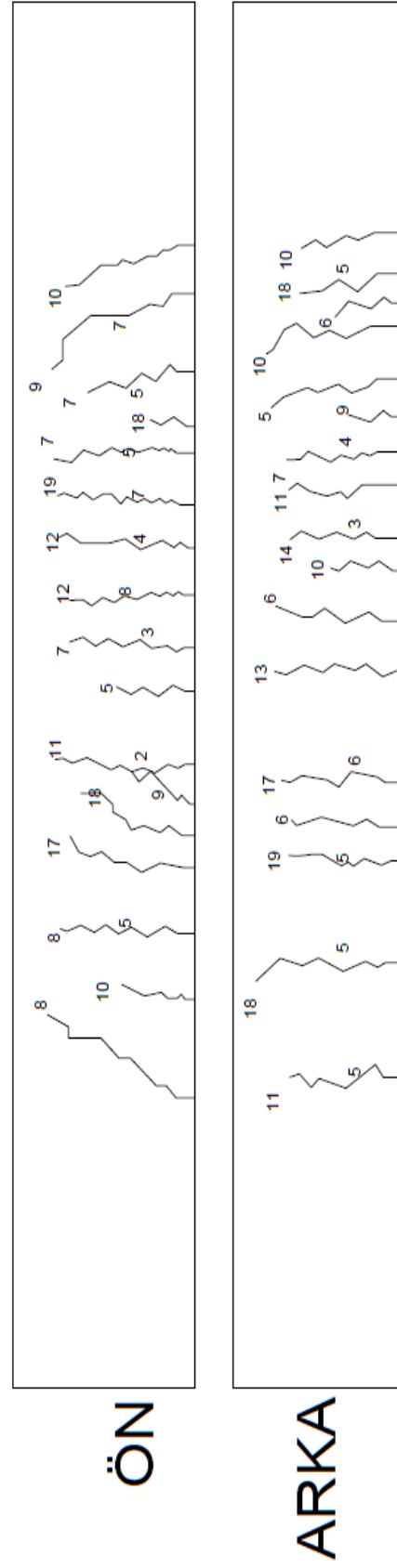
Şekil 4.40. K1-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K1-2 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.41’de gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



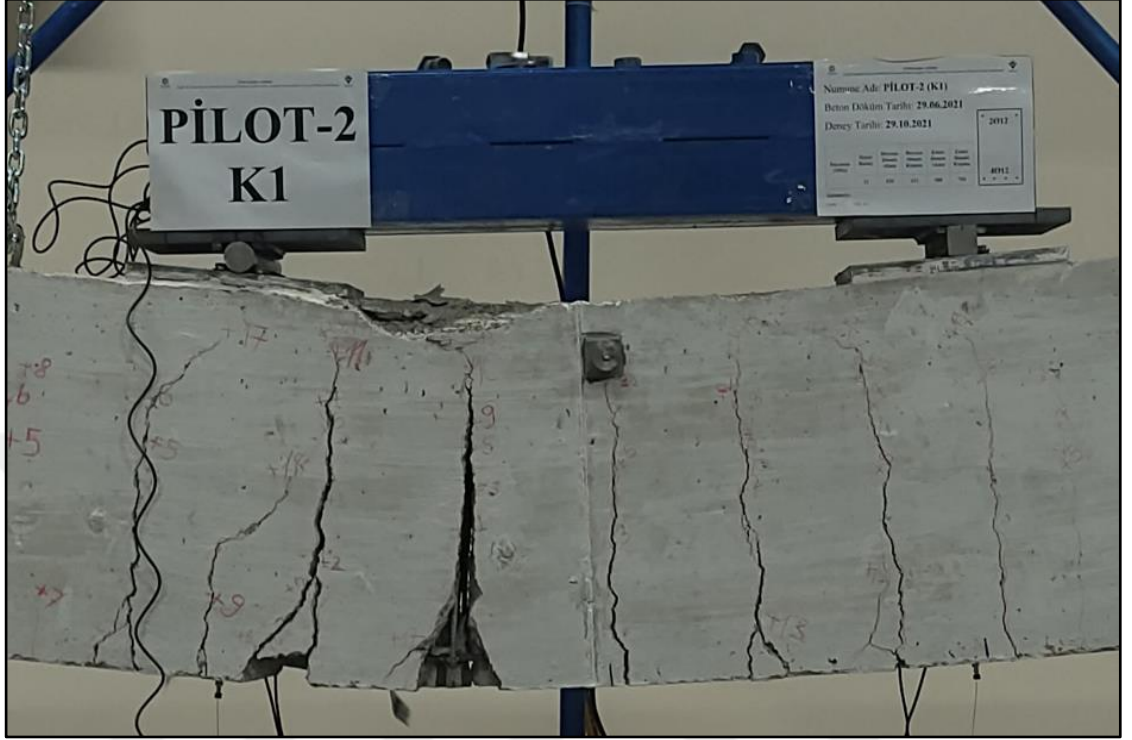
Şekil 4.41. K1-2 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.42’de K1-2 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak olduğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



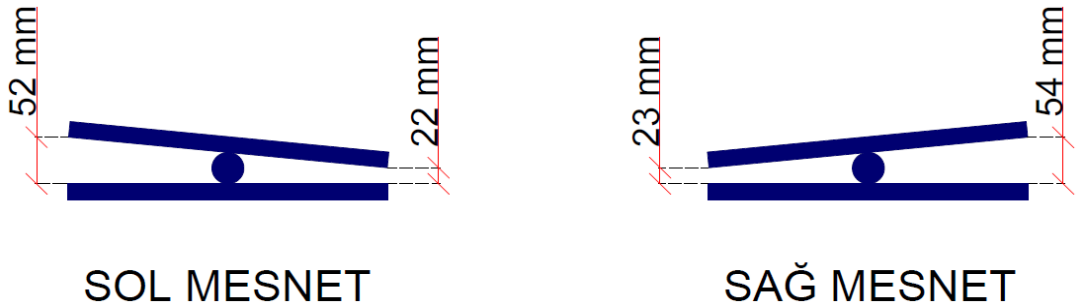
Şekil 4.42. K1-2 numunesi çatlak deseni

Aşağıda yer alan Şekil 4.43'te K1-2 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



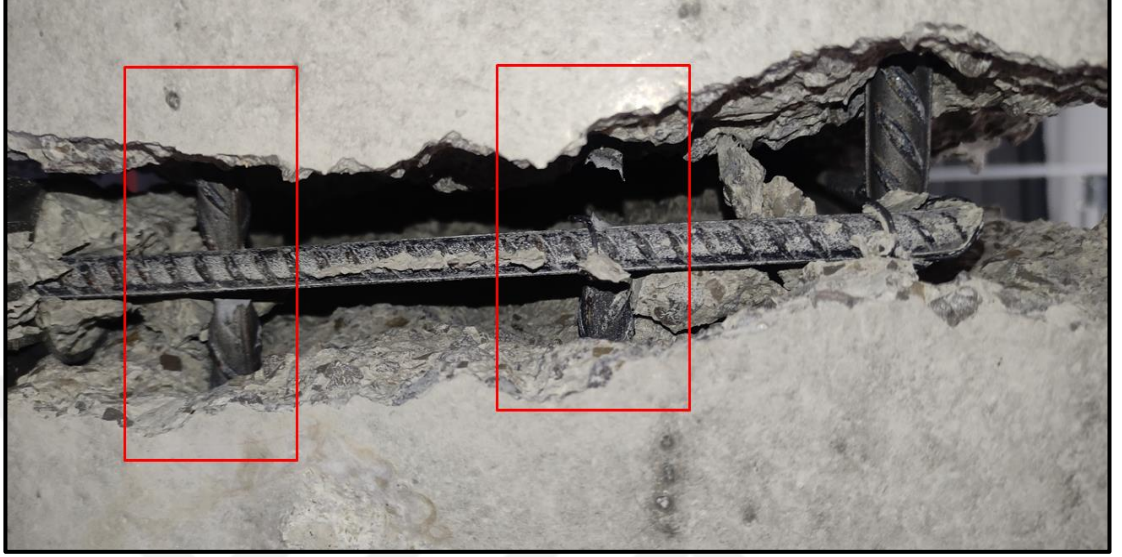
Şekil 4.43. K1-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.44'te K1-2 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.44. K1-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu

K1-2 numunesinin deneyi sonlandırılırken belirli bir yükte durdurulmamış olup donatı kopma noktasına kadar deney devam ettirilmiştir. Önce akan ardından kopan çelik boyuna donatıların görüntüsü Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.45. K2-1 numunesinin çekme donatısı akma (incelme) bölgesine ait görüntü

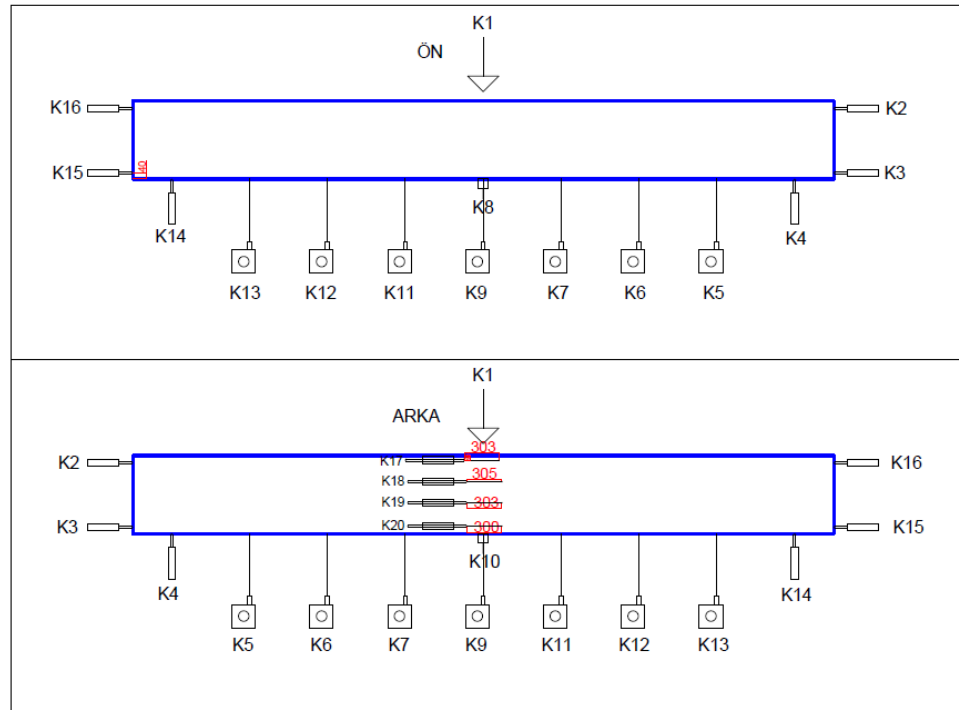
4.5. K2-1 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K2-1 kirişi, 18.06.2022 tarihinde imalatı yapılmış olup, 03.08.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 28 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.46'da sunulmuştur.



Şekil 4.46. K2-1 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.47'de gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.47. K2-1 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.9’da belirtildiği üzere K2-1 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 4 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Orta nokta düşey deplasmanı 28 mm olduğunda çatlaklar basınç bölgesine doğru çatallanmaya başlamıştır. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 31 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 65 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur.

Çizelge 4.9. K2-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
4	İlk çatlak meydana geldi
28	Çatlaklarda çatallanma başladı
31	İlk yatay çatlak meydana geldi
45	Beton kabuk attı
65	Basınç donatısı burkuldu
280	Deney sonu

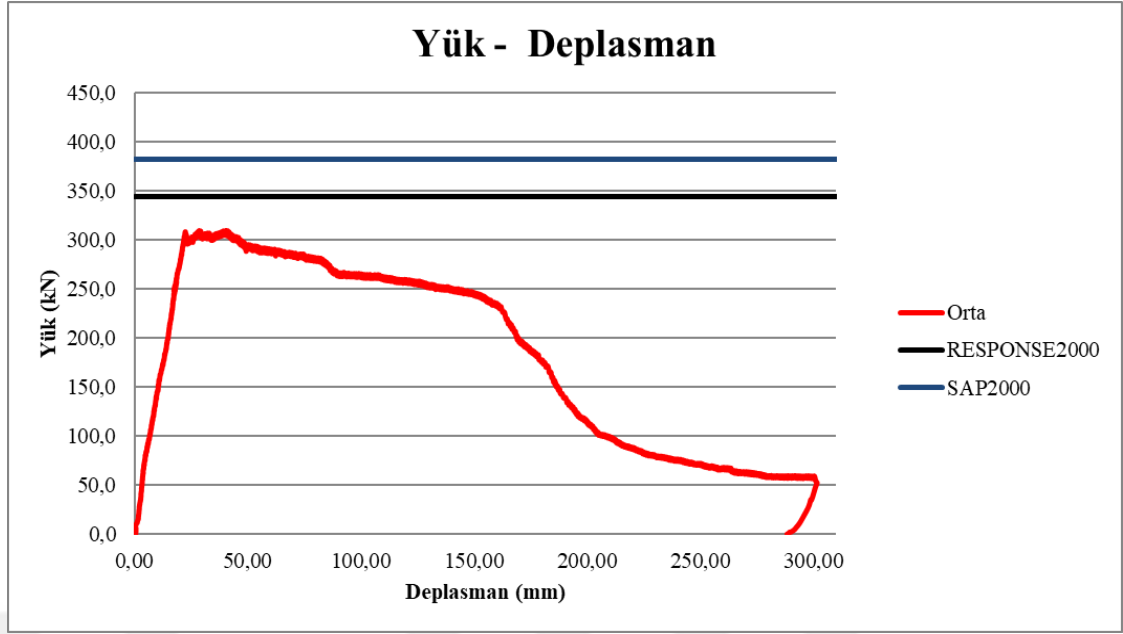
K2-1 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.48’de sunulmuştur. K2-1 kirişi 309,8 kN’luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 263,3 kN.m’lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.48. K2-1 numunesinin deney sonrası görünümü

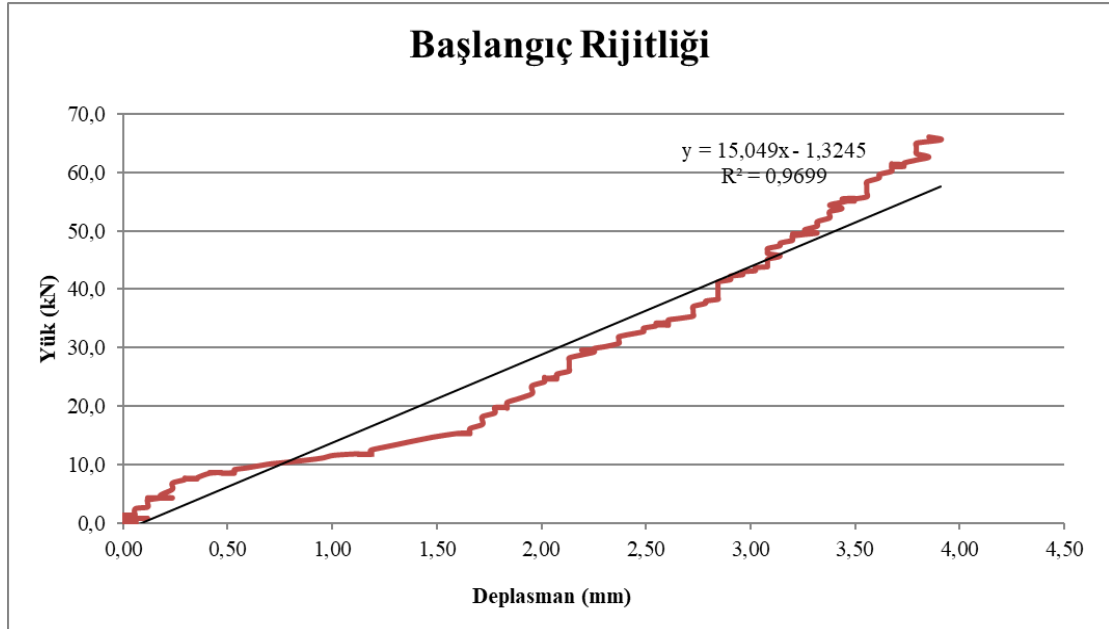
K2-1 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 3,85 mm'yi yük değeri ise 66,1 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.49'da görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



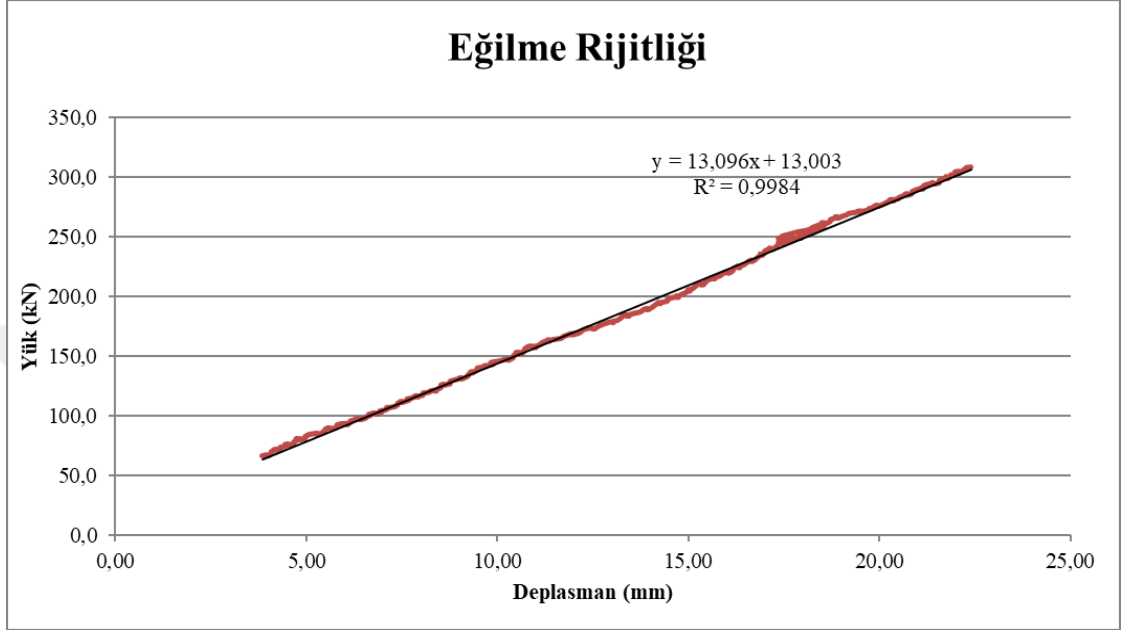
Şekil 4.49. K2-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K2-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 15,049x - 1,3245$ ” olarak bulunmuştur.



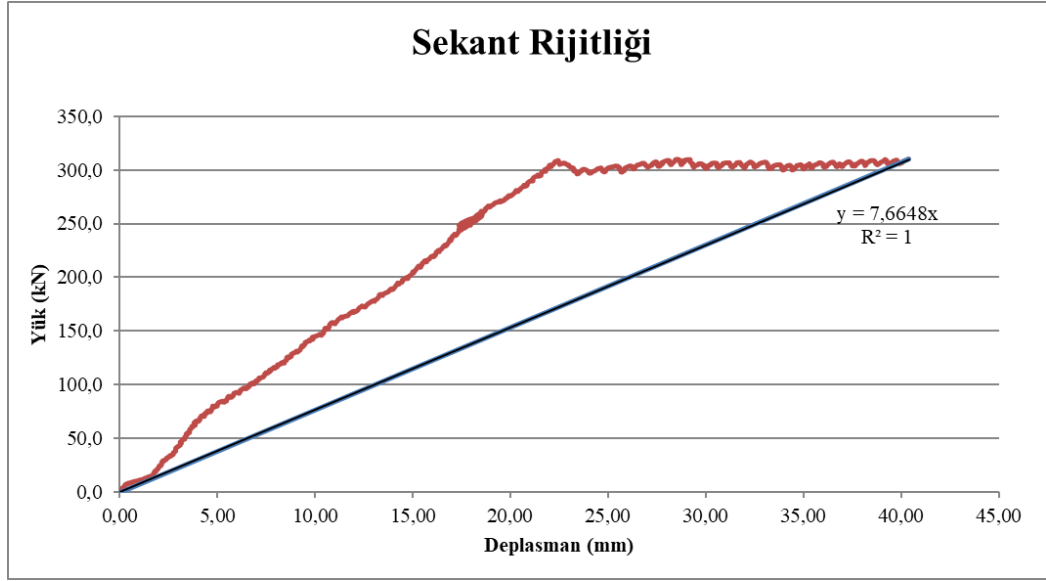
Şekil 4.50. K2-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K2-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 13,096x + 13,003$ ” olarak bulunmuştur.



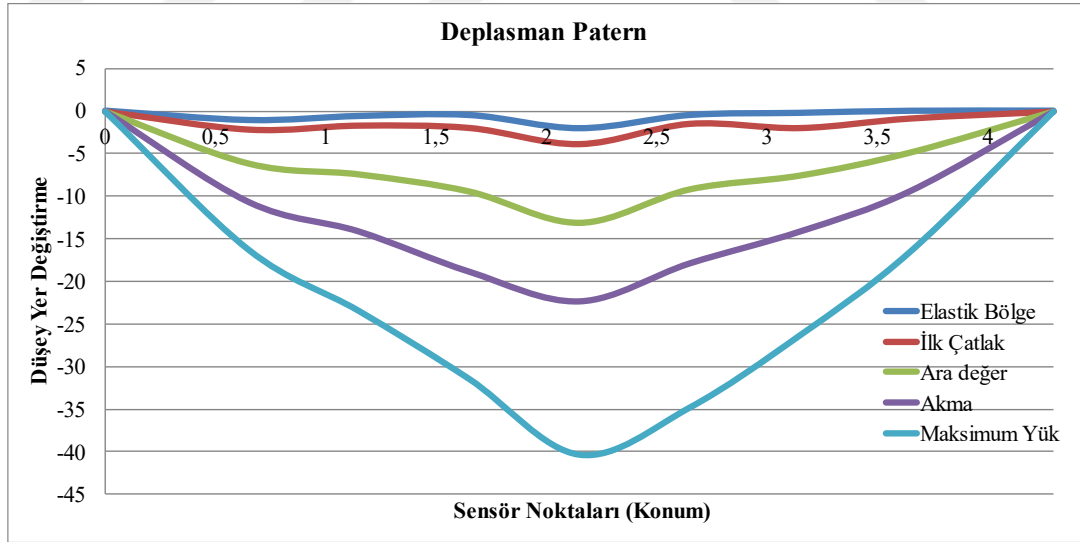
Şekil 4.51. K1-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K2-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.52’de gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 7,6648x$ ” olarak bulunmuştur.



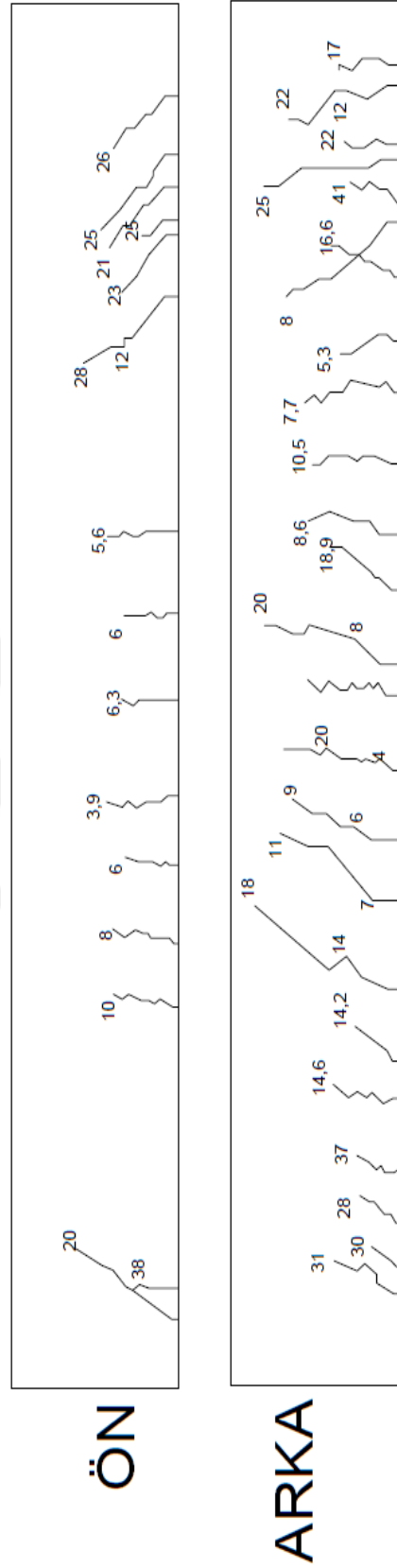
Şekil 4.52. K2-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K2-1 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.53'te gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.53. K2-1 numunesi deplasman paterni

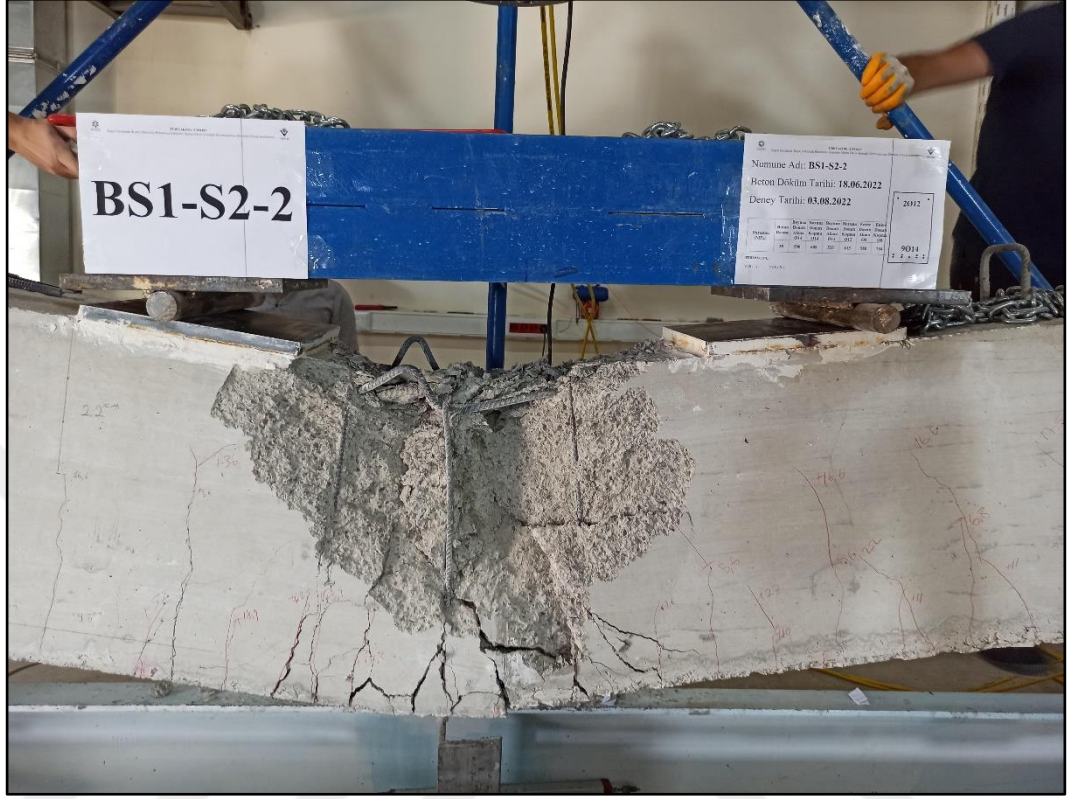
Şekil 4.54'te K2-1 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



Şekil 4.54. K2-1 numunesi çatlak deseni

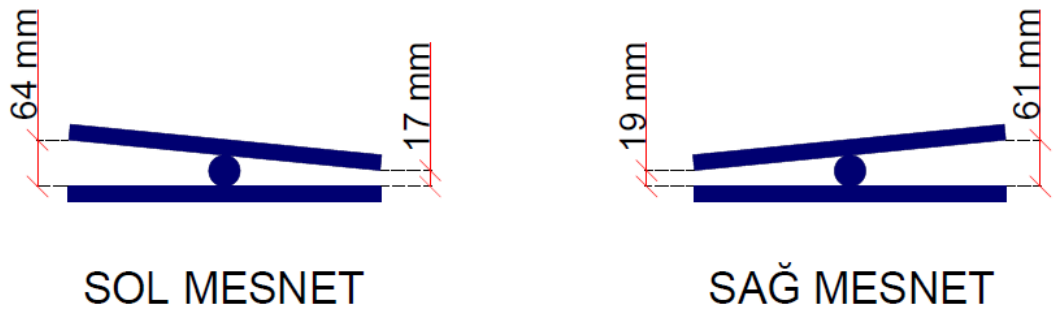
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Aşağıda yer alan Şekil 4.55'te K2-1 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.55. K2-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

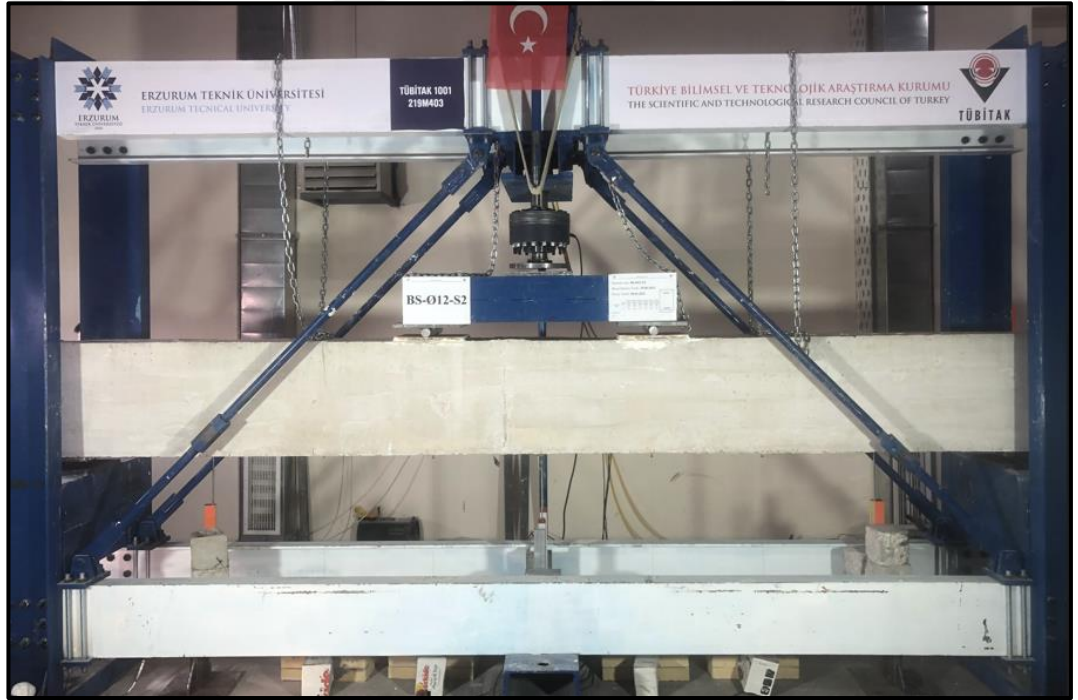
Aşağıda yer alan Şekil 4.56'da K2-1 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.56. K2-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu

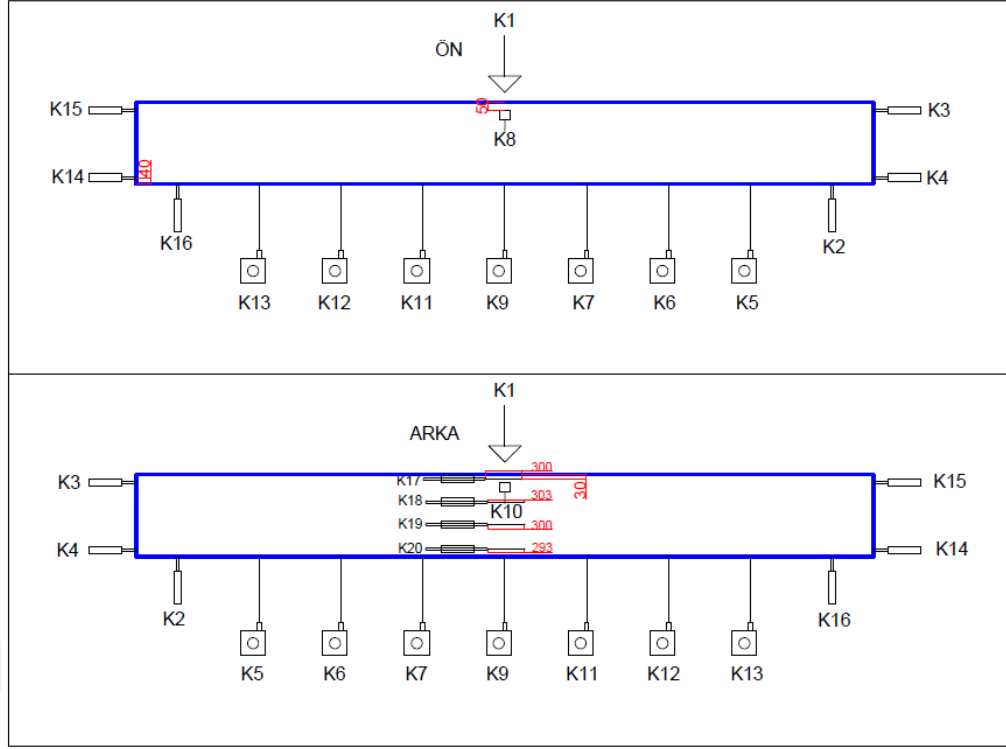
4.6. K2-2 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K2-2 kirişi, 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılmış olup, 06.01.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 24 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.57'de sunulmuştur.



Şekil 4.57. K2-2 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.58'de gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.58. K2-2 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.10'da belirtildiği üzere K2-2 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 1,8 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 38 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 47,7 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Orta nokta deplasmanı 72 mm'ye ulaştığında basınç bölgesinde beton kabuk atmıştır. Ve son olarak deplasman 98 mm'deyken beton ezilmeye başlamıştır.

Çizelge 4.10. K2-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
1,8	İlk çatlak meydana geldi
38	İlk yatay çatlak meydana geldi
47,7	Basınç donatısı burkuldu
72	Basınç bölgesinde beton kabuk attı
98	Beton ezildi

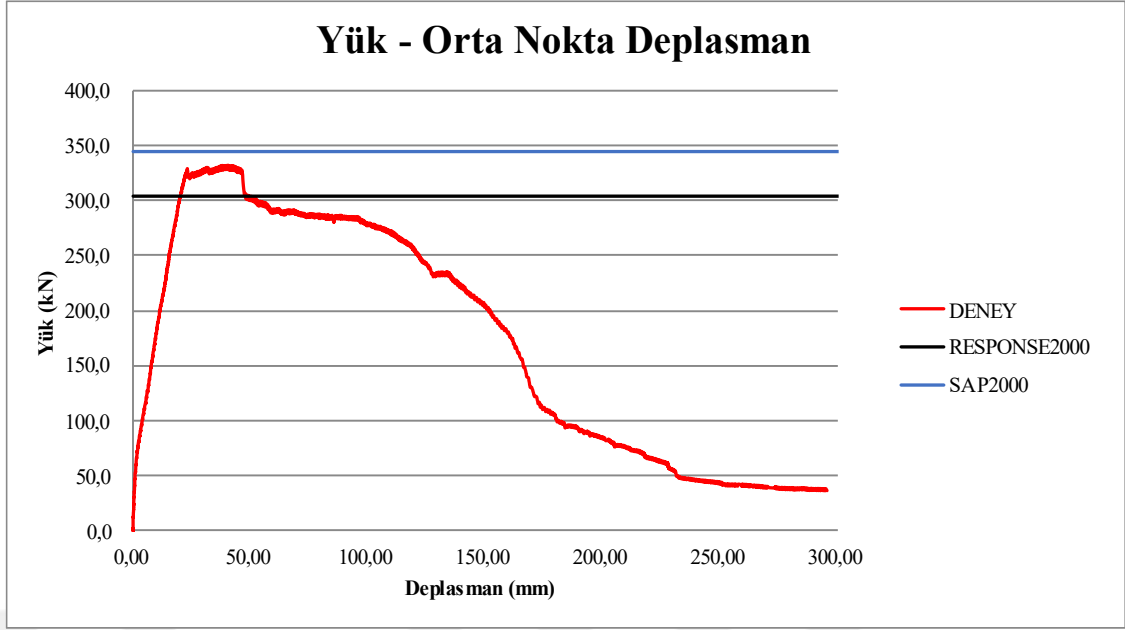
K2-2 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 59’da sunulmuştur. K2-2 kirişi 332,2 kN’luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 282,32 kN.m’lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.59. K2-2 numunesinin deney sonrası görünümü

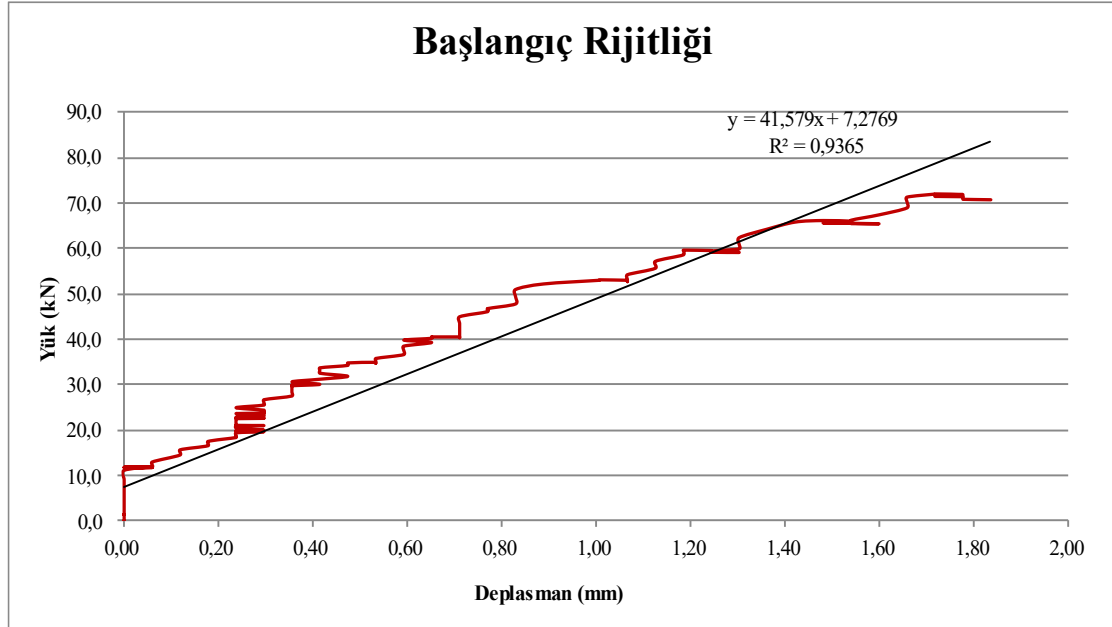
K2-2 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 1,84 mm’yi yük değeri ise 70,8 kN’u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.60’ta görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



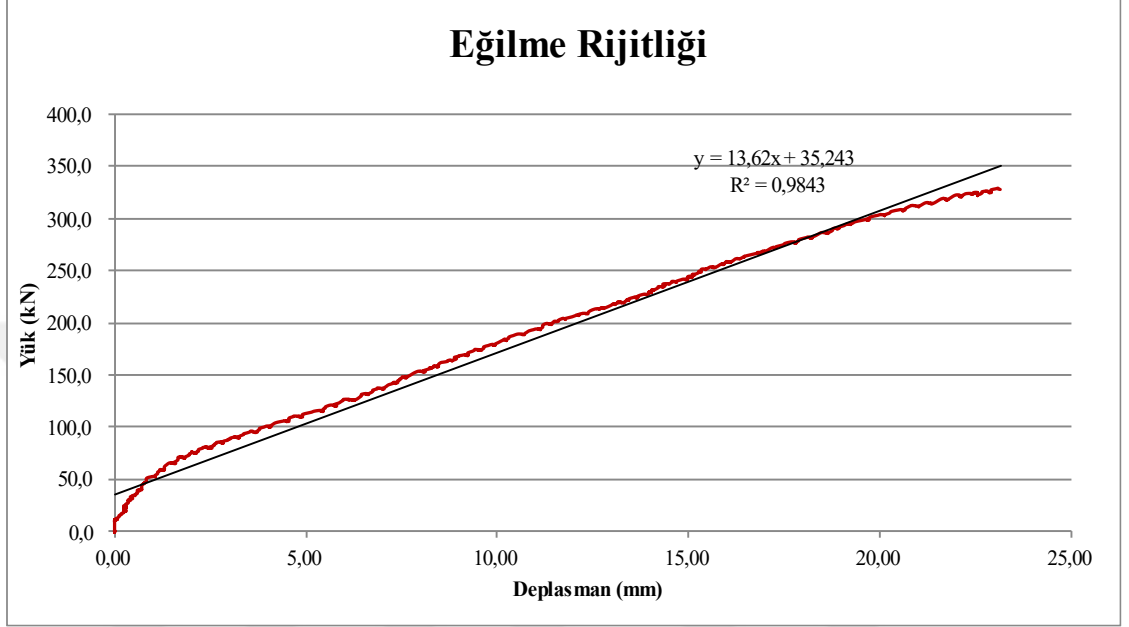
Şekil 4.60. K2-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K2-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 41,579x + 7,2769$ ” olarak bulunmuştur.



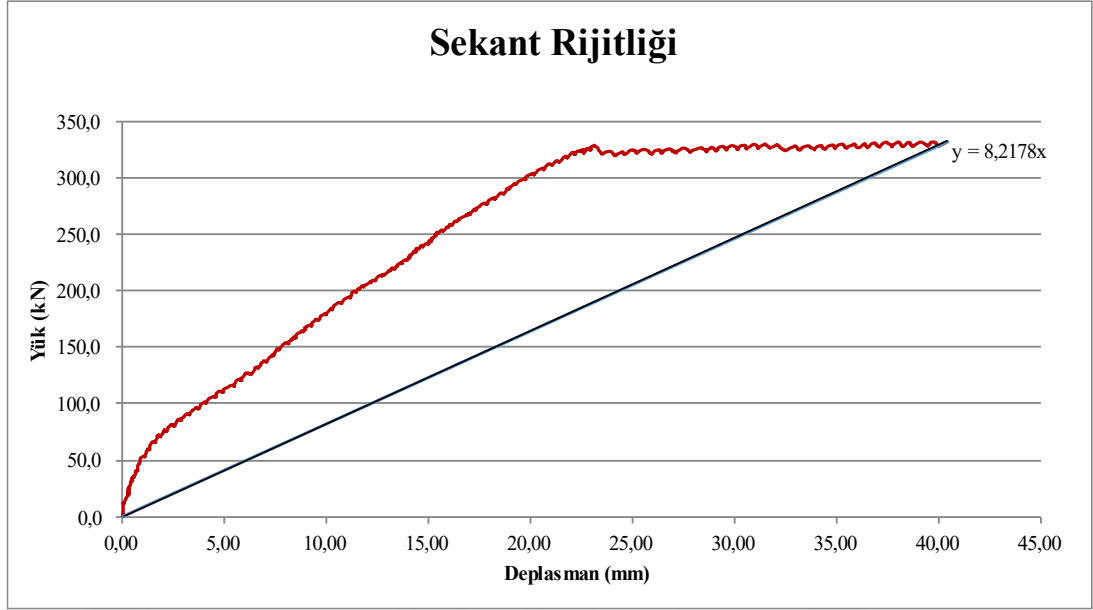
Şekil 4.61. K2-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K2-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 13,62x + 35,243$ ” olarak bulunmuştur.



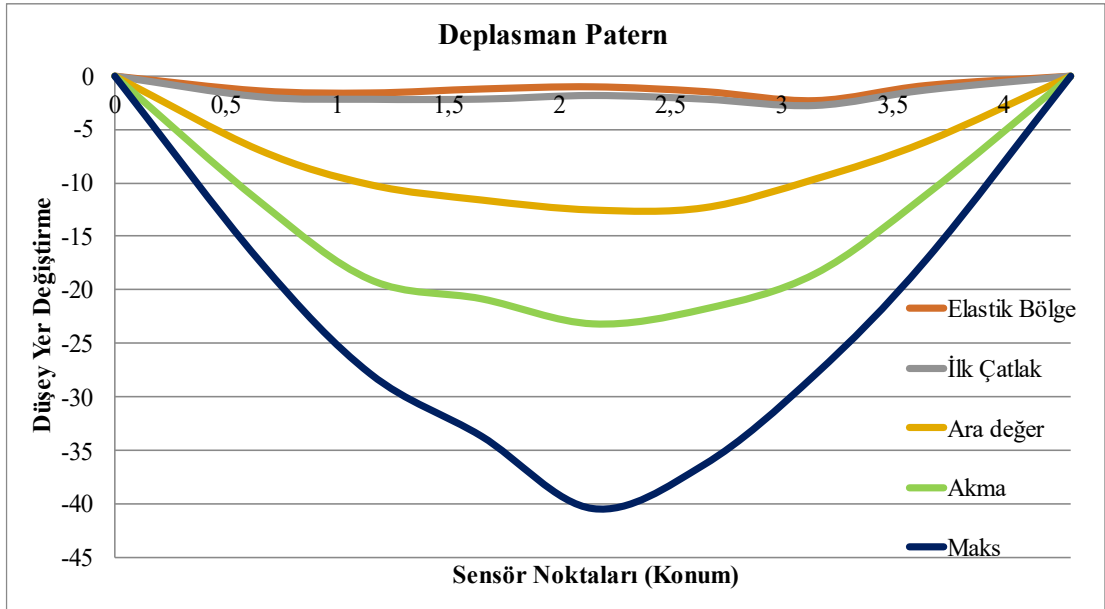
Şekil 4.62. K2-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K2-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.63’te gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 8,2178x$ ” olarak bulunmuştur.



Şekil 4.63. K2-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi

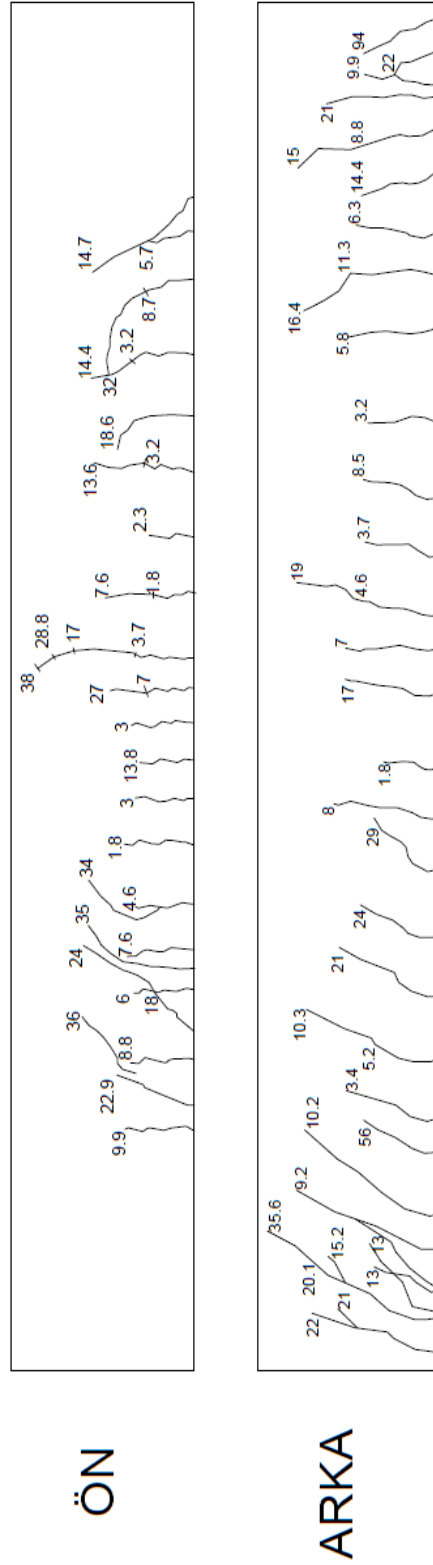
K2-2 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.64'te gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.64. K2-2 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.65'te K2-2 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların

yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



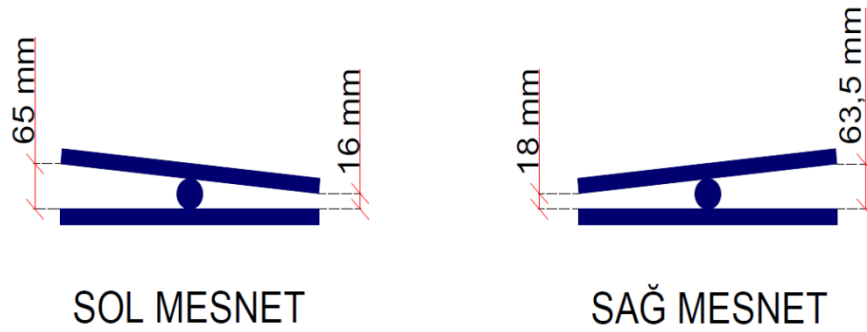
Şekil 4.65. K2-2 numunesi çatlak deseni

Aşağıda yer alan Şekil 4.66'da K2-2 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.66. K2-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.67'de K2-2 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Şekil 4.68'de ise bu çizime ait gerçek görüntü gösterilmiştir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.67. K2-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu



Şekil 4.68. K2-2 numunesinin mesnetlerinde deney sonunda ortaya çıkan görüntü

K2-2 numunesinin deney sonunda maksimum moment bölgesine ait görüntü Şekil 4.69’da gösterilmektedir. Görselde boyuna donatıların, akma bölgesinde meydana gelen çap incelmesi gözle görünür hale gelmiştir.



Şekil 4.69. K2-2 numunesi donatı akma bölgesi

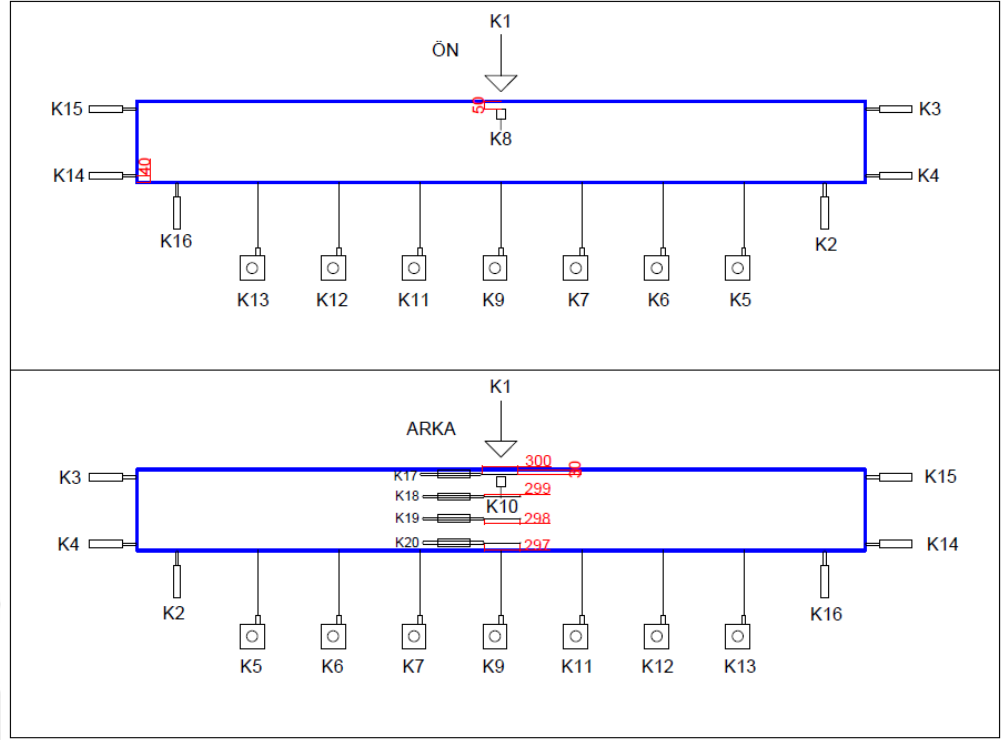
4.7. K2-3 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K2-3 kirişi, 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılmış olup, 07.01.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 24 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.70'te sunulmuştur.



Şekil 4.70. K2-3 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.71'de gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.71. K2-3 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.11’de belirtildiği üzere K2-3 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 1,5 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 28 mm düşey deplasmana ulaştığında meydana gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 48 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Orta nokta deplasmanı 150 mm’ye ulaştığında beton ezilmeye başlamıştır.

Çizelge 4.11. K2-3 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
1,5	İlk çatlak meydana geldi
28	İlk yatay çatlak meydana geldi
48	Basınç donatısı burkuldu
150	Basınç bölgesinde beton ezilmesi başladı

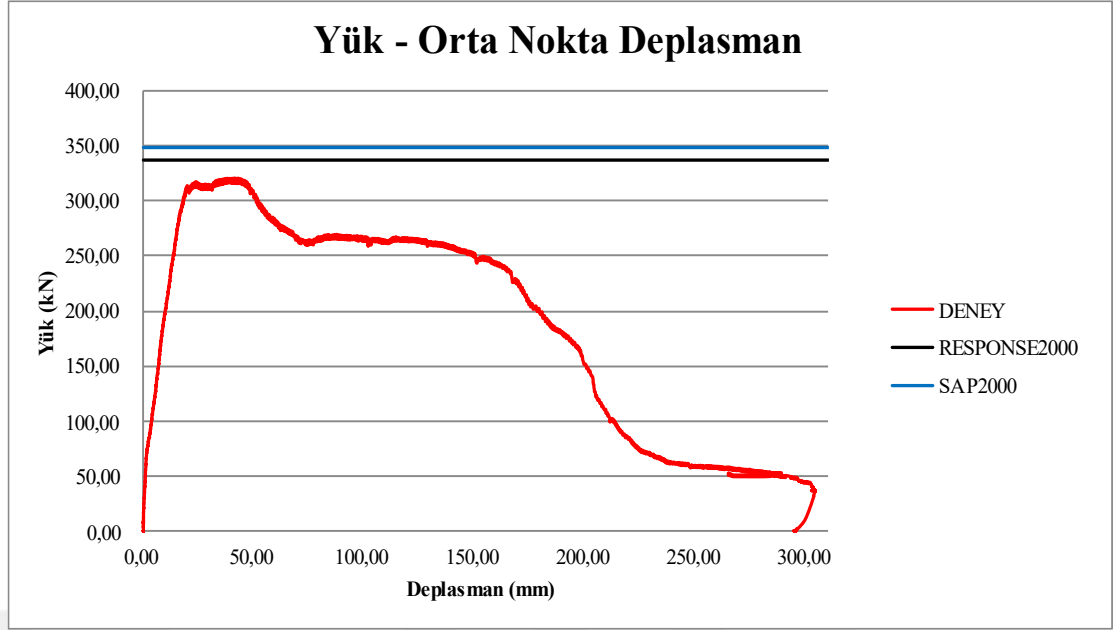
K2-3 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.72’de sunulmuştur. K2-3 kirişi 320,6 kN’luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 272,51 kN.m’lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.72. K2-3 numunesinin deney sonrası görünümü

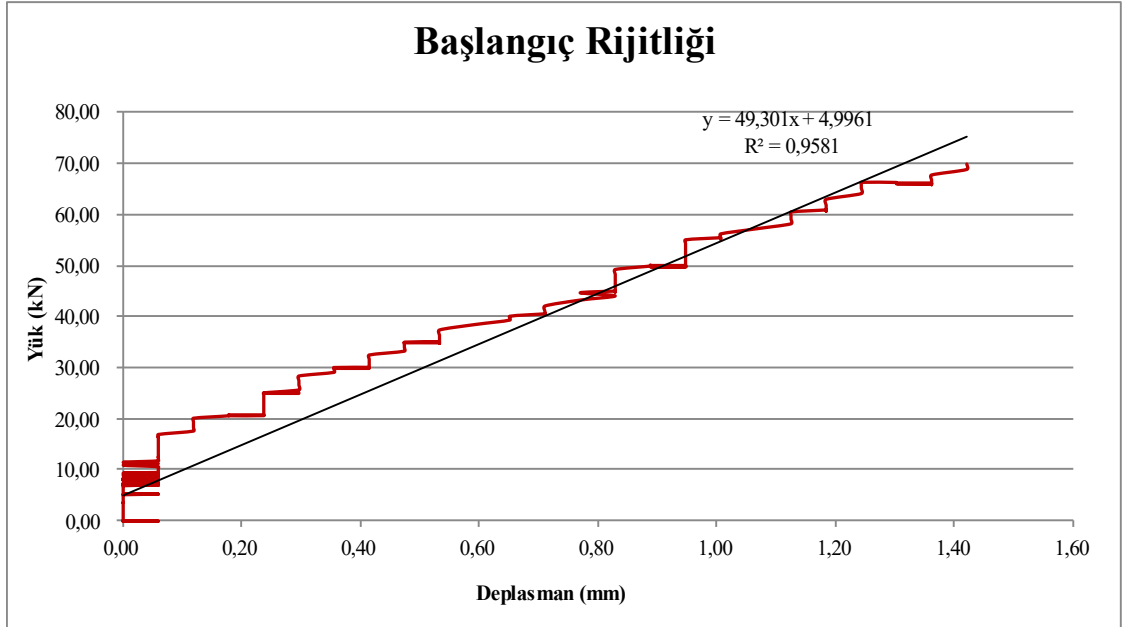
K2-3 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 1,42 mm’yi yük değeri ise 69,7 kN’u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.73’te görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



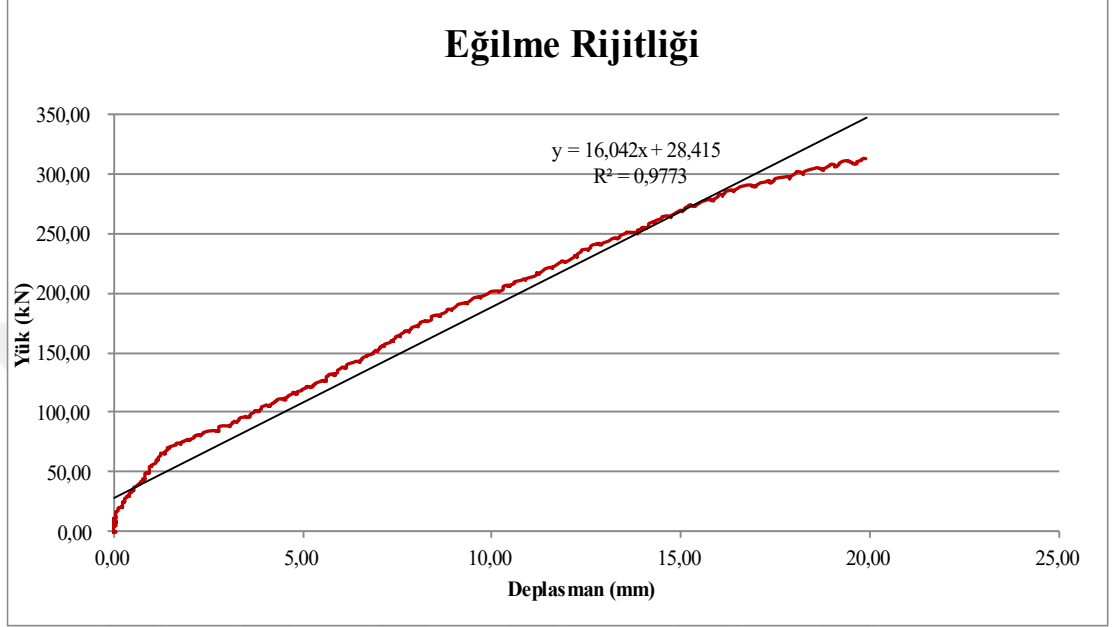
Şekil 4.73. K2-3 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K2-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.74'te gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 49,301x + 4,9961$ ” olarak bulunmuştur.



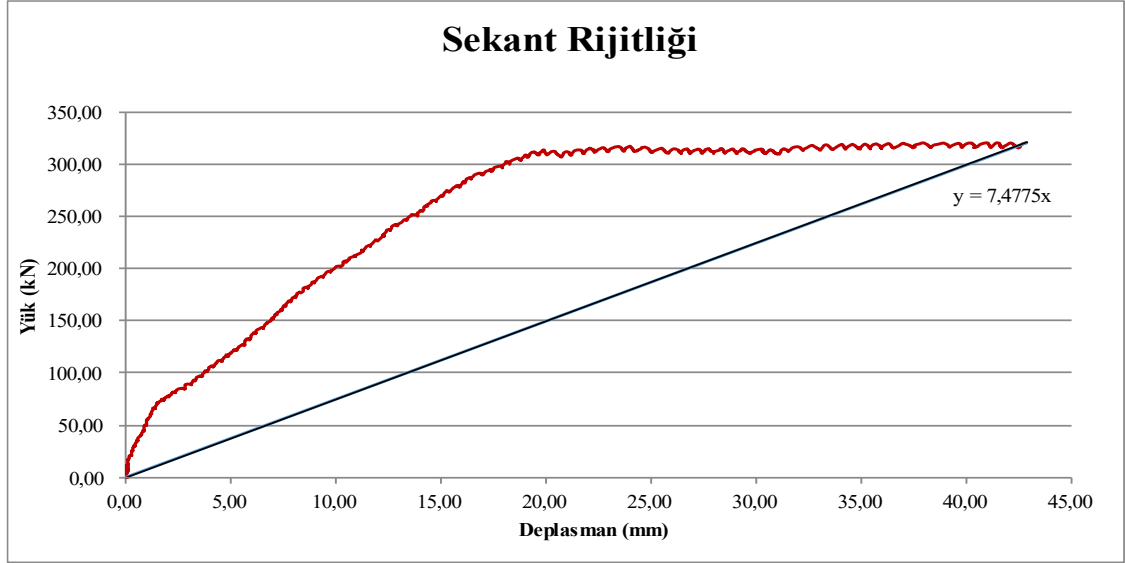
Şekil 4.74. K2-3 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K2-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.75'te gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 16,042x + 28,415$ ” olarak bulunmuştur.



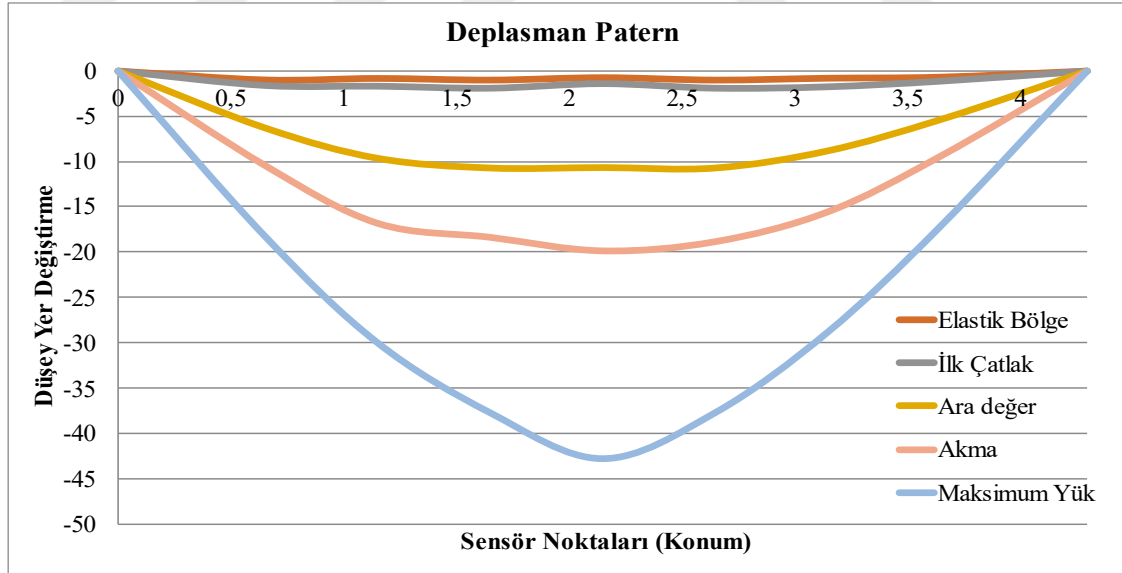
Şekil 4.75. K2-3 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K2-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.76'da gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 7,4775x$ ” olarak bulunmuştur.



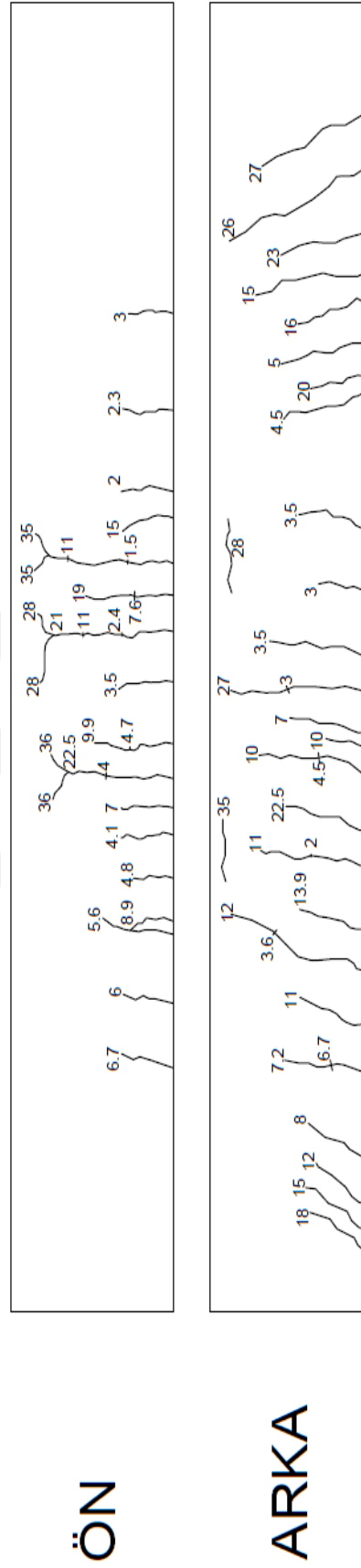
Şekil 4.76. K2-3 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K2-3 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.77’de gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.77. K2-3 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.78’de K2-3 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



Şekil 4.78. K2-3 numunesi çatlak deseni

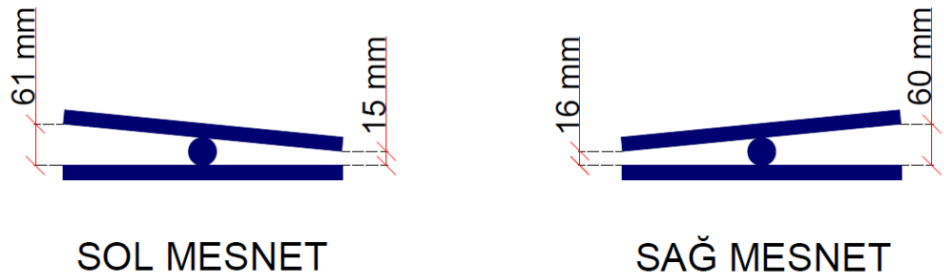
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Aşağıda yer alan Şekil 4.79’da K2-3 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.79. K2-3 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.80’de K2-3 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.80. K2-3 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu

Şekil 4.81’de sol tarafta K16 sensörünün başlangıç konumu, sağ tarafta ise deney sonundaki konumu görülmektedir.



Şekil 4.81. K2-3 numunesine ait çubuk sensörlerin deney başlangıcı ve deney sonu görüntüsü.

K2-3 numunesinin deney sonunda maksimum moment bölgesine ait görüntü Şekil 4.82’de gösterilmektedir. Görselde boyuna donatıların, akma bölgesinde meydana gelen çap incelmesi gözle görünür hale gelmiştir.



Şekil 4.82. K2-3 numunesi, çekme donatısının akma bölgesi

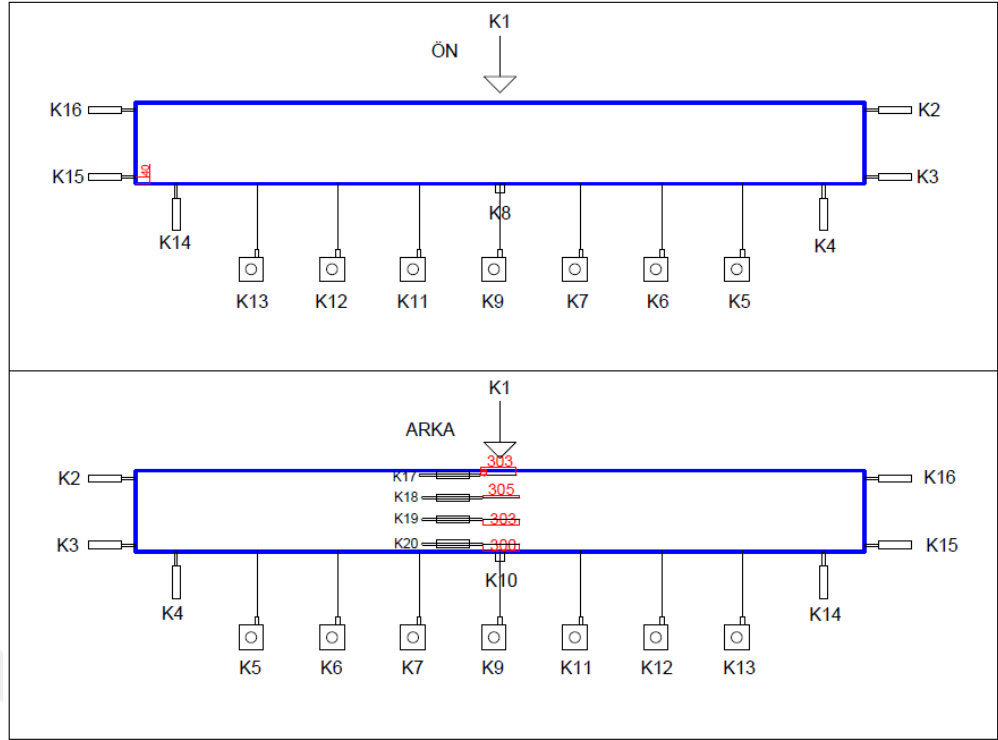
4.8. K3-1 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K3-1 kirişi, 18.06.2022 tarihinde imalatı yapılmış olup, 05.08.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 29 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.83'te sunulmuştur.



Şekil 4.83. K3-1 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.84'te gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.84. K3-1 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.12’de belirtildiği üzere K3-1 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 4 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 52 mm düşey deplasmana ulaştığında meydana gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 106 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Orta nokta deplasmanı 184 mm’ye ulaştığında sargı donatısı boyuna donatıdan sıyrılmıştır.

Çizelge 4.12. K3-1 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
4	İlk çatlak meydana geldi
24,8	Çatlaklarda çatallanma başladı
52	İlk yatay çatlak meydan ageldi
106	Basınç donatısı burkuldu
184	Sargı donatısı boyuna donatıdan sıyrıldı

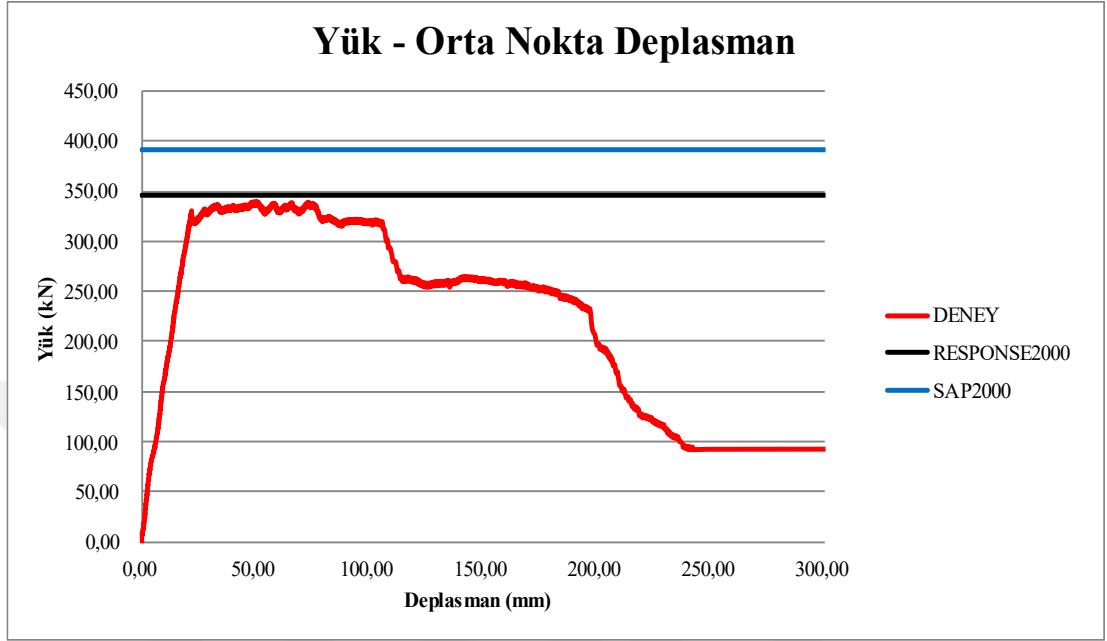
K3-1 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 85'te sunulmuştur. K3-1 kirişi 339,54 kN'luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 288,61 kN.m'lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.85. K3-1 numunesinin deney sonrası görünümü

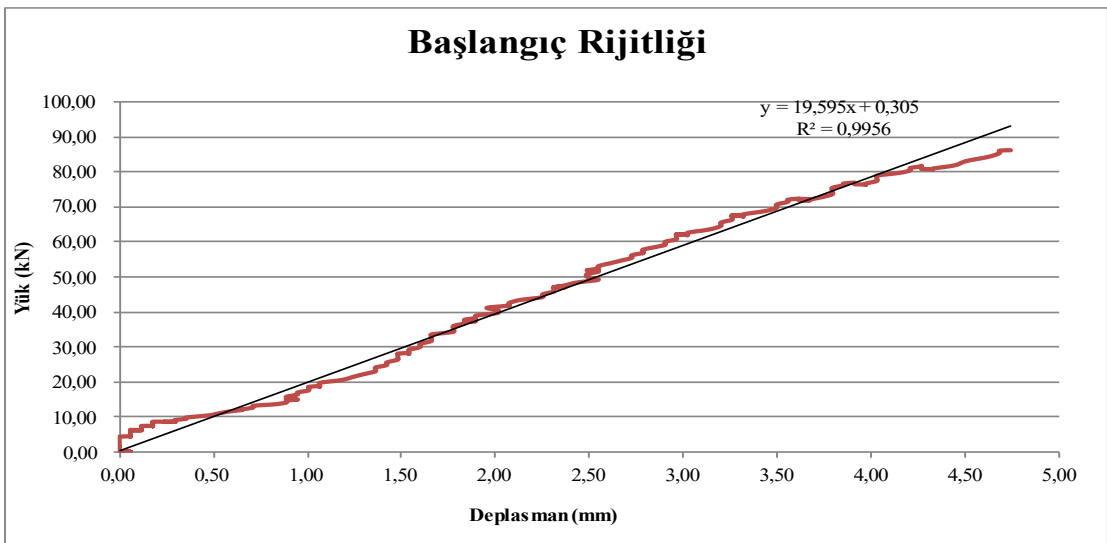
K3-1 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 4,74 mm'yi yük değeri ise 86,24 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.86’da görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



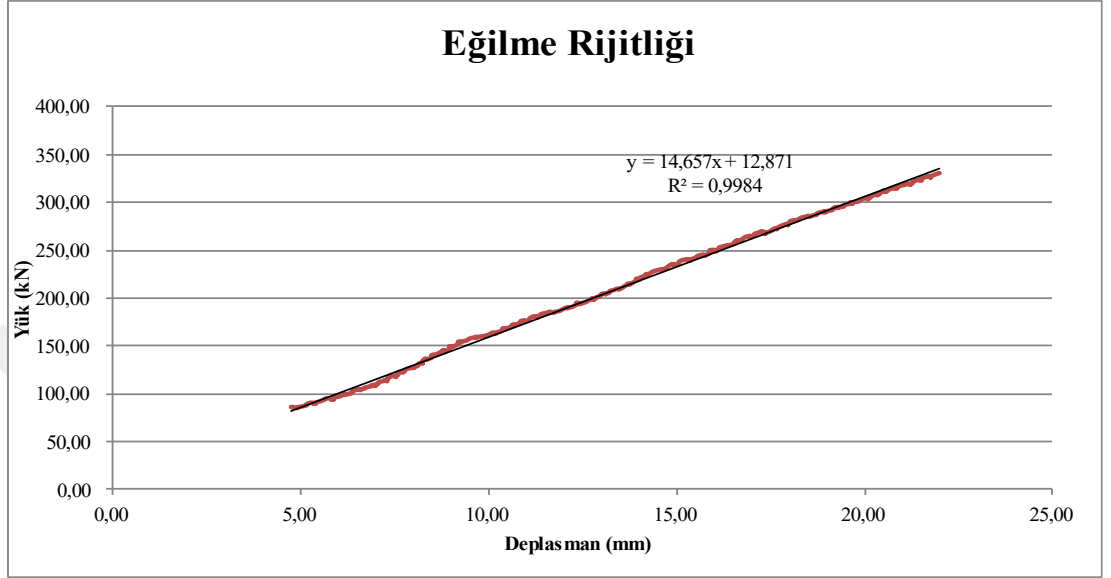
Şekil 4.86. K3-1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K3-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.87’de gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 19,595x + 0,305$ ” olarak bulunmuştur.



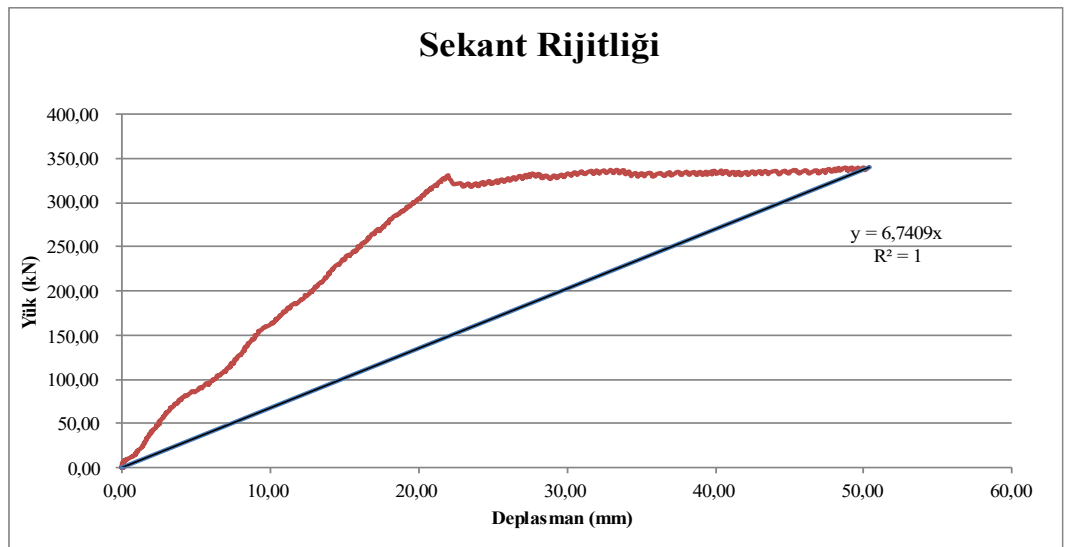
Şekil 4.87. K3-1 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K3-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.88’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 14,657x + 12,871$ ” olarak bulunmuştur.



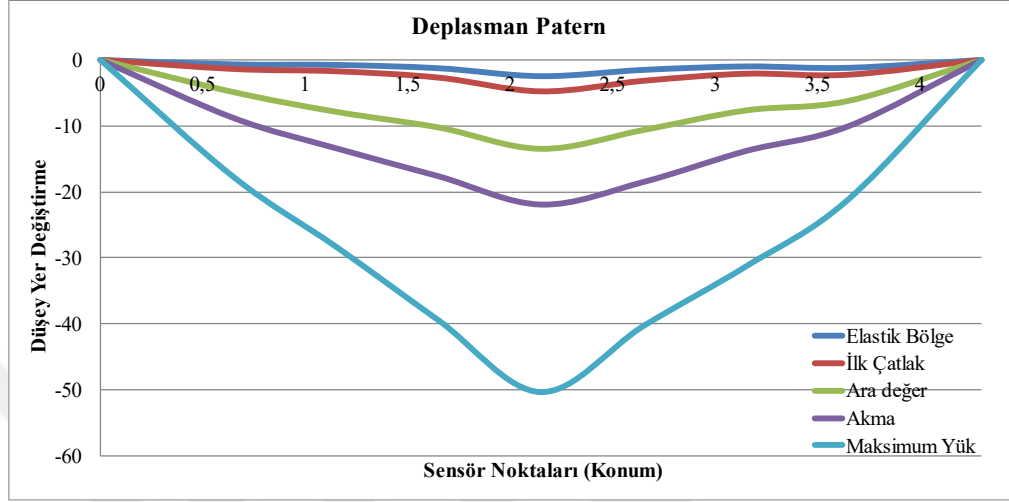
Şekil 4.88. K3-1 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K3-1 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.89’da gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 6,7409x$ ” olarak bulunmuştur.



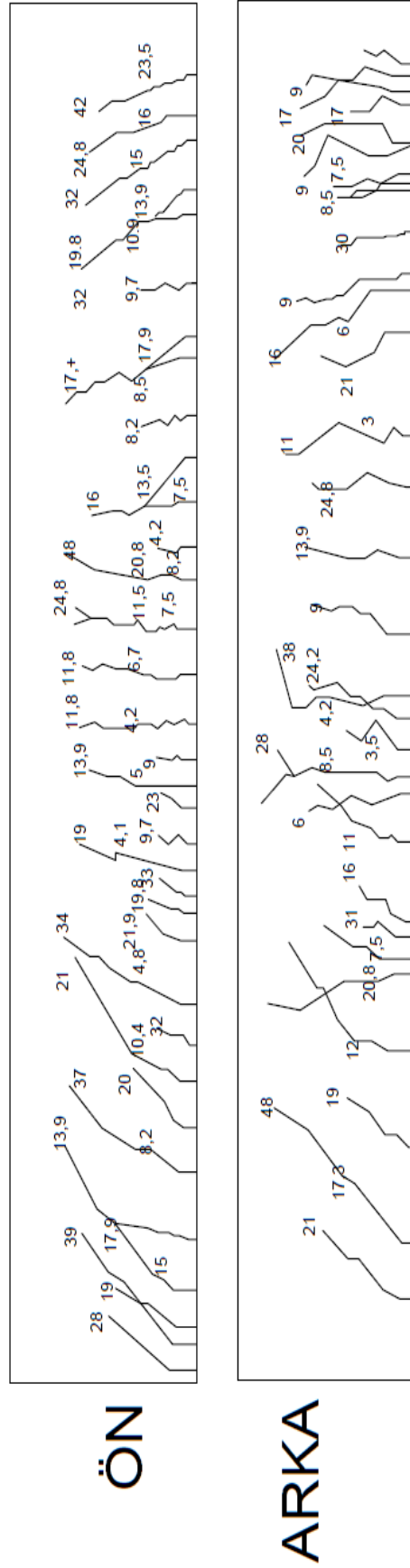
Şekil 4.89. K3-1 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K3-1 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.90'da gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.90. K3-1 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.91'de K3-1 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



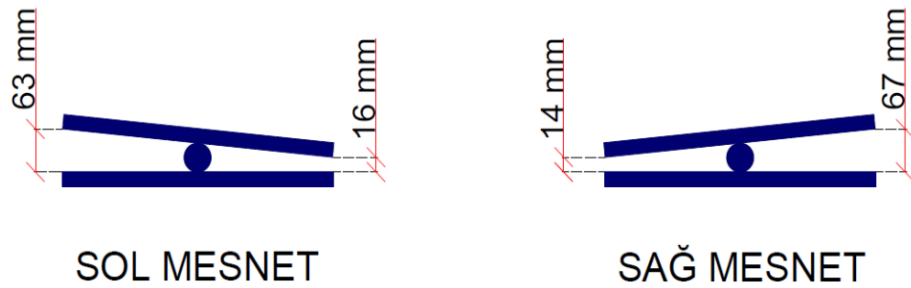
Şekil 4.91. K3-1 numunesi çatlak deseni

Aşağıda yer alan Şekil 4.92’de K3-1 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.92. K3-1 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.93’te K3-1 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir.



Şekil 4.93. K3-1 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu

Şekil 4.94'te kirişin orta nokta düşey deplasmanı 184 mm olduğu anda sıyrılan sargı donatısına ait görüntü işaretlenmiştir.



Şekil 4.94. K3-2 burkulma gerçekleşen basınç donatısı

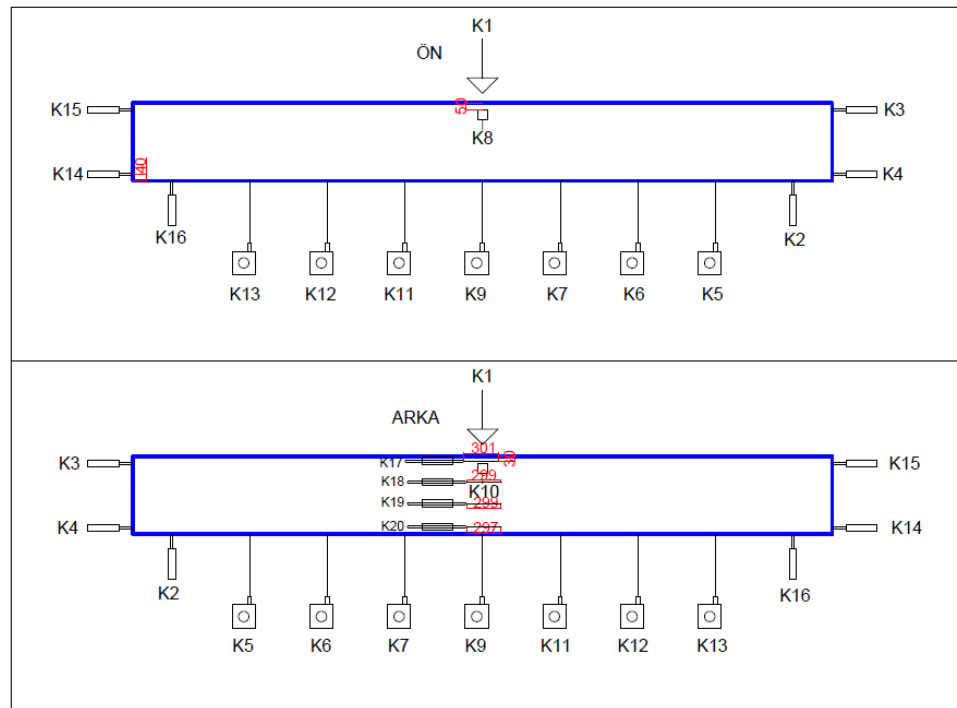
4.9. K3-2 Kirişi Deneyisel Çalışmaları

K3-2 kirişi, 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılmış olup, 03.01.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 23 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.95'de sunulmuştur.



Şekil 4.95. K3-2 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.96'da gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



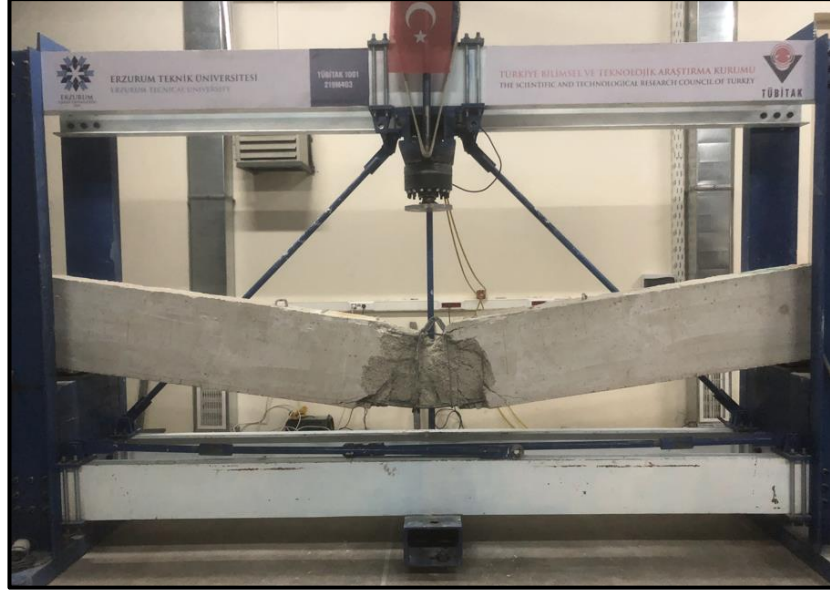
Şekil 4.96. K3-2 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.13'te belirtildiği üzere K3-2 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 1,9 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 66 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 106 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Orta nokta deplasmanı 260 mm'ye ulaştığında sargı donatısı ile boyuna donatıyı birbirine bağlayan bağ deli kopmuştur.

Çizelge 4.13. K3-2 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
1,9	İlk çatlak meydana geldi
22	Çatlaklarda çatallanma başladı
52,8	Betonda kabuk atma başladı
66	İlk yatay çatlak meydana geldi
106	Basınç donatısı burkuldu
260	Bağ teli koptu

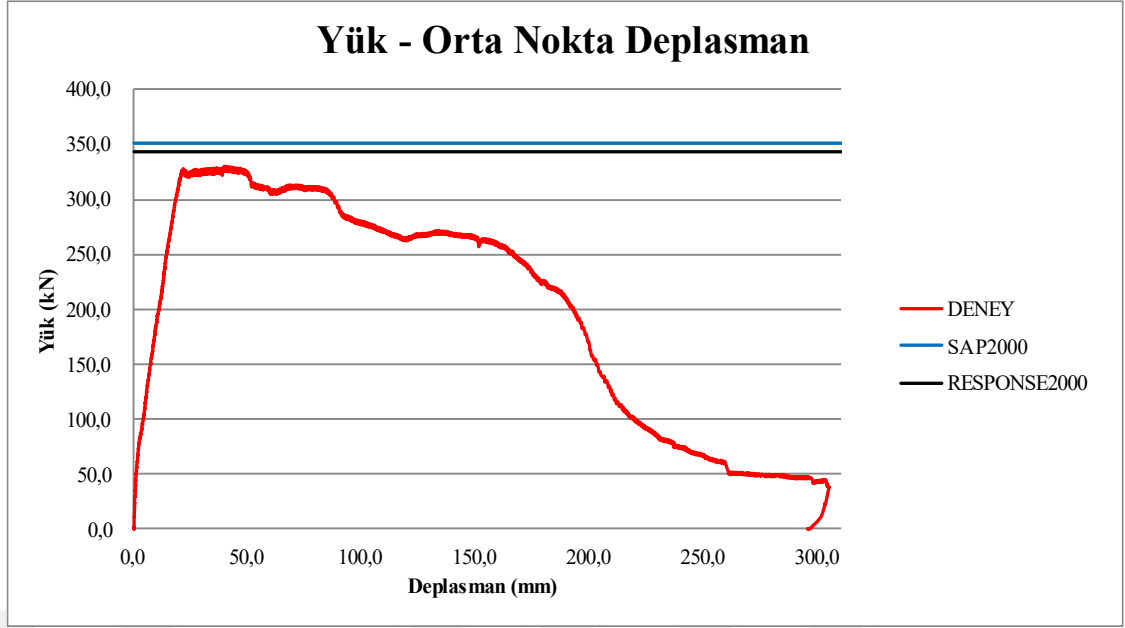
K3-2 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.97'de sunulmuştur. K3-2 kirişi 330,1 kN'luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 280,6 kN.m'lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.97. K3-2 numunesinin deney sonrası görünümü

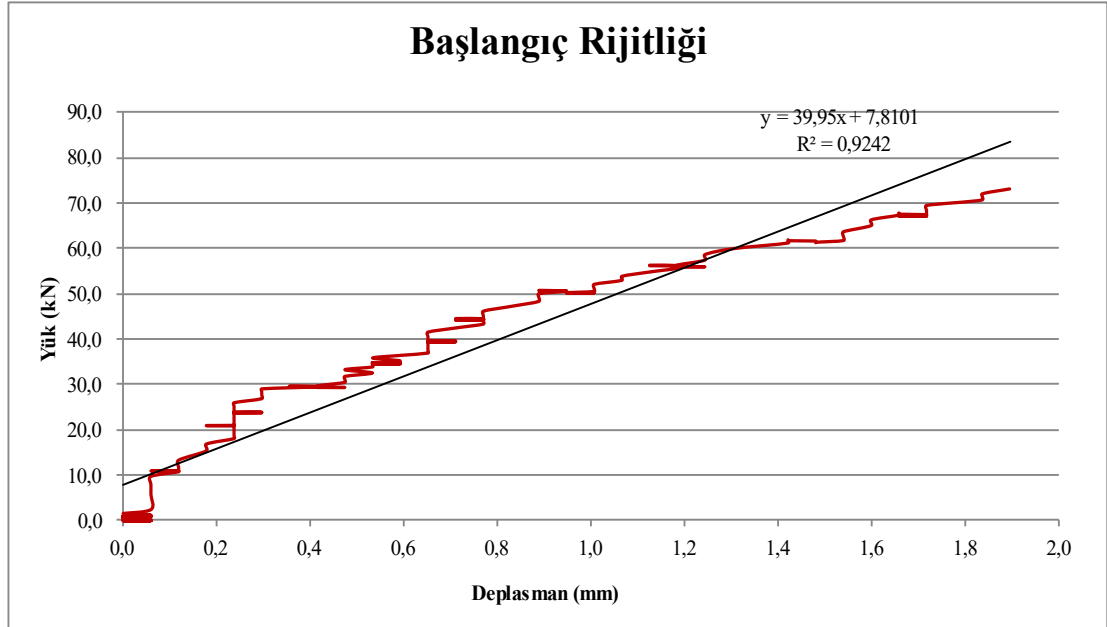
K3-2 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 1,9 mm'yi yük değeri ise 72,9 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.98'de görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



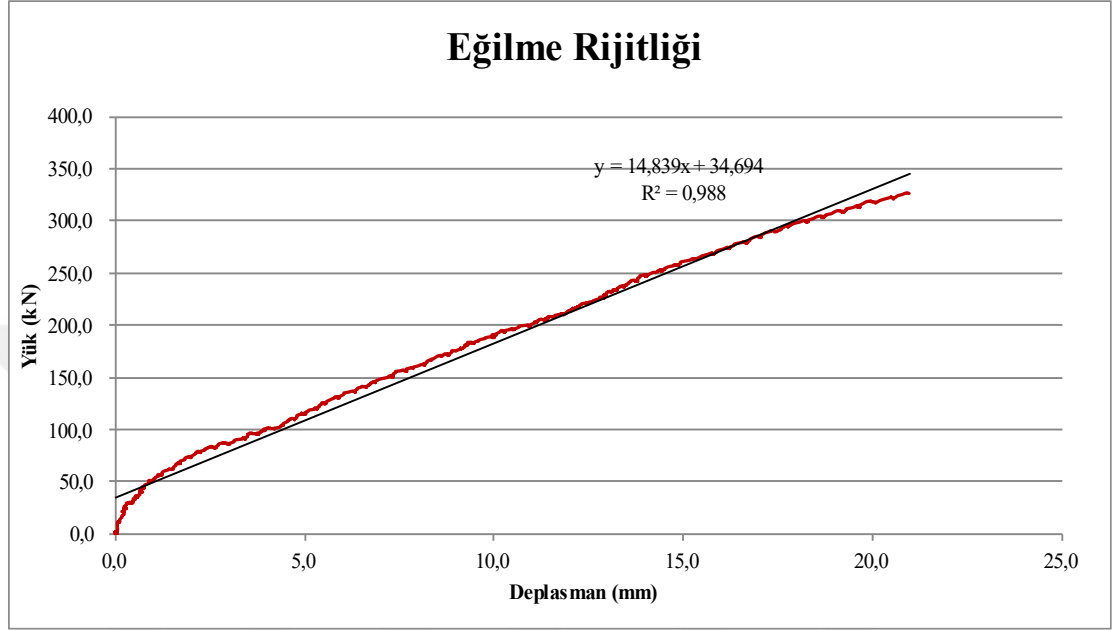
Şekil 4.98. K3-2 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K3-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.99’da gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 39,95x + 7,8101$ ” olarak bulunmuştur.



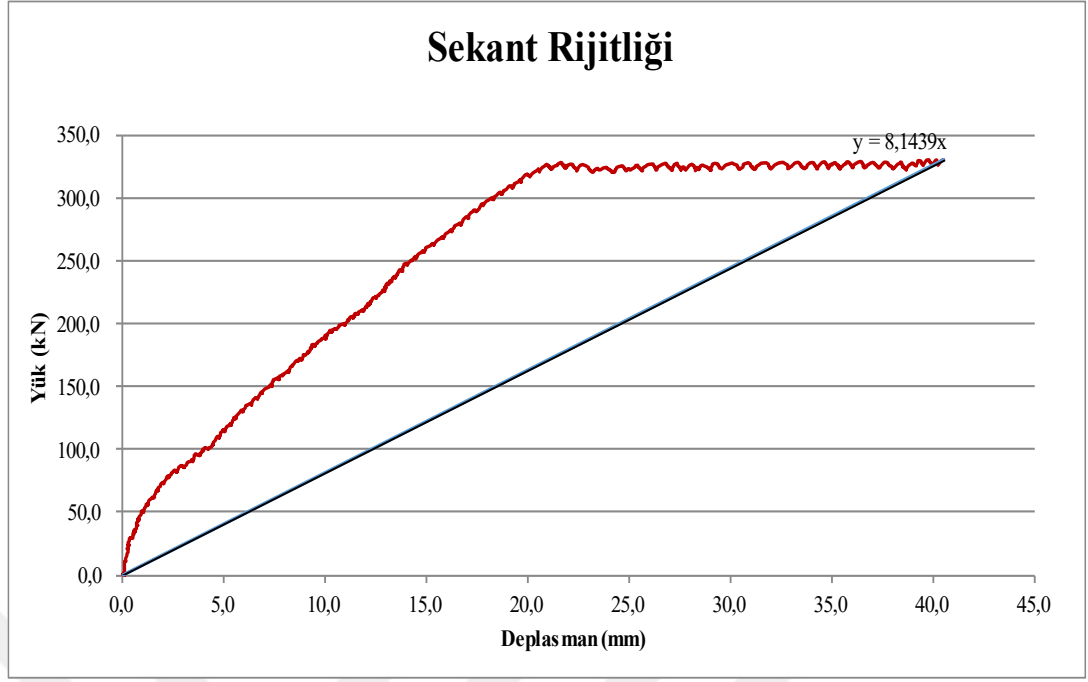
Şekil 4.99. K3-2 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K3-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.100’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 14,839x + 34,694$ ” olarak bulunmuştur.



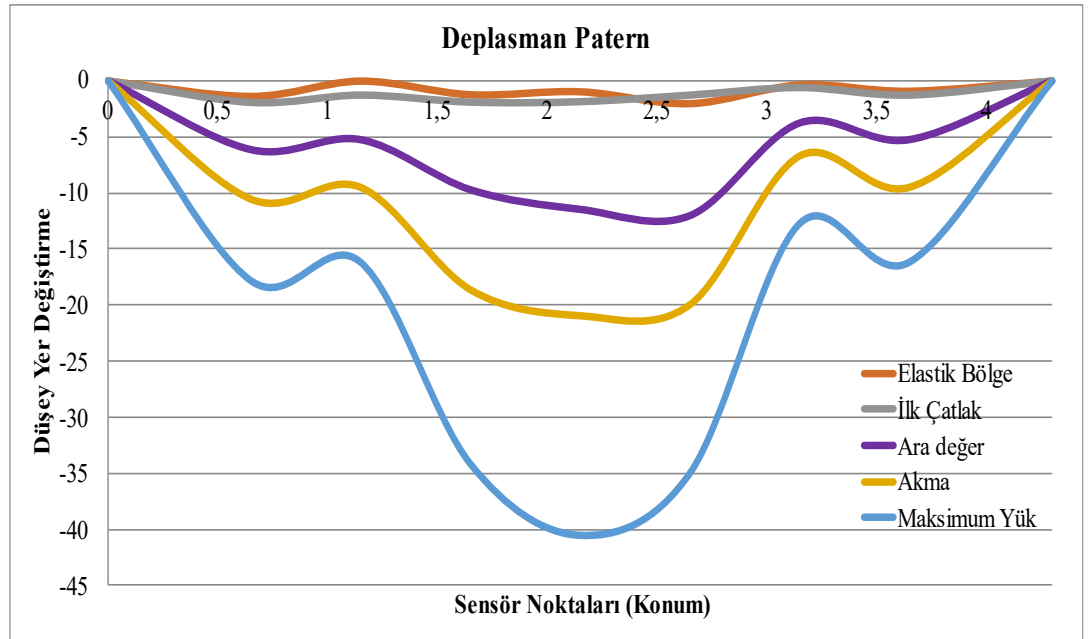
Şekil 4.100. K3-2 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K3-2 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.101’de gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 8,1439x$ ” olarak bulunmuştur.



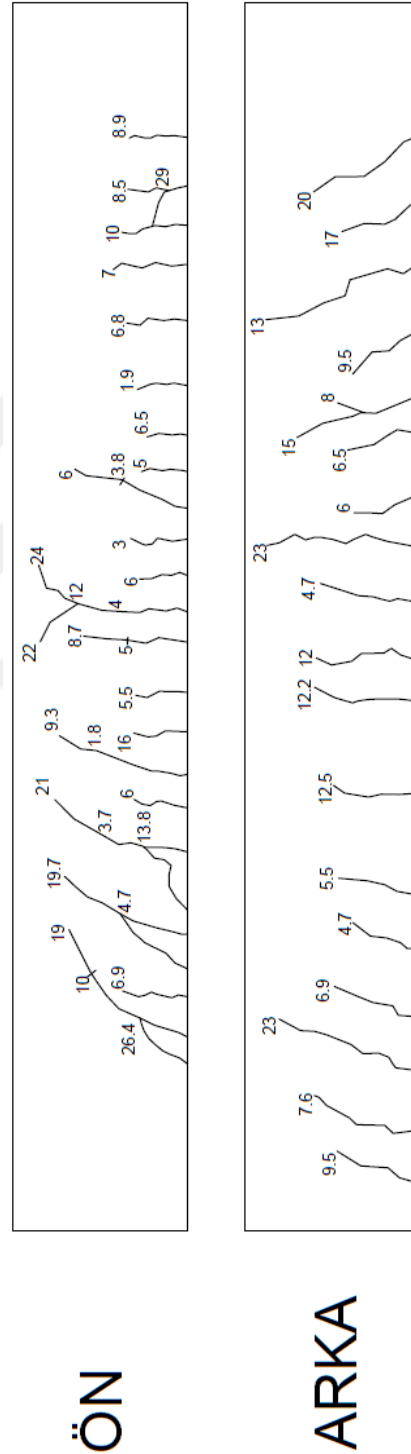
Şekil 4.101. K3-2 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K3-2 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.102’de gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.102. K3-2 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.103'te K3-2 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



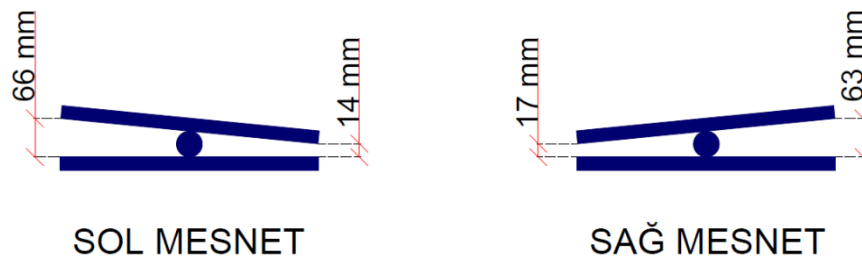
Şekil 4.103. K3-2 numunesi çatlak deseni

Aşağıda yer alan Şekil 4.104'te K3-2 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.104. K3-2 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.105'te K3-2 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir. Şekil 4.106'da ise bu mesnetlere ait gerçek görüntüye yer verilmiştir.

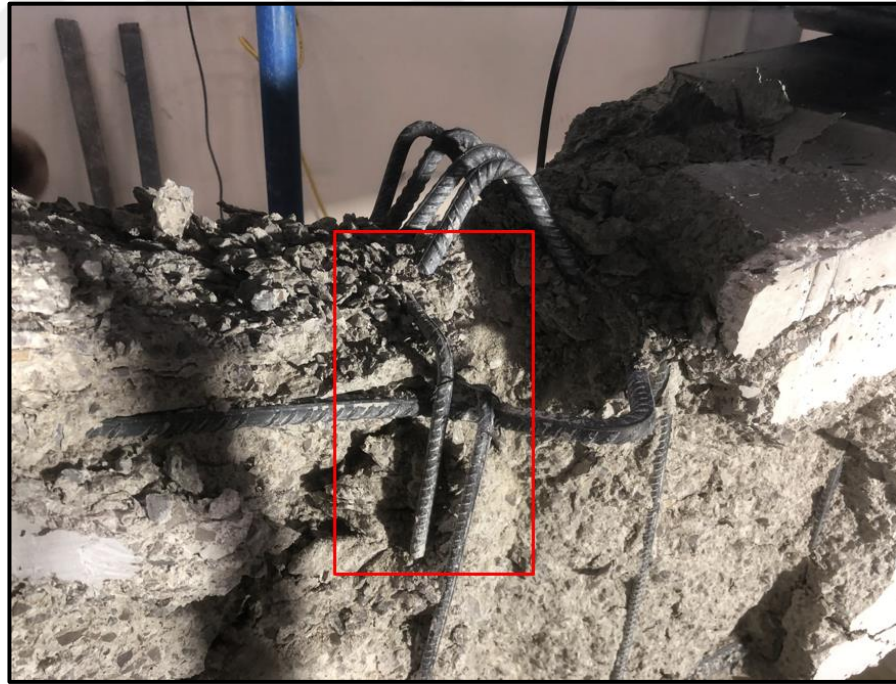


Şekil 4.105. K3-2 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu



Şekil 4.106. K3-2 numunesi deney sonunda ortaya çıkan mesnet görüntüsü

Şekil 4.107’de kirişin orta nokta düşey deplasmanı 260 mm olduğu anda sıyrılan sargı donatısı ve kopan bağ teline ait görüntü işaretlenmiştir.



Şekil 4.107. K3-2 numunesi kopan bağ teli ve sıyrılan sargı donatısı görüntüsü

Şekil 4.108’de boyuna donatının akma noktasında gerçekleşen çap daralması görülmektedir. Çap daralması maksimum moment bölgesinde yani iki yük noktası arasında, donatı iç yapısının en zayıf olduğu bölgede gerçekleşmiştir.



Şekil 4.108. K3-2 eğilme donatısında meydana gelen akma ve incelme

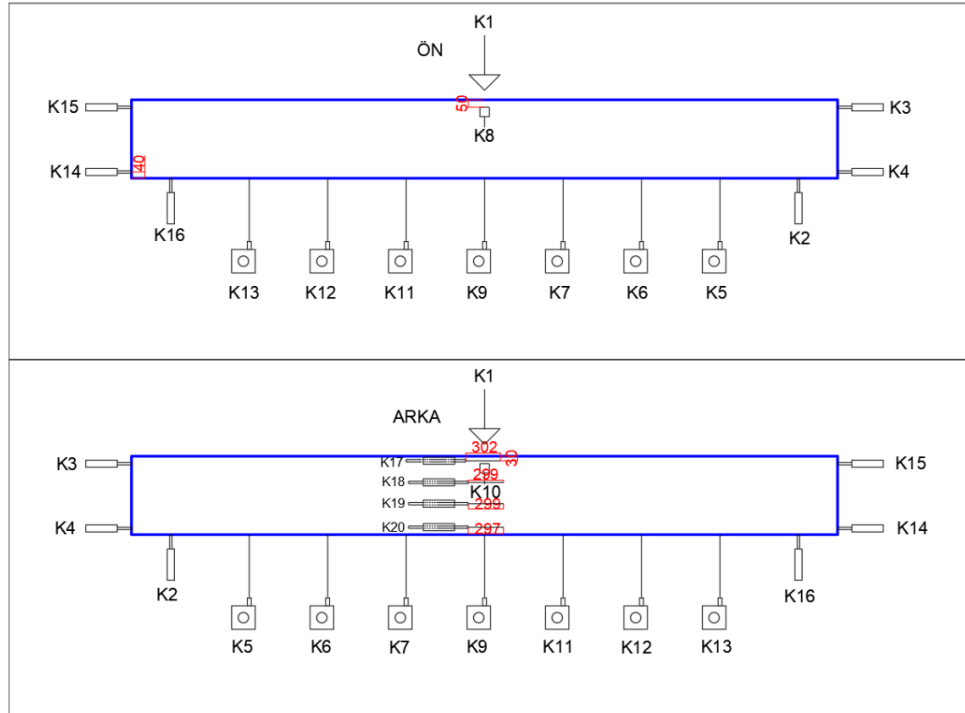
4.10. K3-3 Kirişi Deneysel Çalışmaları

K3-3 kirişi, 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılmış olup, 05.01.2022 tarihinde tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ana deney yapılmadan önce bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; enine donatının ($\Phi 8$) akma dayanımı 580 Mpa, kopma dayanımı 704 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 14$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 500 Mpa, kopma dayanımı 608 Mpa olarak belirlenmiştir. $\Phi 12$ 'lük boyuna donatının akma dayanımı 535 Mpa, kopma dayanımı 613 Mpa olarak belirlenmiştir. Kirişin deneye tabi tutulduğu gün, yapılan ön deneylerde ortalama beton basınç dayanımı 24 MPa olarak belirlenmiştir. İlgili kiriş numunesinin, 4 noktalı eğilme deneyi öncesi genel görünümü Şekil 4.109'da sunulmuştur.



Şekil 4.109. K3-3 numunesinin deney öncesi görünümü

Yapılan deney esnasında, Loadcell'den anlık olarak yük takibi yapılmıştır. Bu okunan yüke karşılık, birçok noktadan Şekil 4.110'da gösterildiği gibi deformasyon ölçümü alınmıştır.



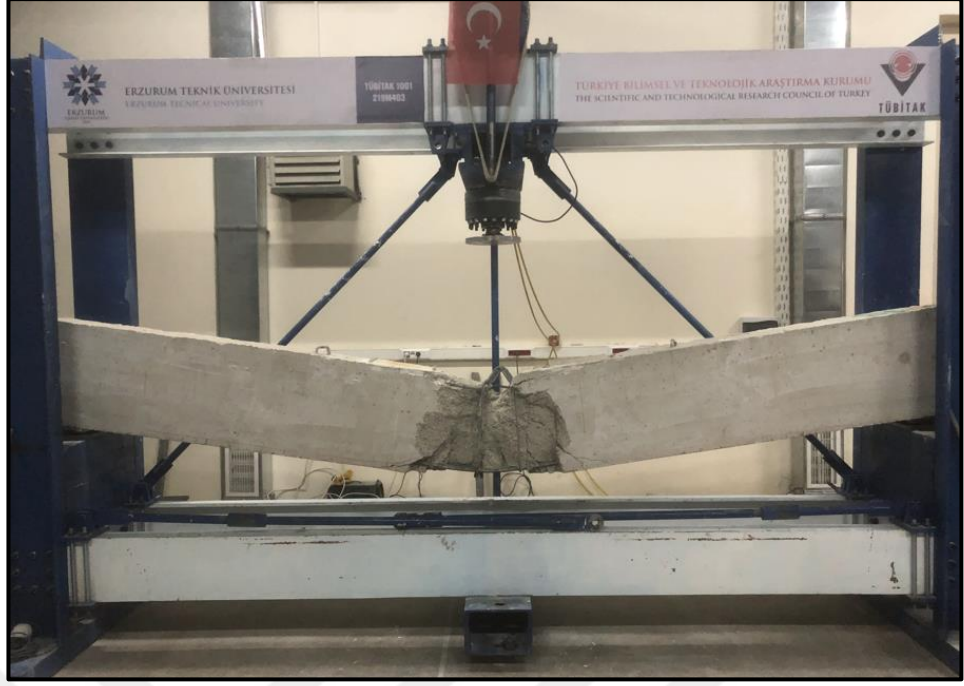
Şekil 4.110. K3-3 numunesi sensör yerleşim düzeni

Deneyler esnasında kiriş, anlık olarak göz takibinde tutulmuştur. Bu sayede numune davranışı hakkında bir takım manuel notlar alınmıştır. Çizelge 4.14'te belirtildiği üzere K3-3 kirişinde orta nokta düşey deplasmanı 1,8 mm olduğunda gözle görünür ilk çatlak meydana gelmiştir. Deplasman 27 mm olduğunda çatlak uçlarında çatallanmalar başlamıştır. Basınç bölgesinde ilk yatay çatlak, kiriş orta noktası 33 mm düşey deplasmana ulaştığında gelirken, yine orta nokta düşey deplasmanı 70 mm olduğunda 12 mm çapındaki basınç donatısı burkulmuştur. Orta nokta deplasmanı 300 mm'ye ulaştığında deney sonlandırılmıştır.

Çizelge 4.14. K3-3 numunesine ait deney sürecinde alınan notlar

Orta Nokta Düşey Deplasman (mm)	Not
1,8	İlk çatlak meydana geldi
27	Çatlaklarda çatallanma başladı
33	İlk yatay çatlak meydana geldi
70	Basınç donatısı burkuldu

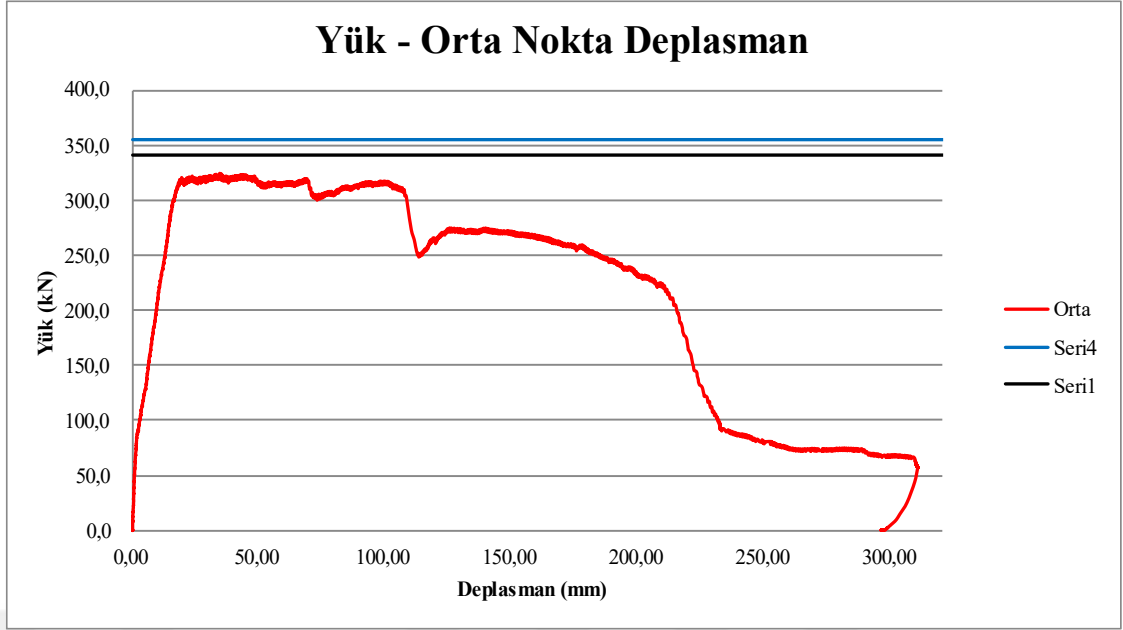
K3-3 kirişi yapılan tam ölçekli deney neticesinde ortaya çıkan görüntüsü Şekil 4.111'de sunulmuştur. K3-3 kirişi 324,5 kN'luk maksimum yüke ulaşmıştır. Yani deney kirişi yaklaşık olarak 275,83 kN.m'lik maksimum moment taşımıştır.



Şekil 4.111. K3-3 numunesinin deney sonrası görünümü

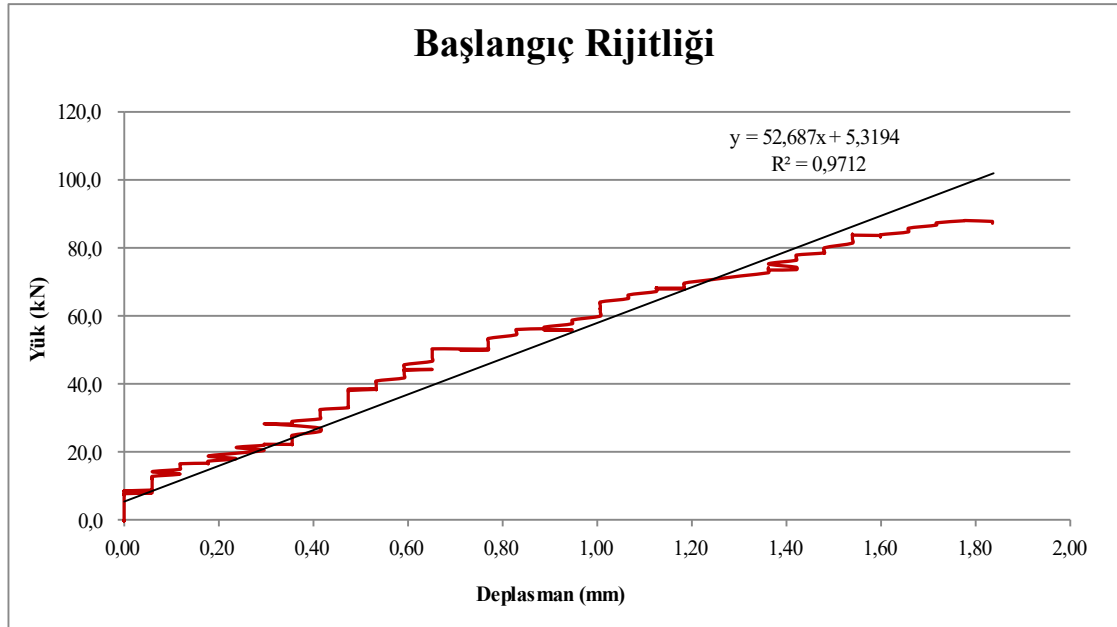
K3-3 kirişinde gözle görünür ilk çatlak, yük uygulanma noktaları arasında yani maksimum moment bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk çatlak ortaya çıktığında orta nokta düşey deplasman değeri 1,84 mm'yi yük değeri ise 87,6 kN'u göstermekte idi. Daha sonra bu çatlağı ilk olarak tarafsız eksene doğru, ardından basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Deneyin ilerleyen aşamalarında yükün de artması ile birlikte ilk çatlak çevresinde mesnet noktalarına doğru yeni çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların da basınç bölgesine doğru uzadığı gözlemlendi. Çatlaklar uzamaya devam ettikçe çatallanma meydana gelmiştir.

Deney sonucunda ölçüm cihazlarından alınan yük-orta nokta deplasman eğrisi aşağıda yer alan Şekil 4.112'de görülmektedir. Grafikte, deney verileri ile Response2000 yazılımı ve SAP2000 yazılımından alınan akma yükü verileri kıyaslanmıştır.



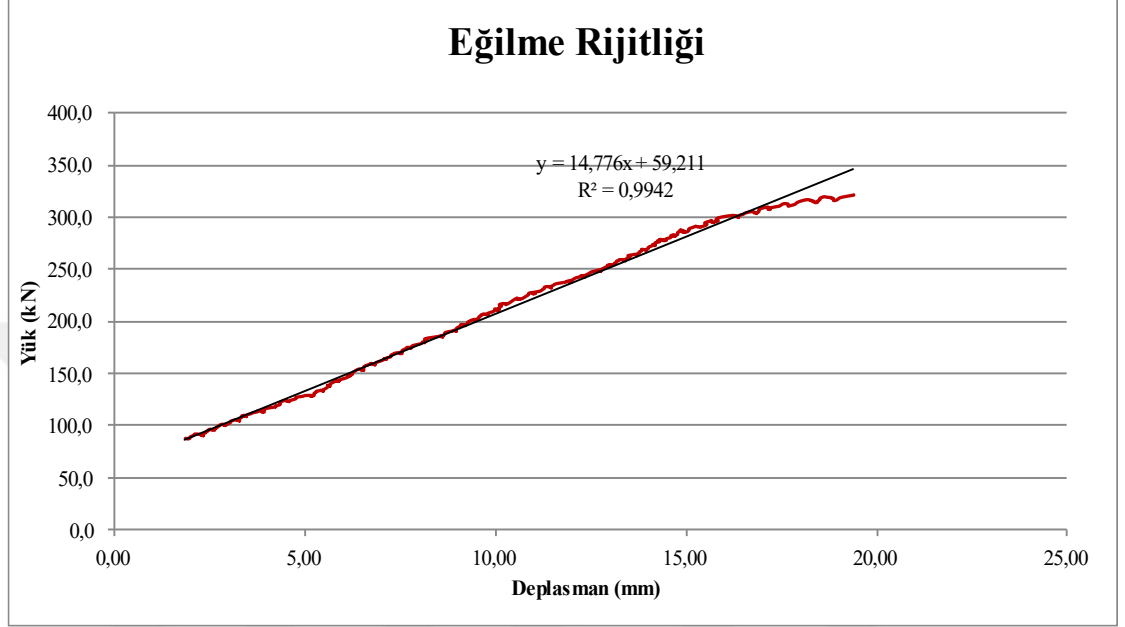
Şekil 4.112. K3-3 numunesine ait yük-deplasman eğrisi

K3-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile ilk çatlak arasındaki bölgeyi tanımlayan, başlangıç rijitliği grafiği Şekil 4.113'te gösterilmiştir. Başlangıç rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem " $y = 52,687x + 5,3194$ " olarak bulunmuştur.



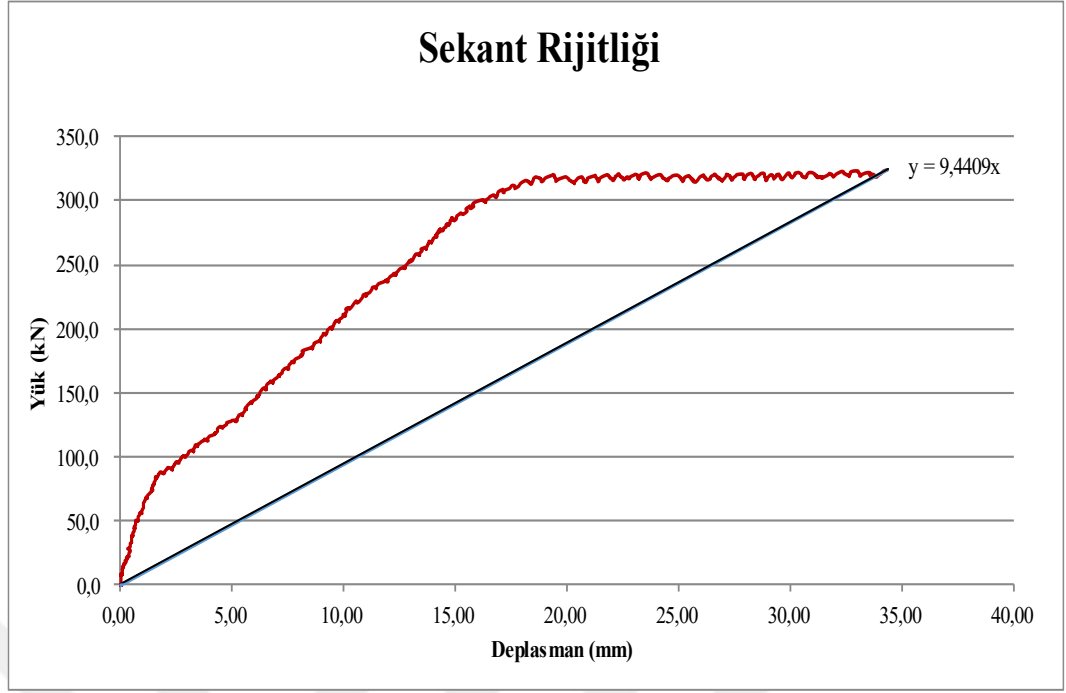
Şekil 4.113. K3-3 numunesi başlangıç rijitliği eğrisi

K3-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, ilk çatlak noktası ile çekme donatısının akma noktası arasındaki bölgeyi tanımlayan, eğilme rijitliği grafiği Şekil 4.114'te gösterilmiştir. Eğilme rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 14,776x + 59,211$ ” olarak bulunmuştur.



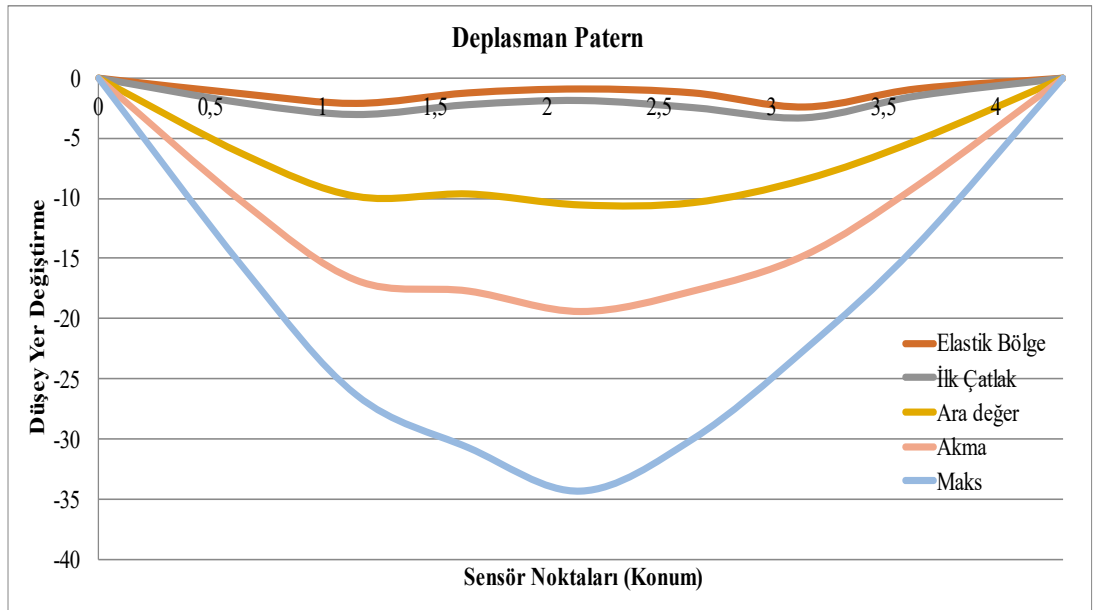
Şekil 4.114. K3-3 numunesi eğilme rijitliği eğrisi

K3-3 numunesine ait, yük- orta nokta deplasmanı grafiğinde, deney başlangıcı ile maksimum yük noktası arasında kalan bölgeyi tanımlayan, sekant rijitliği grafiği Şekil 4.115'te gösterilmiştir. Sekant rijitliğini ifade eden eğilim çizgisine ait denklem “ $y = 9,4409x$ ” olarak bulunmuştur.



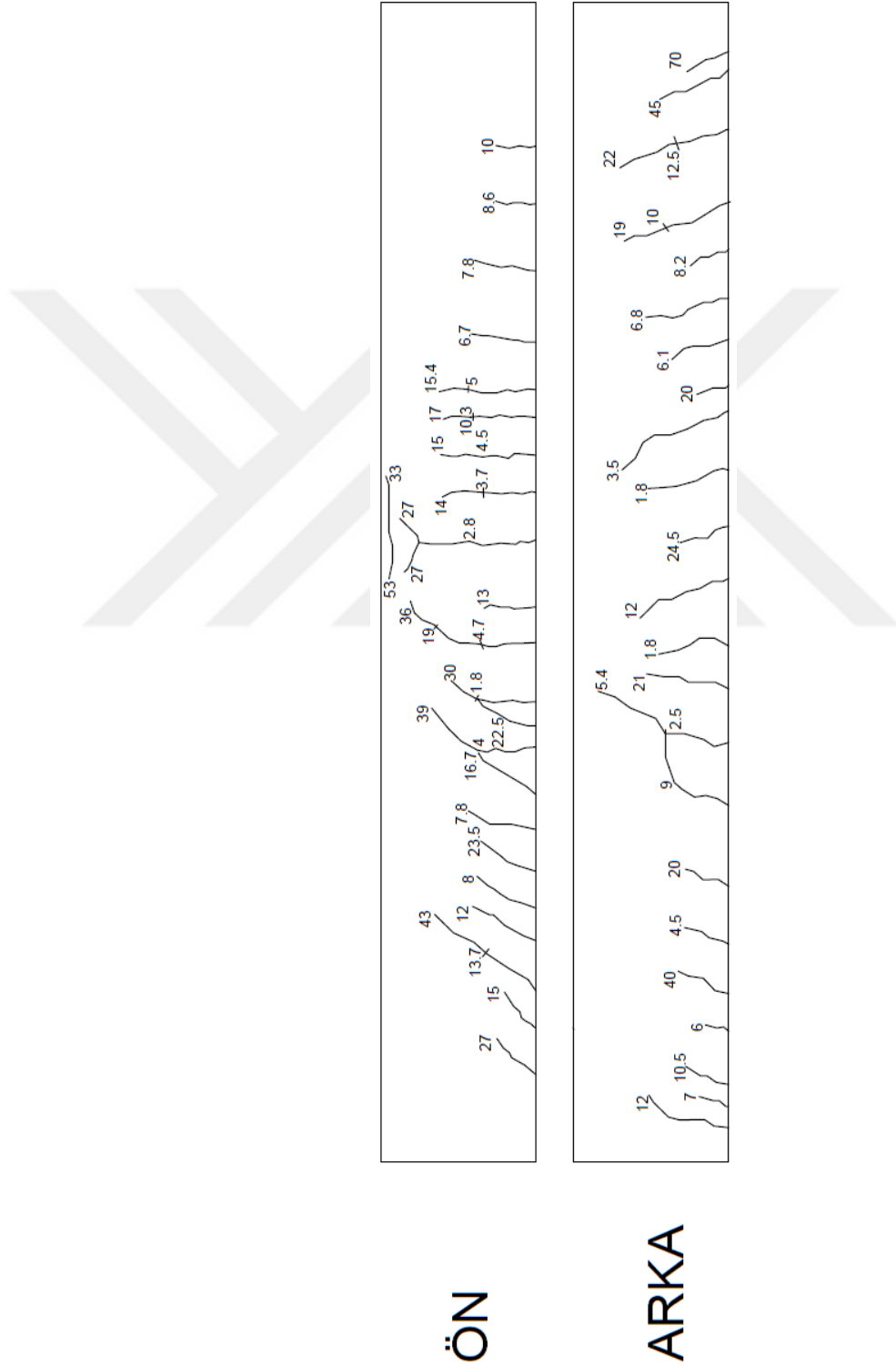
Şekil 4.115. K3-3 numunesi sekant rijitliği eğrisi

K3-3 numunesi için tam ölçekli ve 4 noktalı eğilme deneyi yapılırken, daha önceden belirtildiği üzere birçok noktadan ipli ve çubuk sensörler vasıtasıyla deplasman ölçümü yapılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler yardımı ile Şekil 4.116’da gösterilen deplasman paterni oluşturulmuştur.



Şekil 4.116. K3-3 numunesi deplasman paterni

Şekil 4.117’de K3-3 numunesinin, deney esnasında göz kontrolü yapılarak ve cep telefonu kamerası kullanılarak oluşturulan çatlak deseni gösterilmektedir. Çatlakların yanında yazan sayılar, çatlak oluştuğu anda ki orta nokta deplasmanının, milimetre biriminden ifadesidir.



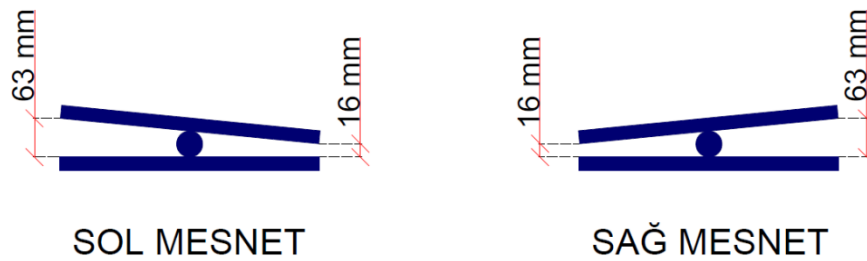
Şekil 4.117. K3-3 numunesi çatlak deseni

Aşağıda yer alan Şekil 4.118’de K3-3 deney numunesinin, deney sonunda maksimum moment bölgesinde ortaya çıkan çatlak görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.118. K3-3 numunesi maksimum moment bölgesine ait çatlak görüntüsü

Aşağıda yer alan Şekil 4.119’da K3-3 numunesinin mesnet noktalarında oluşan eğilme miktarları gösterilmektedir. Deney esnasında kirişin hem eğildiği hem de bir miktar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın yönünü, çatlakların yoğunlaştığı yerler ve donatının zayıf kaldığı yerler belirlemiştir. Şekil 4.120’de ise bu mesnetlere ait gerçek görüntüye yer verilmiştir.



Şekil 4.119. K3-3 numunesinin deney sonunda ortaya çıkan mesnet durumu



Şekil 4.120. K3-3 numunesine ait mesnetin deney sonunda ortaya çıkan durumu

Deney esnasında kirişte meydana gelen eğilme arttıkça yük uygulama noktasındaki içi dolu dairesel kesit kaymıştır. Bu sayede yük aktarımı daha sağlıklı gerçekleşmiştir. İlgili durum Şekil 4.121’de gösterilmiştir.



Şekil 4.121. K3-3 numunesi yük uygulama noktasının deney sonu görüntüsü

Şekil 4.122’de kirişin orta nokta düşey deplasmanı 70 mm olduğu anda burkulan basınç donatısı ve kopan bağ teline ait görüntü gösterilmektedir. Donatı burkulmaya başladıktan sonra kesit kapasitesinde önce ciddi bir düşüş ardından yükseliş ve son olarak tekrar düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 4.122. K3-3 numunesi burkulma gerçekleşen basınç donatısı

Şekil 4.123’te boyuna donatının akma noktasında gerçekleşen çap daralması görülmektedir. Çap daralması maksimum moment bölgesinde yani iki yük noktası arasında, donatı iç yapısının en zayıf olduğu bölgede gerçekleşmiştir.



Şekil 4.123. K3-3 numunesi akma meydana gelen çekme donatısı

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. K1 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması

K1 kiriş grubuna ait bazı veriler Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Bu veriler doğrultusunda K1-1 kirişinin maksimum yüke ulaşması K1-2 kirişine nazaran daha yüksek deplasman seviyelerinde gelmiştir. Bunun yanı sıra K1-2 numunesinin daha yüksek maksimum yüke ulaşabildiği gözlemlenmiştir. K1-1 kirişinde orta nokta düşey deplasman değeri 2,49 mm’ye ulaştığında ilk çatlak gözlemlenirken, K1-2 kirişinde bu değer 1,86 olduğu anlaşılmaktadır. Gruptaki iki kirişin akma değerlerinin yük bakımından maksimum yük ile paralellik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.1. K1 kiriş grubu deney sonu verileri

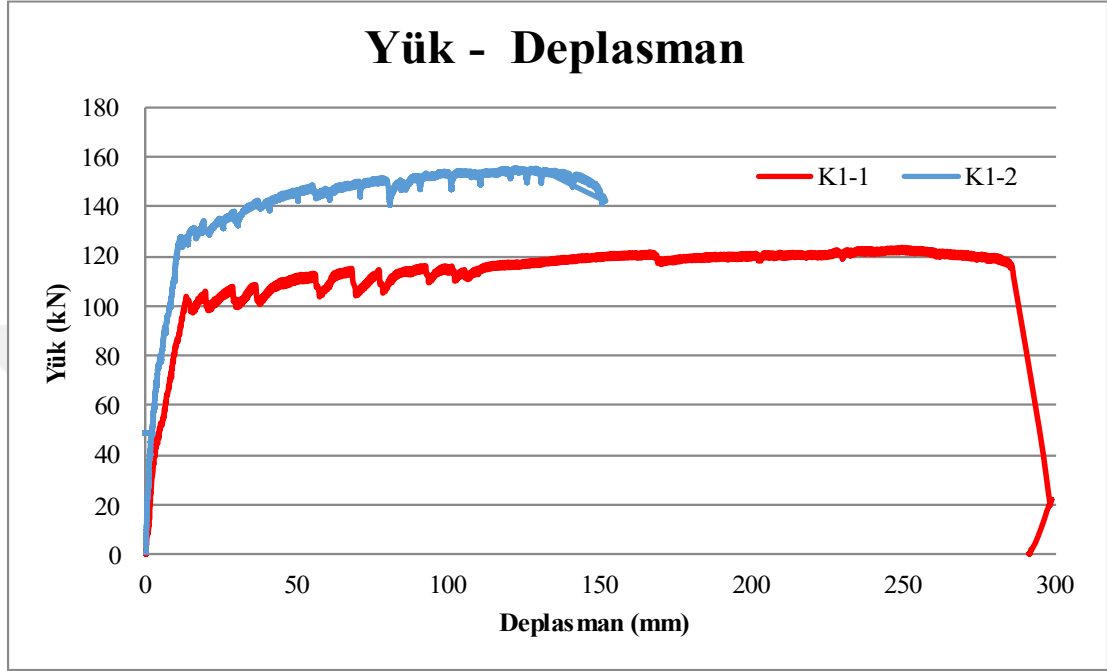
Numune	Maksimum Nokta		İlk Çatlak Sınırı		Akma Sınırı		Deney Bitiş Noktası	
	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)
K1-1	123,57	249,39	36,05	2,49	103,84	13,21	118,66	283,91
K1-2	155,55	121,86	50,26	1,86	127,61	11,37	9,25	182,20

K1-1 kirişi Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere K1-2 kirişine göre daha az rijit bir davranış sergilemiştir.

Çizelge 5.2. K1 kiriş grubu rijitlik verileri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Eğilme Rijitliği (kN/mm)	Maks. Yük Rijitliği (Sekant Rijitliği) (kN/mm)
	Ki	Ky	Ks
K1-1	14,49	6,32	0,50
K1-2	27,09	8,13	1,28

K1 kiriş grubuna ait yük-deplasman grafikleri Şekil 5.1’de ve yine bu gruba ait süneklik ve sönmölenen enerji değeri Çizelge 5.3’te gösterilmektedir. Grafikte ve çizelgede göröldüğü üzere K1-1 kirişi, K1-2 kirişine nazaran daha yüksek enerji sönmöleme kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.1. K1 grubu toplu yük-deplasman eğrileri

Çizelge 5.3. K1 kiriş grubu süneklik ve enerji sönmöleme miktarları

Numune	$P_{max}(kN)$	$0,85 \cdot P_{max}$	$\Delta_{0,85 \cdot P_{max}} (mm)$	$\Delta y (mm)$	Süneklik	Enerji
K1-2	155,55	132,22	153,79	11,37	13,53	44256
K1-1	123,57	105,03	287,18	13,21	21,74	34759

5.2. K2 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması

K2 kiriş grubuna ait bazı veriler Çizelge 5.4’te gösterilmektedir. Bu veriler doğrultusunda her üç kirişinde maksimum yüke ulaştığı anda ölçölen orta nokta deplasman değeri bir birine çok yakın olduğı görölmektedir. Bunun yanı sıra K2-2 kesitinin hem maksimum yük noktası hem de akma noktasının diğeri iki kesite nazaran daha yüksek olduğı gözlemlenmiştir. K2-2 kirişi 12Φ12 şeklinde demetlenmiş donatıların kullanıldığı kesittir. K2-1 kirişi yine benzer şekilde 9Φ14 demetlenmiş

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

donatının kullanıldığı kesittir. K2-3 kesiti ise 2Φ12+3Φ22 tekil donatıların kullanıldığı kesittir. Ancak K2-1 kirişi K2-3 kirişine göre daha düşük akma yükü ve maksimum yüke ulaşmıştır.

Bahsedilen detaylar ışığında ilgili kesitlerde, donatı çapının küçük, donatı adedinin fazla olmasının maksimum yük ve akma yükü üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

K2 kiriş grubuna ait verilerden ilk çatlağın meydana geldiği andaki orta nokta düşey deplasmanlarına bakıldığında K2-1 kesitin diğerlerine nazaran daha yüksek değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.4. K2 kiriş grubu deney sonu verileri

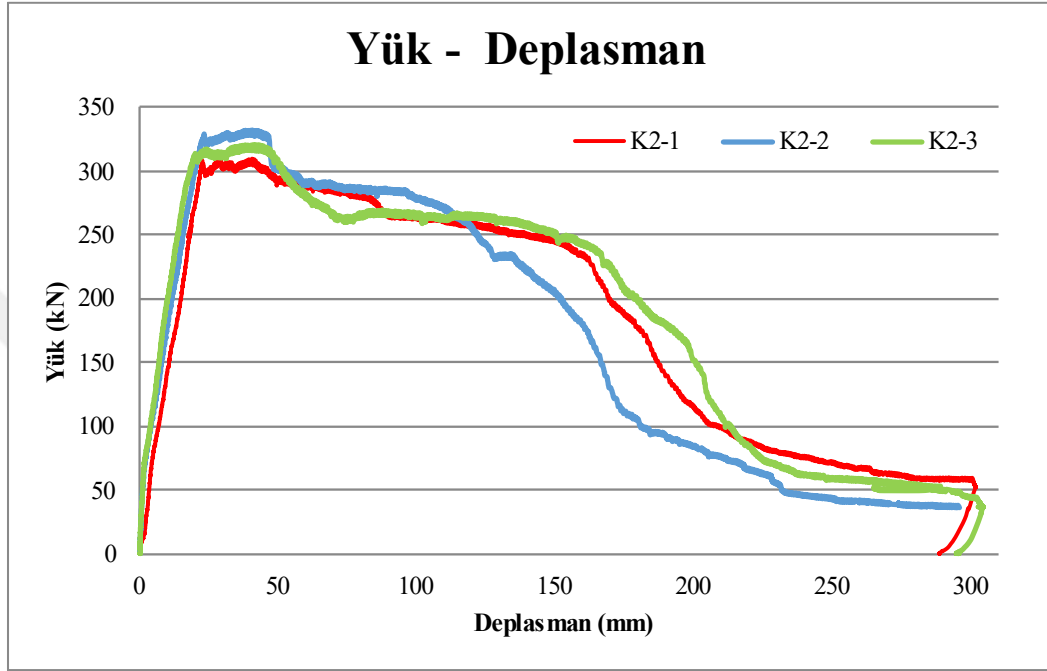
Numune	Maksimum Nokta		İlk Çatlak Sınırı		Akma Sınırı		Deney Bitiş Noktası	
	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)
K2-1	309,77	40,41	66,10	3,85	307,94	22,40	55,75	300,78
K2-2	332,18	40,42	70,78	1,84	327,87	23,17	0,10	297,16
K2-3	320,58	42,87	69,69	1,42	313,53	19,91	0,10	294,50

K2 kiriş grubuna ait tüm kirişler Çizelge 5.5'te görüldüğü üzere birbirine çok yakın eğilme rijitliği ve sekant rijitliği davranışları sergilemişlerdir. Ancak başlangıç rijitliği göz önünde bulundurulduğunda K2-1 kirişinin diğer ikisine oranla başlangıç rijitliği açısından daha az rijit bir davranış sergilediği görülmektedir.

Çizelge 5.5. K2 kiriş grubu rijitlik verileri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Eğilme Rijitliği (kN/mm)	Maks. Yük Rijitliği (Sekant Rijitliği) (kN/mm)
	K _i	K _y	K _s
K2-1	17,16	13,04	7,66
K2-2	38,53	12,05	8,22
K2-3	49,00	13,19	7,48

K2 kiriş grubuna ait yük-deplasman grafikleri Şekil 5.2’te ve yine bu gruba ait süneklik ve sönümlenen enerji değerleri Çizelge 5.6’te gösterilmektedir. Grafikte ve çizelgede görülen en belirgin farklılık K2-1 kesitinin yani tekil donatılardan oluşan kesitin demet donatılı kesitlere nazaran daha düşük bir enerji sönümleme kapasitesine ulaştığıdır.



Şekil 5.2. K2 grubu toplu yük-deplasman eğrileri

Çizelge 5.6. K2 kiriş grubu süneklik ve enerji sönümleme miktarları

Numune	$P_{max}(kN)$	$0,85 \cdot P_{max}$	$\Delta_{0,85 \cdot P_{max}} (mm)$	$\Delta y (mm)$	Süneklik	Enerji
K2-1	309,77	263,30	90,13	22,40	4,02	28.492
K2-2	332,18	282,35	119,12	23,17	5,14	28.752
K2-3	320,58	272,50	65,66	19,91	3,30	19.280

5.3. K3 Kiriş Grubuna Ait Deneysel Verilerin Kıyaslanması

K3 kiriş grubuna ait bazı veriler Çizelge 5.7’te gösterilmektedir. Bu veriler doğrultusunda her üç kirişinde maksimum yüke ulaştığı anda ölçülen orta nokta deplasman değerlerinin $K3-1 > K3-2 > K3-3$ olduğu görülmektedir. Bu sıralamanın maksimum yük değerlerinde de paralellik gösterdiği söylenebilir. Numuneler üzerinde ilk

çatlaklar meydana geldiği anda K3-2 ve K3-3 kirişleri birbirine yakın orta nokta düşey deplasman değerine sahipken K3-1 kirişi diğer ikisine kıyasla yüksek değerlere ulaşmıştır.

Burada dikkat çeken nokta; her üç kirişte ilk çatlak anında yük değerlerinin birbirine yakın olmasına karşın K3-1 kirişinin deplasman değerlerinden fazla olmasıdır. Diğer yandan her üç kirişin akma değerleri ve akma anındaki orta nokta düşey deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.7. K3 kiriş grubu deney sonu verileri

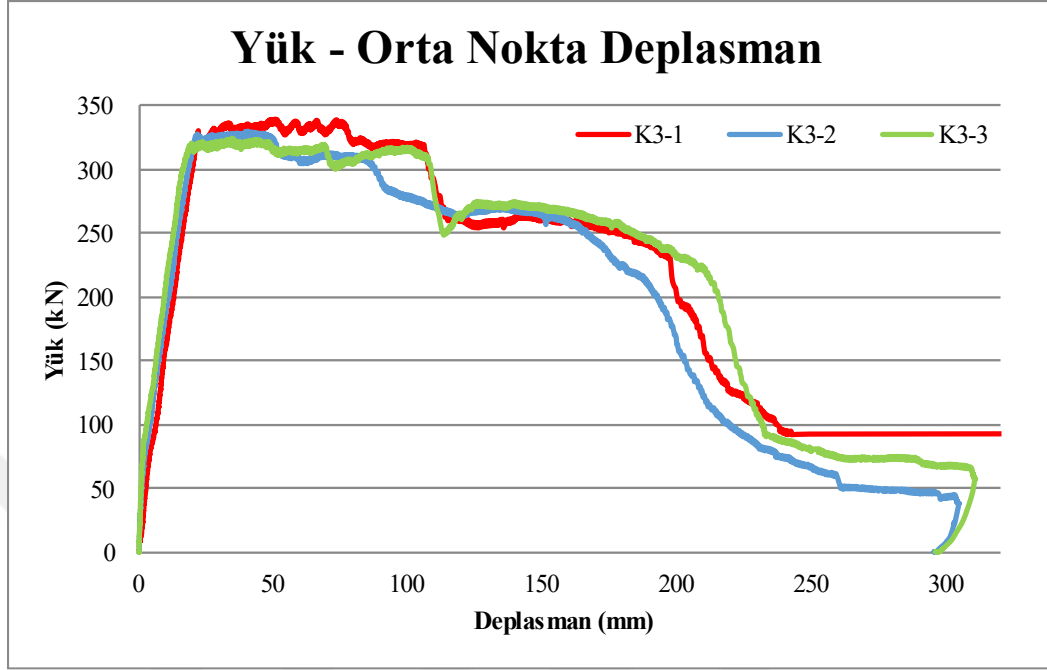
Numune	Maksimum Nokta		İlk Çatlak Sınırı		Akma Sınırı		Deneyin Bitiş Noktası	
	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)
K3-1	339,54	50,37	86,24	4,74	330,48	21,98	92,44	249,12
K3-2	330,11	40,53	72,95	1,90	325,87	20,98	0,00	295,33
K3-3	324,48	34,37	87,59	1,84	320,75	19,38	67,49	307,54

K3 kiriş grubuna ait tüm kirişler Çizelge 5.8’de görüldüğü üzere birbirine çok yakın eğilme rijitliği ve sekant rijitliği davranışları sergilemişlerdir. Ancak başlangıç rijitliği göz önünde bulundurulduğunda K3-1 kirişinin diğer ikisine oranla başlangıç rijitliği açısından daha az rijit bir davranış sergilediği görülmektedir.

Çizelge 5.8. K3 kiriş grubu rijitlik verileri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Eğilme Rijitliği (kN/mm)	Maks. Yük Rijitliği (Sekant Rijitliği) (kN/mm)
	Ki	Ky	Ks
K3-1	18,19	14,16	6,74
K3-2	38,47	13,26	8,14
K3-3	47,68	13,29	9,44

K3 kiriş grubuna ait yük-deplasman grafikleri Şekil 5.3'te ve yine bu gruba ait süneklik ve sönümlenen enerji değerleri Çizelge 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.3. K3 grubu toplu yük-deplasman eğrileri

K3 grubuna ait kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri arasındaki bağıntı incelendiğinde K3-1 ve K3-3 kirişlerinin birbirine yakın enerji sönümlediğini, buna karşın K3-2 kirişinin nispeten daha az enerji sönümlediğini ifade etmek mümkündür.

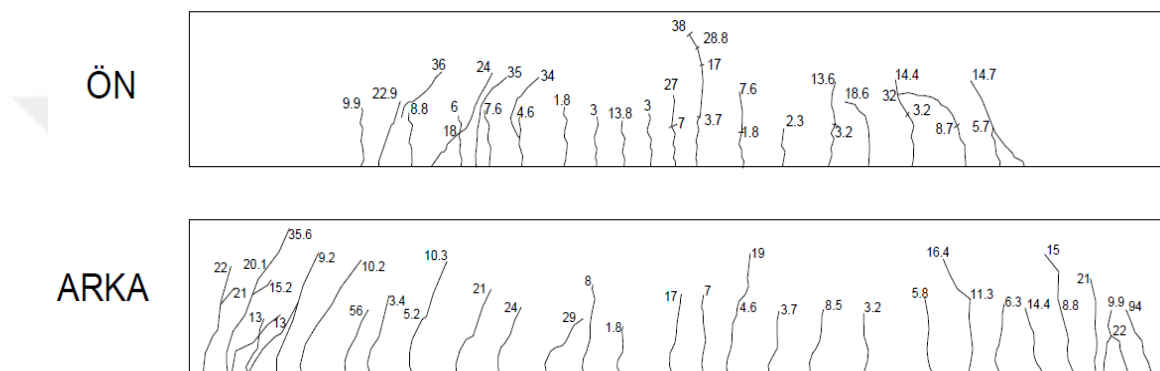
Çizelge 5.9. K3 kiriş grubu süneklik ve enerji sönümleme miktarları

Numune	$P_{max}(kN)$	$0,85 \cdot P_{max}$	$\Delta_{0,85 \cdot P_{max}} (mm)$	$\Delta y (mm)$	Süneklik	Enerji
K3-1	339,54	288,61	109,80	21,98	5,00	36.815
K3-2	330,11	280,59	95,30	20,98	4,54	30.481
K3-3	324,48	275,81	110,18	19,38	5,69	37.089

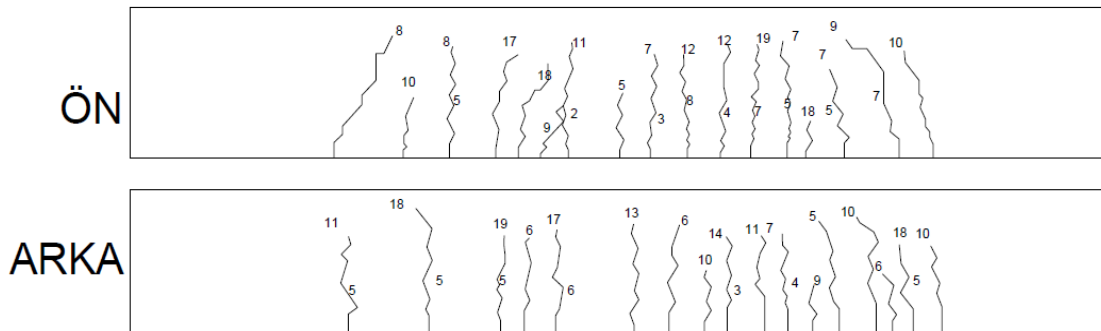
Toplamda 3 farklı gruptan oluşan 8 kiriş numunesi, tam ölçekli 4 noktalı eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin yük-deformasyon grafikleri, enerji sönümleme kapasiteleri, süneklik değerleri, başlangıç rijitliği, eğilme rijitliği ve sekant rijitliği gibi değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada donatı düzeninin etkisi irdelenirken demet donatı kavramı üzerinde yoğunlaşmış olup, aynı çekme donatısı oranına sahip

demet donatılı kesit ile tekil donatılı kesit arasında anlamlı bir farklılık gözlemlenmemiştir.

Aşağıda K1 kiriş grubuna ait çatlak desenleri aşağıda Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’te gösterilmiştir. Deney sonunda, oluşan çatlakların K1-1 kirişinde, K1-2 kirişine göre daha yaygın olduğu gözlemlenmektedir. K1-2 kirişinde ($\Phi 12$ donatıların kullanıldığı kesit) donatılar kesme bölgesine ulaşmadan eğilme bölgesinde yoğunlaşmışken, K1-1 kirişinde ($\Phi 14$ donatıların kullanıldığı kesit) çatlaklar kesme bölgesine doğru ilerlemiştir.

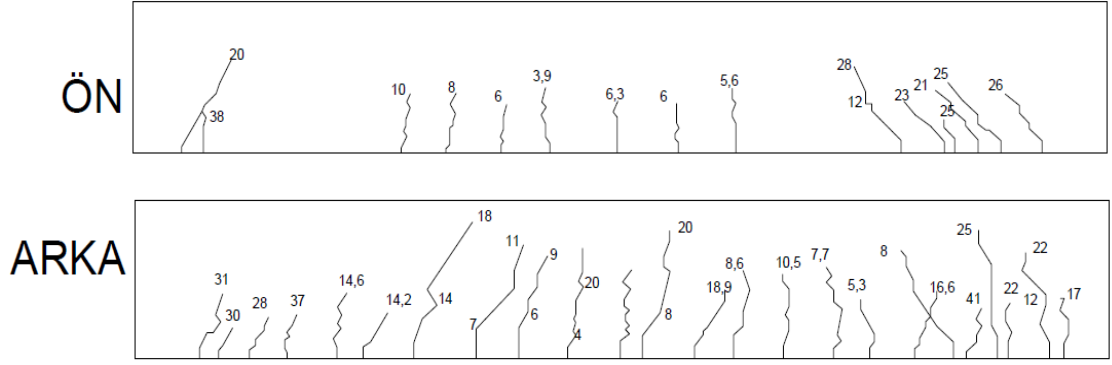


Şekil 5.4. K1-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni

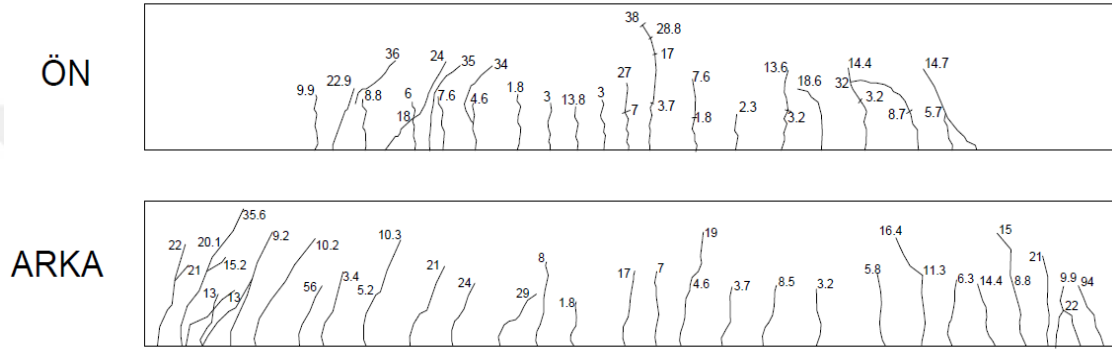


Şekil 5.5. K1-2 girişine ait deney sonu çatlak deseni

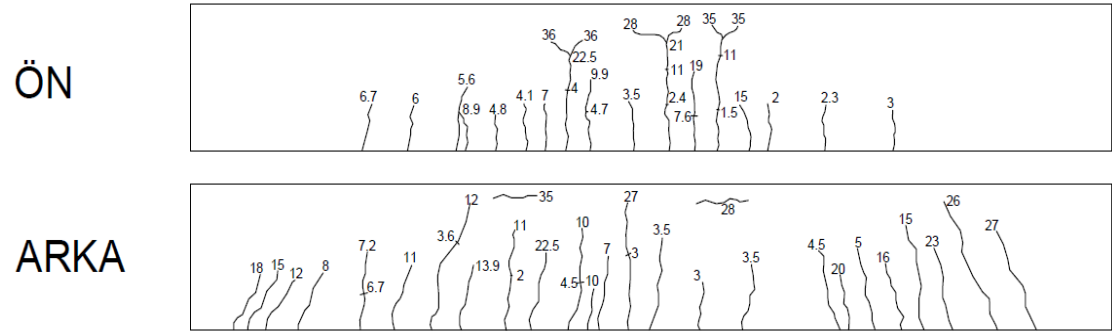
Aşağıda K2 kırış grubuna ait çatlak desenleri aşağıda Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Çatlak desenlerinin yaygınlığı (eğilme bölgesinden kesme bölgesine doğru ilerlemesi) yaygından seyrek duruma sırasıyla, K2-2 ($\Phi 12$ - demet donatı) > K2-1 ($\Phi 14$ - demet donatı) > K2-3 ($\Phi 22$ - tekil donatı) olarak görülmektedir.



Şekil 5.6. K2-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni

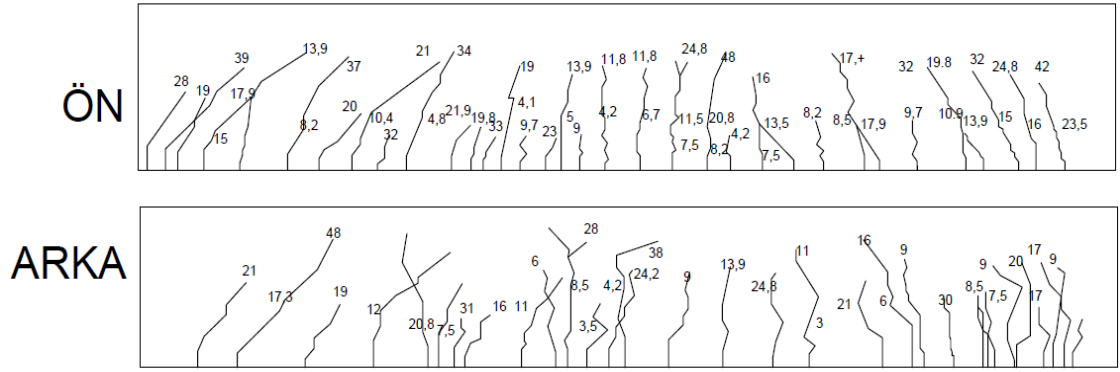


Şekil 5.7. K2-2 kirişine ait deney sonu çatlak deseni

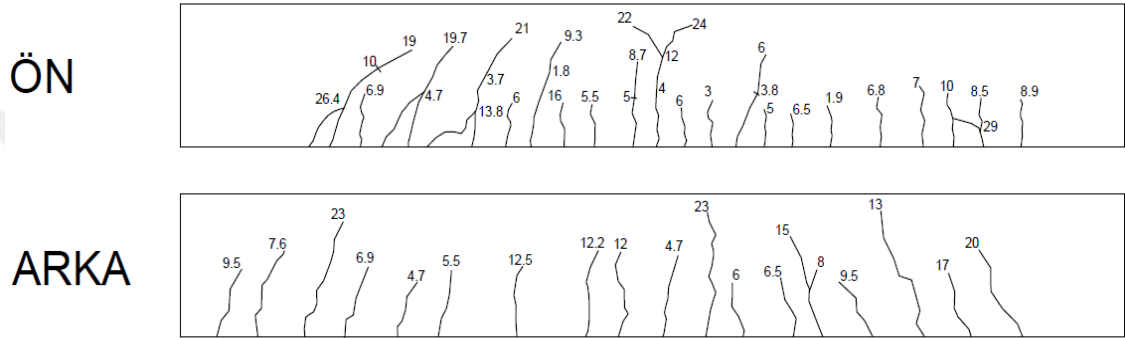


Şekil 5.8. K2-3 kirişine ait deney sonu çatlak deseni

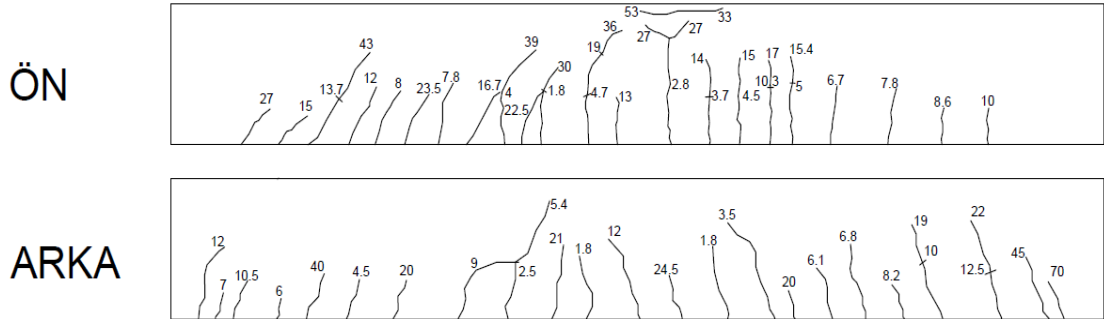
Aşağıda K3 kiriş grubuna ait çatlak desenleri aşağıda Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Deney sonunda, oluşan çatlak desenlerinin yaygınlığı (eğilme bölgesinden kesme bölgesine doğru ilerlemesi) yaygından seyrek duruma sırasıyla, K3-1 ($\Phi 14$ - demet donatı) > K3-3 ($\Phi 22$ - demet donatı) > K3-2 ($\Phi 12$ - tekil donatı) olarak görülmektedir.



Şekil 5.9. K3-1 kirişine ait deney sonu çatlak deseni



Şekil 5.10. K3-2 kirişine ait deney sonu çatlak deseni



Şekil 5.11. K3-3 kirişine ait deney sonu çatlak deseni

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318, 1995. Building code requirements for structural concrete: (ACI 318-11); and commentary (ACI 318R-95). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- AUTOCAD. 2022. Computer Aided Desing Program, Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- Cairns, J., Conforti, A. and Plizzari, G. A. 2021. Local bond behavior of bundled bars: Experimental investigation. *Structural Concrete*, (22), 2322-2337.
- Cao, X., Ren, Y., Qian, K., Fu, F., Deng X. and Zhang W. 2022. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance concrete beams with different reinforcement. *Structures*, (41), 969-981.
- Guo, S., He, H., Liu, C., Cheng S. and Liu, H. 2021. Theoretical and experimental study on shearing capacity of concrete beams reinforced with carbon fiber truss. *Composite Structures*, (258), 223-263.
- IS456-2000, 2000. Indian Standard Plain and Reinforced Concrete Code of Practice. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- Liu, Q. W., Tang, B., Subesh, B. and Gao, C. H. 2018. Research on the bond-anchorage behavior of HRB500 bundled bars. *Advances in Engineering Research*, (120), 2352-5401.
- Maranan, G. B., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena W. and Mendis, P. 2015. Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. *Engineering Structures*, (101), 529-541.
- Özhan, V. K. 2012. Farklı beton sınıflarına bağlı betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin deneysel olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitim Ana Bilim Dalı, 58, Afyonkarahisar.
- Raouf, Z. and Ali, Z. M. 1983. Assessment of concrete characteristics at an early age by ultrasonic pulse velocity. *Journal of Building Research*, 2(1), 31-44.
- Response2000, 2000. Sectional Analysis Program. Lisans Free, University of Toronto, Canada.
- SAP2000, 2021. Structural Analysis and Desing. Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- Standards Association of Australia, 2009. Concrete structures: AS 3600-2009. Homebush, N.S.W: Standards Australia.

- Sun, Z., Feng, D., Sun, Y., Yuan J., Li, X. and Wei, Y. 2021. Bond-slip behavior of bundled steel/FRP bars and its implementation in high-fidelity FE modeling of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, (286), 618-950.
- Sun, Z., Fu, L., Feng, D., Vatuloka, A., Wei, Y. and Wu, G. 2019. Experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with bundled hybrid steel/FRP bars. *Engineering Structures*, (197), 141-296.
- Şahin, B. 2023. Betonarme kirişlerde beton kür koşullarının eğilme davranışı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 221, Erzurum.
- Testlab Basic, 2021. Teknik Destek Grubu Veri Toplama Yazılımı. Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS 1247, 2018. Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Şartlarında). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS 708, 2016. Çelik - Betonarme için - Donatı Çeliği. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turgut, P. and Küçük, O. F. 2006. Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurement in concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 42(11), 745-751.
- Walujodjati, E., Tjondro, J., Farida, I. and Permana, S. 2021. The influence of concrete compressive strength on bonding of concrete bundled bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (1098), 22-57.
- Walujodjati, E., Tjondro, J., Permana, I., Permana, S. and Joharil, G. J. 2021. Study of flexural strength on concrete bundled bars beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (1098), 57-62.
- Yılmaz, M. 2016. Farklı donatı düzenine sahip betonarme yüksek kirişlerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 134, Trabzon.
- Zhou, B., Wu, R., Lu, S. and Yin, S. 2021. A general numerical model for predicting the flexural behavior of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, (239), 141-296.