



**BETONARME KİRİŞLERDE BETON KÜR
KOŞULLARININ EĞİLME DAVRANIŞI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Burak ŞAHİN

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

2023

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BETONARME KİRİŞLERDE BETON KÜR KOŞULLARININ EĞİLME
DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Burak ŞAHİN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2023

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.

15 / 09 / 2023

Burak ŞAHİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KİRİŞLERDE BETON KÜR KOŞULLARININ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Burak ŞAHİN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

219M403 kod nolu "*Soğuk Havalarda (Kışın) Dökülmüş Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi*" başlıklı TÜBİTAK1001 projesi kapsamında fonlanan bu tez çalışmasında, sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında ve yaz koşullarında (atmosfere açık alanda) aynı beton karışımından imal edilen toplam 6 adet 4.5 m açıklığında tam ölçekli betonarme kirişin eğilme etkisi altındaki davranışları deneysel olarak karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın amacı beton dökümü sonrası sabit sıcaklık altında bekletilen betonarme kirişlerin atmosferik hava koşullarında bekletilen kirişler ile eğilme davranışı bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Deneysel inceleme sonucunda laboratuvar ortamında bekletilen betonarme kirişlerin çatlama momentlerinin atmosferik koşullarda bekletilen muadil numunelerden ~%10-40 mertebesinde daha yüksek olduğu akma momentlerinin ise anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir. Başlangıç rijitliği, enerji sönümleme kapasitesi, kesit ve eleman süneklik değerleri ve çatlak dağılımları bakımından laboratuvar ortamında bekletilen betonarme kiriş numunelerinin atmosferik koşullarda bekletilen numunelere kıyasla daha üstün performans gösterdikleri görülmüştür.

2023, 195 sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kiriş, Eğilme Davranışı, Tam Ölçek, Beton Kürü, Deneysel İnceleme

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CONCRETE CURING CONDITIONS ON THE FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Burak ŞAHİN

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 within the scope of the TÜBİTAK 1001 project titled "*Experimental Evaluation of Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Cast- in Cold (Winter) Weather*" with code number 219M403; a total of 6 reinforced concrete beam specimens with the span of 4.5 meters were produced from the same concrete mixture and kept in a constant temperature laboratory environment and summer conditions (in an area open to the atmosphere) and the behaviour of the full-scale reinforced concrete beams under bending effect was examined experimentally and comparatively. The aim of the study is to comparatively evaluate the flexural behaviour of reinforced concrete beams kept under constant temperature after concrete pouring with that of the beams kept under atmospheric weather conditions. As a result of the experimental examination, it was determined that the cracking moments of the reinforced concrete beams kept in the laboratory were ~10-40% higher than the equivalent samples kept under atmospheric conditions; and that there was no significant difference in between the yield moments. It was observed that the reinforced concrete beam samples kept in the laboratory environment showed superior performance compared to the samples kept in atmospheric conditions in terms of initial stiffness, energy absorption capacity, section and element ductility values and crack distribution patterns.

2023, 195 page

Keywords: Reinforced concrete beam, Flexural behaviour, Full scale, Concrete curing, Experimental investigation

TEŞEKKÜR

Bana olan güvenini her zaman hissettiğim, bu uzun soluklu bilim yolculuğumda ülkeme faydalı olma çabalarımı destekleyen, her konuda bilgi birikimini aktaran saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU'ya müteşekkir olduğumu bildirmek isterim.

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

Tez çalışması döneminde hiçbir desteğini esirgemeyen Muhammet ŞAHİN, Burak GEDİK, Dursun Burak ÖZDOĞAN, Enes KANDEMİR, Muhammet Enes ÇELEBİ, Sabri AYDEMİR, Muhammet TAŞÇI ve Hilmi KARADAYI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmasında her türlü moral ve motivasyon desteklerinden dolayı Yunus KARABABA, İsmail Hakkı TARHAN, Muhammet ÇAKIR ve Semih DURAN'a teşekkür ederim.

Uzun soluklu bilimsel çalışma döneminde maddi-manevi her türlü destek sağlayan babam Hüseyin ŞAHİN, ablam Betül ŞAHİN ve Ümit ŞAHİN'e teşekkür etmeyi borç bilirim. Bu uzun soluklu yola çıkışımda bana yol göstermiş ve her zaman manevi desteğini hissettiğim rahmetli annem Aysel ŞAHİN'e en içten dilek ve dualarımla teşekkürlerimi sunarım.

Burak ŞAHİN
Eylül 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	16
3.1. Laboratuvar ve Atmosfere Açık Koşullarda Deney Numunelerinin Hazırlanması .	17
3.1.1. Betonarme kiriş numunelerinin tasarımı	18
3.1.2. Betonarme kiriş numunelerinin imalat koşulları.....	22
3.1.3. Betonarme kiriş numunelerinin çelik donatı kafeslerinin imalatı	23
3.1.4. Ahşap kalıp imalatı	26
3.1.5. Betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık takibi	27
3.1.6. Beton dökümü, bakımı ve malzeme özelliklerinin tayini	31
3.1.7. Betonarme kirişlerin termal genleşme katsayılarının tayini üzerine deneysel çalışma	37
3.1.8. Deney düzeneğinin tasarımı, imalatı ve kontrolü	40
3.1.9. Ölçüm düzeneği	47
3.1.10. Pilot deneyler ve yükleme düzeneğinin kontrolü.....	51
3.1.11. Betonarme kiriş eğilme deneyi	57
3.1.12. Deneysel verinin işlenmesi	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	67
4.1. Sıcaklık Ölçümleri	67
4.1.1. Döküm anında sıcaklık takibi.....	67
4.1.2. Kiriş numune sıcaklık takibi	70
4.1.3. Kiriş betonu olgunluk indeksi hesaplamaları	76
4.1.4. Kalıp alma anındaki donatı, beton ve atmosfer sıcaklıkları	85

4.2. Beton ve Çelik Malzeme Deney Sonuçları	92
4.2.1. Beton malzeme dayanım tayini çalışmaları	92
4.2.2. Çelik malzeme dayanımı ve sınıfının tayini çalışması.....	103
4.3. Betonarme Kiriş Numunelerinin Termal Genleşme Katsayılarının Belirlenmesi Üzerine Deneysel Çalışma Sonuçları.....	113
4.4. Kiriş Yükleme Deneyi Sonuçları	122
4.4.1. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri	123
4.4.2. Moment-eğrilik grafikleri ve etkin kesit rijitliği çarpanı	136
4.4.3. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden başlangıç rijitliğinin hesaplanması	147
4.4.4. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden enerji sönümleme kapasitelerinin hesaplanması.....	147
4.4.5. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden süneklik oranlarının hesaplanması	149
4.4.6. Moment-eğrilik grafikleri üzerinden süneklik değerlerinin hesaplanması	150
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	152
KAYNAKLAR	155
EKLER.....	162
EK-1	162
EK-2	163
EK-3	190
EK-4	193

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
α	Termal genleşme katsayısı
σ	Gerilme
σ_s	Çelik çekme gerilme
ϵ	Birim şekil değiştirme
ΔL	Boy değişimi
ΔT	Sıcaklık değişimi
Δt	Zaman aralığı
A	Atmosfere açık yüzey alanı
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
kg	Kilogram
L	Boy
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
M_r	Moment taşıma kapasitesi
M_{cr}	Kesitin çatlama momenti
V	Hacim

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
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)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör)
UPS	Uninterruptible Power Supply (Kesintisiz güç kaynağı)
UPV	Ultrasonik atılımı dalgı hızı
RC	Reinforced Concrete (Betonarme)
S	Summer (Yaz)
S1	K1 kesitli kiriş numunesi
S2	K2 kesitli kiriş numunesi
S3	K3 kesitli kiriş numunesi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TS	Türk Standartı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Betonarme taşıyıcı sistem yük aktarım mekanizması (Anonim 2020b).....	3
Şekil 3.1. Sıcaklık ölçümleri, (a) Laboratuvar koşulları sıcaklık ölçümü, (b) Atmosfere açık koşulların sıcaklık ölçümü.	17
Şekil 3.2. Laboratuvar ve atmosfere açık ortamların sıcaklık takip grafiği.....	18
Şekil 3.3. Betonarme kiriş deney numunelerinin tasarlanan kesit özellikleri.....	19
Şekil 3.4. K1 kesitli kiriş donatı detayı.....	21
Şekil 3.5. K2 kesitli kiriş donatı detayı.....	21
Şekil 3.6. K3 kesitli kiriş donatı detayı.....	22
Şekil 3.7. Çelik donatı mekanik özelliklerinin incelenmesinde çekme deneylerine genel bir görünümü.	24
Şekil 3.8. Çelik Donatı Kafesi, (a) ve (b) İmalat aşaması, (c): İmalat sonrası genel görünümü.....	25
Şekil 3.9. Ahşap kalıp imalat aşamasına ait genel görüntüler (a) ve (b): Atmosfere açık koşullarda ahşap kalıp imalatı, (c): Laboratuvar koşullarında ahşap kalıp imalatı.	26
Şekil 3.10. K Tipi Termokupl Yerleşim Şeması.....	27
Şekil 3.11. Sıcaklık takibi için yapılan çalışmalara ait genel görüntü, (a) Kalıp temizliği, (b) ve (c) Sensör yerleşimi işlemi çalışmalarına ait genel görüntü.	28
Şekil 3.12. Sıcaklık takibinde kullanılan araç ve gereçler, (a) K tipi termokupl, (b): Veri toplama sistemi.	30
Şekil 3.13. Sıcaklık takip işlemi, (a) Laboratuvar koşullarında sıcaklık takibi, (b) Atmosfere açık koşullarda sıcaklık takibi, (c) Veri toplama sisteminin yazılım arayüzü.....	30
Şekil 3.14. Memişoğlu Erzurum Beton A.Ş beton üretim santrali	32
Şekil 3.15. Betonarme kirişler ve örnek numune alma işlemi, (a), (b) ve (c) Laboratuvar koşullarında beton döküm işlemi, (d), (f) ve (g) Atmosfere açık koşullarda gerçekleştirilen beton dökümü işleminin genel görüntüler.	33
Şekil 3.16. Atmosfere açık koşullarda bekletilen betonarme kirişler	34
Şekil 3.17. Laboratuvar koşullarında bekletilen betonarme kirişler	34
Şekil 3.18. Betonarme kiriş numunelerin nemli tutulma işlemi	34
Şekil 3.19. Laboratuvarda mevcut bulunan universal test cihazlarının genel görünümü.....	35

Şekil 3.20. Tahribatlı yöntemler ile beton mekanik özelliklerinin belirlen, (a) ve (b) Yarmada çekme deneyleri, (c) ve (d) Eğilmede çekme deneyleri, (e) ve (f) Eksenel basınç deneyleri.	36
Şekil 3.21. Tahribatsız yöntemlerle yapılan beton numune deneyleri: (a); Schmidt çekici (Beton Test Çekici)” yöntemi, (b); ultrasonik atılımı dalga hızı (UPV) ölçüm yöntemi.....	37
Şekil 3.22. Betonarme kiriş numuneleri sıcaklık-deformasyon ölçüm düzeneği, (a): Kiriş numunesi sol uç yerleşimi, (b): Kiriş numunesi sağ uç potansiyometrik cetvel sensör yerleşimi.....	39
Şekil 3.23. Sıcaklık-deformasyon ölçümü ait genel görünüm ve kullanılan yazılım arayüzü, (a) Sıcaklık-deformasyon takibi için oluşturulan deney düzeneği, (b) Veri toplama istemi yazılımının arayüzü.	40
Şekil 3.24. Response2000 yazılımında betonarme kiriş analizi, (a) Response2000 yazılımında K3 kesitli betonarme kiriş numunesinin oluşturulması, (b) Deneyisel olarak belirlenen malzeme dayanımları ile yapılan kesit analizi.	41
Şekil 3.25. Çelik çerçeve yükleme düzeneği ön görünüşü	42
Şekil 3.26. Yükleme düzeneği yan görünüşü.....	43
Şekil 3.27. Tekla Structures (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli .	43
Şekil 3.28. SAP2000 (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli	44
Şekil 3.29. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne tasarımı	44
Şekil 3.30. Yükleme çerçevesinin deneysel çalışma alanına yerleştirilmesi	45
Şekil 3.31. Yükleme çerçevesi ve portatif vinçlerin genel görünümü.....	46
Şekil 3.32. Yükleme çerçevesi mesnet detayı.....	46
Şekil 3.33. Hidrolik piston strock uzunluğunun kontrolü.....	47
Şekil 3.34. Yük ölçümünde kullanılan CAS marka yassı yük hücresi	47
Şekil 3.35. Deformasyon ölçümlerinde kullanılan sensörlerin genel görünümü.....	48
Şekil 3.36. Betonarme kiriş numunelerinin yük ve deformasyon ölçüm sensörlerinin yerleşim planı.	49
Şekil 3.37. Deneysel çalışmada kullanılan veri toplama sistemi genel görünümü.....	50
Şekil 3.38. Yükleme çerçevesi ve veri toplama sisteminden oluşan deney düzeneği	50
Şekil 3.39. Betonarme pilot kiriş numunelerin taşınması işleminin genel görünümü	51
Şekil 3.40. Betonarme pilot kiriş numunelerinin yükleme düzeneğine alınması işlemine ilişkin genel görünümü.....	52
Şekil 3.41. PİLOT – 1 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni	53

Şekil 3.42. PİLOT-1 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.....	53
Şekil 3.43. Yük aktarma mekanizması yapılan değişiklik, (a) PİLOT-1 deney sırasında yük hücresi aktarma mekanizması, (b) PİLOT-2 deney sırasında yük hücresi aktarım mekanizması.	54
Şekil 3.44. PİLOT – 2 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni.....	55
Şekil 3.45. PİLOT-2 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.....	56
Şekil 3.46. PİLOT – 3 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni.....	56
Şekil 3.47. PİLOT-3 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.....	57
Şekil 3.48. K1 kesitli pilot deney numunelerinin yük- orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.....	57
Şekil 3.49. Eğrilik hesaplamalarında kullanılacak yatay deformasyon sensörlerinin yerleşimi.....	60
Şekil 3.50. Deneye hazır betonarme kiriş numunesinin, (a) Deney öncesi ön cephe, (b) Deney öncesi arka cephe genel görüntüsü.	60
Şekil 3.51. Deney sonrası çatlaklar arasında mesafe ölçümü.....	61
Şekil 3.52. Deney sonrası muhafaza edildiği rezerv alana alınan betonarme kiriş numuneleri.....	61
Şekil 3.53. Betonarme kiriş numunelerinin, (a) Enerji sönmleme kapasitelerinin, (b) Süneklik hesaplama yöntemi.....	65
Şekil 3.54. Yük-Orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri üzerinden başlangıç rijitliğinin hesaplama yöntemi.....	65
Şekil 4.1. BS0-S3 kirişi sıcaklık takip grafiği	71
Şekil 4.2. BS1-S3 kirişi sıcaklık takip grafiği	74
Şekil 4.3. Katkısız betonla imal edilen kiriş betonlarının 0-72 saat aralığındaki sıcaklık-zaman faktörü gelişimleri.	82
Şekil 4.4. Katkısız betonla imal edilen kiriş numuneleri için 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü ve eksenel basınç dayanımı grafiği.	83
Şekil 4.5. 22,8°C’ de laboratuvar ortamında bakımı yapılmış silindir beton numuneleri için örnek bir dayanım-olgunluk faktörü ilişkisi, ACI PRC-306 (2016).....	84
Şekil 4.6. Diferansiyel iç sıcaklık nedeniyle beton kütledeki gerilme dağılımı (Crowley 2014).....	86

Şekil 4.7. Beton duvarlar için güvenli diferansiyel sıcaklığın grafiksel tespiti, (Mustard and Ghosh 1979).....	91
Şekil 4.8. Kiriş imalatında kullanılan betonların eksenel basınç dayanımı değerleri.....	94
Şekil 4.9. Kiriş imalatında kullanılan beton basınç dayanımı gelişimi (%).....	95
Şekil 4.10. 28 günlük yarmada çekme dayanımına oranla tüm beton gruplarının çekme dayanımı kazanma oranları.....	103
Şekil 4.11. Çelik donatı çubuklarının çap ölçümlerinden genel görüntüler, (a) Ø8 çelik donatı çubukları, (b) Ø12 çelik donatı çubukları, (c) Ø14 çelik donatı çubukları.	104
Şekil 4.12. Ø8, Ø12 ve Ø14 donatı çubukları nervür detay görüntüleri.....	105
Şekil 4.13. Çelik donatı çubuklarının nervür aralıklarının ölçüm çalışmalarından görüntüler, (a) Ø8 çelik donatı çubukları, (b) Ø12 çelik donatı çubukları, (c) Ø14 donatı çubukları.	105
Şekil 4.14. TS708 (2016) uyarınca nervür geometrileri	107
Şekil 4.15. TS 708 (2016) uyarınca çelik donatı sınıfları ve sağlanması gereken mekanik özellikler.	107
Şekil 4.16. Ø8 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	108
Şekil 4.17. Ø12 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri ..	109
Şekil 4.18. Ø14 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri ..	111
Şekil 4.19. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-zaman grafikleri.....	114
Şekil 4.20. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-zaman grafikleri.	115
Şekil 4.21. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon-zaman grafikleri.....	116
Şekil 4.22. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon-zaman grafikleri.....	116
Şekil 4.23. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-deformasyon grafikleri.	117
Şekil 4.24. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-deformasyon grafikleri.....	118
Şekil 4.25. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon pik noktalarından elde edilen deformasyon-zaman grafikleri.....	119

Şekil 4.26. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon pik noktalarından elde edilen deformasyon-zaman grafikleri.	120
Şekil 4.27. Betonda için çekme σ - ϵ modeli (Ersoy ve Özcebe 2017)	121
Şekil 4.28. BS1-S3 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği	123
Şekil 4.29. BS0 grubu kirişlere ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri	125
Şekil 4.30. BS1 grubu kirişlere ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri	126
Şekil 4.31. K1 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.	127
Şekil 4.32. K2 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.	127
Şekil 4.33. K3 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.	128
Şekil 4.34. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.....	130
Şekil 4.35. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.....	131
Şekil 4.36. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.....	132
Şekil 4.37. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri	134
Şekil 4.38. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri	135
Şekil 4.39. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri	136
Şekil 4.40. Deneysel ve teorik moment-eğrilik grafikleri, (a): BS0-S1 kiriş numunesine ait grafik, (b): BS1-S1 kiriş numunesine ait grafik.	137
Şekil 4.43. Moment-eğrilik ilişkisi üzerinden etkin kesit rijitliğinin (EI_e) belirlenmesi	139
Şekil 4.42. Betonarme kiriş numunelerinin deneysel çalışma sonucu çizdirilen moment-eğrilik grafikleri, (a) BS0-S1 kiriş numunesine, (b) BS1-S1 kiriş numunesine ait moment-eğrilik grafikleri.	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deney numunelerinin çelik donatı detayları.....	20
Çizelge 3.2. Betonarme kiriş deney numunelerinin imalat koşulları.....	22
Çizelge 3.3. Betonarme kiriş numunelerinin isimlendirilmesi	23
Çizelge 3.4. Numune döküm ve bakım sürecince alınan sıcaklık ölçümlerine ilişkin veri tablosu.	31
Çizelge 3.5. Betonarme kiriş numunelerin döküm zamanları ve döküm anındaki atmosferik sıcaklıkları.	31
Çizelge 3.6. C30/37 sınıfı beton karışım reçetesi	32
Çizelge 4.1. Beton döküm anında sıcaklık takibi	68
Çizelge 4.2. Tüm gruplar için ortalama sıcaklık ölçüm verisi.....	68
Çizelge 4.3. K3 kesitli betonarme kiriş numuneleri için ortalama sıcaklık ölçüm verisi.....	68
Çizelge 4.4. BS0-S3 kirişi sıcaklık takibi çalışmasında ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.	72
Çizelge 4.5. BS1-S3 kirişi sıcaklık takibi çalışmasında ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.	75
Çizelge 4.6. Tüm beton grupları için 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü ve tahribatlı eksenel basınç dayanımı testi ile elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri.....	81
Çizelge 4.7. 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü değerleri üzerinden Şekil 4.5'te sunulan olgunluk indeksi-dayanım ilişkisi kullanılarak yapılan beton dayanımı tahmini değerleri.	85
Çizelge 4.8. 72 saat sonunda kalıp alınma işlemi esnasında ölçülen donatı yüzeyi, beton içi, beton yüzeyi ve atmosferik hava sıcaklıkları.	86
Çizelge 4.9. K3 kesitli kiriş numunelerinin 72 saat sonunda beton içi ve beton yüzeyi arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan beton çekme gerilmeleri.....	90
Çizelge 4.10. Kiriş imalatında kullanılan beton eksenel basınç dayanımı değerleri	93
Çizelge 4.11. Betonarme kiriş imalat ve deney tarihleri.....	93
Çizelge 4.12. Numune gruplarının kiriş deneyi günü eksenel basınç dayanımları.....	95
Çizelge 4.13. Ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri üzerinden Raouf and Ali (1983) çalışmasında sunulan kalibrasyon bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı tahmin.....	97

Çizelge 4.14. Ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri üzerinden Turgut and Kucuk (2006) çalışmasında sunulan kalibrasyon bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı tahmin.	97
Çizelge 4.15. Sertlik çekici okumaları üzerinden yapılan eksenel basınç dayanımı tahmin değerleri.	98
Çizelge 4.16. Ultrasonik atımlı dalga hızı ve sertlik çekici uygulamaları ile yapılan beton eksenel basınç dayanımı tahminlerindeki rölatif hata oranları.	99
Çizelge 4.17. Beton gruplarının 28 günlük eğilmede çekme dayanımları.....	100
Çizelge 4.18. Beton gruplarının 3, 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları.....	102
Çizelge 4.19. TS 708 (2016) uyarınca nervür aralığı sınır ve ölçüm değerleri.	106
Çizelge 4.20. Ø8 nervürlü çelik çubuklara ait eksenel çekme deneyi sonuçları.....	109
Çizelge 4.21. Ø12 nervürlü çelik çubuklara ait eksenel çekme deneyi sonuçları.....	110
Çizelge 4.22. Ø14 nervürlü çelik çubuklara ait eksenel çekme deneyi sonuçları.....	111
Çizelge 4.23. Teorik hesaplarda kullanılmasına karar verilen çelik donatı mekanik özellikleri.	113
Çizelge 4.24. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayıları.....	120
Çizelge 4.25. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayıları.	121
Çizelge 4.26. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri ...	129
Çizelge 4.27. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri ...	130
Çizelge 4.28. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri ...	132
Çizelge 4.29. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri.	133
Çizelge 4.30. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri.	134
Çizelge 4.31. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri.	135
Çizelge 4.32. K1 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri	143
Çizelge 4.33. K2 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri	143
Çizelge 4.34. K3 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri	143
Çizelge 4.35. Tüm kirişler için M_{cr}/M_y oranları	144
Çizelge 4.36. K1 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları.....	145
Çizelge 4.37. K2 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları.....	146

Çizelge 4.38. K3 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları.....	146
Çizelge 4.39. K1 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri	147
Çizelge 4.40. K2 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri	147
Çizelge 4.41. K3 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri	147
Çizelge 4.42. K1 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri	148
Çizelge 4.43. K2 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri	148
Çizelge 4.44. K3 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri	148
Çizelge 4.45. K1 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	149
Çizelge 4.46. K2 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	149
Çizelge 4.47. K3 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	149
Çizelge 4.48. K1 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	150
Çizelge 4.49. K2 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	150
Çizelge 4.50. K3 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri.....	150

1. GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de çelik konstrüksiyon, betonarme, yığma yapı vb. birçok taşıyıcı sistemler kullanılmaktadır. Ancak hem ekonomik olması hem de farklı mimarilere olanak sağlaması açısından betonarme taşıyıcı sistemlerin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Betonarme taşıyıcı sistem, çelik ve betonun bir arada kullanılmasıyla meydana gelmektedir. Yapı malzemesi olarak kullanılan betonun eksenel basınç dayanımının çekme dayanımına nazaran oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Gevrek bir malzeme olan betonun çekme dayanımının zayıf olması nedeniyle yapılarda meydana gelecek çekme kuvvetlerini karşılamak için çelik donatılar kullanılmaktadır. Mekanik davranış, fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından birbirinden oldukça farklı olan bu iki yapı malzemesinin yegnae ortak özellikleri termal genleşme katsayılarının birbirine oldukça yakın olmasıdır (Anonim 2020a). Bu da çelik ve betonun bir arada kullanılarak yapısal taşıyıcı sistemler üretilmesini mümkün kılmıştır.

Dünya üzerinde betonarme yapıların hesap ilkelerini ve imalat şartlarını belirleyen sayısız yönetmelik mevcuttur. Bu yönetmelikler ülkelerin bulunduğu coğrafyaya ve betonarme elemanların kullanım amaçlarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Genellikle yapım koşulları ve uygulanması gereken bakım kuralları belirtilmiş olup sınır şartlara uygun tasarım yapılarak imalata geçilmektedir. Burada yönetmeliklerin hazırlanması süreci önem arz etmektedir. Betonarme eleman ve sistemlerin deneysel olarak incelendiği çalışmalar yönetmeliklerin çıkış noktalarıdır. İşleyişte laboratuvar ortamında imal edilen betonarme eleman ya da sistemler deneye tabi tutularak hedef parametreler üzerinden performans değerlendirmesi yapılır ve hatta eksik deneylerin yapılması yerine deneysel veri ile doğrulanmış yapısal analiz modelleri üzerinde analitik, nümerik çalışmalar gerçekleştirilir. Çalışma sonucunda derlenen veri yönetmeliğe kural, yöntem olarak aktarılır. Bilhassa yönetmelikte yer alan hesap ilkelerinin sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında imal edilmiş ve bakımı yapılmış betonarme elemanlar üzerinde çalışıldığı unutulmamalıdır. Oysa betonarme imalat atmosfere açık hava koşullarında gerçekleştirilmektedir. Dünyanın neresinde olursa olsun beton dökümünü takip eden ilk 24 saat içerisinde bile en az iki ısınma ve soğuma çevrimi gerçekleşmektedir. Bu durumun betonarme eleman mekanik davranışını etkilemesi, büyük ölçüde sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında imal edilen elemanlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler

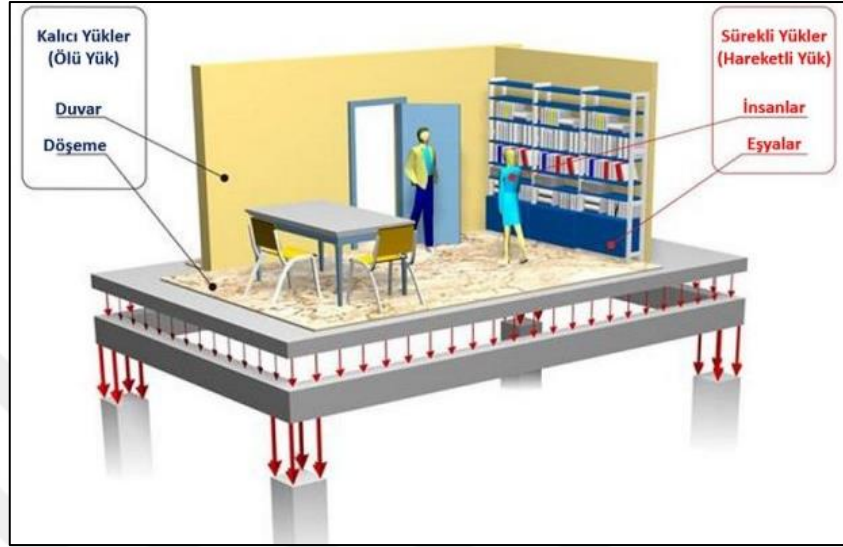
neticesinde elde edilen hesap ilkeleri ile yapılan tasarımın sahada sapma göstermesinin muhtemel olduğu düşünülmektedir. Özellikle gece-gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde laboratuvar koşullarında üretilen yönetmelik ilkeleri ile tasarlanan yapısal elemanlar ile şantiye ortamında imalatı gerçekleştirilen yapı elemanlarının, dayanımları ve yapısal davranışları açısından ne ölçüde birbirleriyle uyumlu olduğu bir araştırma ve tartışma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez çalışması da esasen bu husus üzerine kurgulanmıştır. Elbette yönetmelikler sadece laboratuvar deneyleri üzerine kurgulanmamaktadır. Özellikle deprem sonrası saha gözlemleri, ilave analitik, nümerik çalışmalar da yönetmelik oluşumlarında rol oynamaktadır. Bu çalışmanın laboratuvar deneyleri üzerine bir irdeleme olduğunun altı çizilmelidir.

Dünyanın belirli bölgelerinde bölgesel iklim özellikleri dikkate alındığında özellikle karasal iklim bölgelerinde gece ve gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu bilinmektedir. Beton ve çeliğin birlikte kullanılmasının başlıca nedenleri, bu iki malzemenin birbiriyle sağladığı aderans ve termal genleşme katsayısının birbirleriyle oldukça yakın olmasıdır. Bu iki malzemeye kompozit olarak imal edilen taşıyıcı elemanlarda, yapının mevcut durumundaki statik yükleri ve deprem sırasında oluşabilecek dinamik yükleri dengeli bir şekilde birbirine aktararak yapısal hasarın oluşması istenmemektedir. Cai et al. (2022) çalışmalarında beton numuneler üzerinde gece gündüz sıcaklık farkının fazla olması ve buna bağlı olarak hidrasyon aşamasında meydana gelen termal genleşmenin neden olduğu kılcal çatlakların yapısal hasara neden olduğunu vurgulamıştır.

Betonarme taşıyıcı sistem temel olarak çerçeve elemanları (kiriş, kolon, perde duvar) ile plak/kabuk elemanlardan (döşeme, temel, merdiven, kubbe, vb.) oluşur. Ancak basit taşıyıcı sistemlerin genel olarak döşeme, kiriş, kolon olmak üzere üç temel yapı elemanından müteşekkil olduğunu ifade etmek mümkündür. Yük aktarım mekanizmasının Şekil 1.1’de sunulduğu üzere; döşemenin ölü ağırlığı ve üzerine gelen yayılı yükler kirişlere çizgisel olarak, kirişlerin ise bu yükleri ve kendi ağırlığını noktasal olarak kolonlara iletecek şekilde gerçekleştiği bilinmektedir (Anonim 2020b). Döşemeden gelen yükleri kolonlara aktarmakla sorumlu olan kiriş elemanları, statik durumda eğilme elemanı olarak çalışmaktadır. Eğilme elemanlarının mukavemet açısından gerekli mekanik özellikleri karşılayabilmesi ve bunun yanında yeterli

1. GİRİŞ

sünekliliğe sahip olması gerekmektedir. Bu hususun incelendiği sayısız literatür çalışmasının en güncel olanlarından birisinde, Esen vd (2022) kiriş numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranışını incelemiş olup artan beton kalitesinin rijitlik ve enerji sönümlleme kapasitesi değerlerinde iyileşme sağladığını rapor etmiştir.



Şekil 1.1. Betonarme taşıyıcı sistem yük aktarım mekanizması (Anonim 2020b)

Eğilme elemanlarında beton, basınç kuvvetlerini karşılarken boyuna çelik donatılar çekme kuvvetlerini karşılamak ve sünekliliği sağlamak amacıyla kullanılır. Statik ve dinamik kuvvetler etkisi altında oluşacak kesme kuvvetlerini ise enine donatı olarak yerleştirilen etriyeler ve çiroz elemanlar karşılamaktadır. Yük kapasitesi, süneklik, rijitlik, eğilme kapasitesi gibi mekanik özelliklerin yanı sıra taşıyıcı elemanlarda yorulma ve sünme gibi özelliklerde yapı elemanlarında dayanıklılık ile sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir (Duran 2008). Yapı elemanlarında sürekli sabit yükler altında yorulma ve sünme olayları gerçekleşmektedir. Ayrıca, sıcaklık farkından dolayı yüksek sıcaklıklarda betonun terleme yaparak içindeki suyu kaybetmesi sonucunda oluşan iç boşluklar oluşacak ve dolayısıyla katmaların birbirine yaklaşmasıyla (büzülme olayı ile) iç gerilme meydana gelerek aynı yükler altında yapı elemanını zorlamaktadır (İlhan 2018). Bu da yapı elemanının sünme ve yorulma olayını hızlandırarak hasarlara neden olmaktadır.

Büyük ölçüde laboratuvar deneyleri sonucu üretilmiş hesap ilkelerine dayandırılan yönetmelik ve diğer teknik mevzuat dikkate alınarak tasarımı yapılan ve

atmosfere açık bir ortamda imalatı gerçekleştirilen betonarme yapı elemanları üzerinde kapsamlı bir literatür araştırması yapıldığında bu konuda deneysel çalışmaların yapılması gerektiği bir kez daha ortaya çıkmıştır. Literatür araştırmasında 1:1 ölçekli ve küçük ölçekli betonarme kirişler üzerinde Arslan (1991), Uysal (2006) ve Karahan (2008) çelik levhalar ile güçlendirme konularında; fiber takviyeli donatılar ile güçlendirme konusunda ise Barris et al. (2009), Wenjun et al. (2009), Kassam et al. (2011), Gemi vd (2018) literatürde çalışmaları mevcuttur. Özhan (2012), farklı beton sınıflarına bağlı kirişlerin eğilme kapasitelerinin deneysel olarak incelenmesi konusunda çalışmış olup, Esen vd (2022) betonarme elamanı olan kiriş numunelerinin davranışını etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Bunlara ek olarak literatürde yangına maruz kalmış kirişler üzerine çalışmaların olduğuna ulaşılmıştır. Fakat bu çalışmaların hepsi laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kür koşulları üzerine yapılan literatür araştırmalarında ise Yazıcı vd (2015), Şimşek (2004), Tanyıldız vd (2006) aynı şekilde laboratuvar ortamında çalışmalarını gerçekleştirdiği, Özcan (2017)'ın çalışmasında şantiye ortamını temsilen ıslak-kuru kür uygulamasıyla gündüz ve gece bir saat su banyosu sonrasında laboratuvar ortamında beklettiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak bu çalışmanın tam olarak şantiye ortamını temsil etmediği düşünülmektedir. Sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde ise beton basınç dayanımı üzerine çalışmalar olsa da bu çalışmaların betonarme bir eleman davranışının temsiline kullanılamayacağı açıktır.

Ülkemizde betonarme bina türü sistemlerin tasarımında TS 498 Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (1997), TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (2000) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) olmak üzere temel olarak üç mevzuat dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, şantiye ortamındaki betonarme imalat koşulları da TS 1247 Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında) (2018) standardı ile kontrol altına alınmıştır. Bir kez daha vurgulanmalıdır ki; betonarme hesap ilkelerinin büyük ölçüde dayandırıldığı deneysel çalışmalar sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmalardır. Ancak, gerçek saha koşulları bundan farklıdır. İmalat sürecinde betonarme eleman ve sistemin maruz kalacağı sıcaklık etkilerinin hesapta öngörülenin dışında bir mekanik davranışa yol açması muhtemeldir. Bu tez çalışması bu hususun tam ölçekli betonarme kirişler üzerinde kurgulanan deneysel çalışma üzerine irdelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamı betonarme kirişler ile sınırlıdır.

Bu tez çalışması kapsamında TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından “219M403: *Soğuk Havalarda (Kışın) Dökülmüş Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi*” başlığıyla desteklenen bilimsel çalışmanın yaz aylarında laboratuvar ortamında ve TS 1247 (2018)’ in geçerli olduğu yaz koşullarında (atmosfere açık alanda) aynı beton karışımından imal edilen toplam 6 adet 4,5 m açıklığında tam ölçekli betonarme kirişin eğilme etkisi altındaki davranışları deneysel olarak karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel incelemede her ne kadar aynı kesite sahip kiriş numuneleri için yük taşıma kapasitesi bakımından farklı bir davranış beklenmese de; farklı imalat koşullarının beton-çelik aderansı üzerinde etkili olabileceği ve bunun kullanılabilirlik parametrelerine etki edebileceği düşünülmüştür. Tez çalışması kapsamında farklı kür koşulu olarak sıcaklık parametresi üzerinde Erzurum gibi yaz ayları da dâhil olmak üzere gündüz ve gece sıcaklık farkının yüksek olduğu bir bölgede sabit ve değişken sıcaklık şartlarında 1:1 ölçekli (tam ölçekli) betonarme kiriş numuneleri imalatı gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında (sabit sıcaklık) ve atmosfer ortamında (değişken sıcaklık) imal edilen ve bekletilen betonarme kiriş numuneleri 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutularak; yük taşıma kapasiteleri, süneklik, moment-eğrilik ilişkileri üzerinde farklı kür koşulu olan sıcaklığın etkileri incelenmiştir. Literatürde betonarme eleman üretimlerinin genellikle laboratuvarda sabit sıcaklıklı ortamlarda gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu çalışmada temel amaç, betonarme elemanların mekanik davranışı yorumlanırken sıcaklık farkından meydana gelmesi muhtemel içyapı hasarlarının yapı elemanlarındaki mekanik davranışa etkisi yorumlanmak istenmiştir. Bu yüzden atmosfere açık ortamda üretimi yapılan kiriş numunelerine ek olarak sabit oda sıcaklığı altında laboratuvarda referans numune üretilmiş ve eğilme deneyi altında mekanik davranışları, üretildiği ortam koşullarının farklılığı göz önünde bulundurularak yorumlanmaya çalışılmıştır.

Tez kapsamında üç farklı donatı oranına sahip K1, K2 ve K3 kesitli kiriş numuneleri üretilmiştir. Donatı oranı en düşük K1, en yüksek ise K3 kesitli kiriş numunesidir. K1 ve K2 kesitli kirişler tek donatılı, K3 kesitli kirişler ise çift donatılı olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sıcaklık etkilerinin incelenmesi amacıyla K3 kesitli kiriş numunesine termokupl bağlanarak beton dökümü ile birlikte sıcaklık ölçümleri alınmıştır.

1. GİRİŞ

28 gün sonunda deneye hazır hale gelen numuneler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak mekanik davranış ve dayanımları deneysel olarak incelenmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez çalışması esas olarak sabit sıcaklıklı (23-24°C) laboratuvar ortamında ve değişken sıcaklıklı atmosferik koşullarda imalatı yapılan ve bekletilen betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsam dahilinde, noktalı eğilme deneyleri (deney yöntemleri, deney süresince dikkat edilen parametreler) ve kür şartları etkileri üzerine yapılan literatür araştırmalarına takip eden kısımda yer verilmiştir.

Shih et al. (1988), çalışmalarında, -10°C ile -70°C sıcaklık aralığında, monotonik ve tekrarlı yükleme altında beton içine gömülen deforme olmuş çubukların deneysel çalışmalarla yerel aderans gerilme-kayma ilişkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda düşük sıcaklıkta çelik donatı ile beton arasındaki aderans davranışının, +20 °C altındaki aderans davranışından oldukça farklı görmüşlerdir. Gözlenen temel farklılıkların maksimum aderans gerilmesi değerlerinde maksimum aderans gerilmesi ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişkide olduğunu belirtmişlerdir. Monotonik yükleme altında, düşük sıcaklıktaki maksimum bağ mukavemetinin normal sıcaklıktaki değere oranının, ilgili beton basınç dayanımı değerlerinin oranıyla neredeyse aynı sonuçlandığını ifade etmişlerdir.

Kwak et al. (2002), gerilme yumuşatma branşmanı ve aderans kayması dikkate alınarak betonarme (RC) kirişlerin doğrusal olmayan malzeme analizleri yapmışlardır. Çalışmalarında birçok serbestlik derecesine sahip büyük yapılar, uygulamada bazı sınırlamaları olan karmaşık katman yaklaşımını benimsemek yerine, daha önce kesit analizi yoluyla oluşturulmuş RC kesitlerinin moment-eğrilik ilişkilerini kullanmışlardır. Kullanılan sonlu eleman ağ boyutuna göre sayısal kararsızlığı azaltmak için, gerilim yumuşatma kolunu simüle eden bir ilişki dikkate almışlardır ve nihai dayanım kapasitesinin hesaplanmasındaki belirsizliği ortadan kaldırmak amacıyla, sonlu elemanlar modellemesine plastik mafsalları uzunluğunu dahil etmişlerdir. Ek olarak, kirişlerde bağ-kayma davranışını tanımlayan denklemler türetmişlerdir. Önerdikleri modelde, çift düğüm kullanılan geleneksel bağ elemanlarının aksine, her iki uçta iki düğüm tarafından yapısal tepkiyi temsil eden kiriş elemanlarını kullanmışlardır ve bağ-kayma davranışını etkin bir şekilde tanımlamanın yanı sıra sonlu elemanlar

modellemesini ve analitik süreci basitleştirmişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri algoritma, RC kesitin moment-eğrilik ilişkisine yansıtılmışlardır ve bu algoritmaların geçerliliğini belirlemek amacıyla analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon çalışmaları yapmışlardır.

Şimşek (2004) çalışmasında, eğik yüzeyli beton numuneleri üzerinde değişik kür metotlarının etkisi incelemiştir. Çalışması için, 15x15x15 cm boyutlarında beton numuneler üretmiştir. Bu üç grup beton numunelerini laboratuvarında, doğal açık havada (ilk üç gün plastik örtü altında) ve doğal açık havada ilk üç gün (su püskürtme şekilde) kür uygulanarak deneye tabi tutmuştur. 28 günlük kür koşulları tamamlandıktan sonra beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, donma-çözünme ve permabilite deneylerine tabi tutmuştur. Deneysel sonuçları irdelediğinde plastik örtü altı kürünün en olumlu sonuç verdiğini belirtmiştir.

Tanyıldız vd (2006) çalışmalarında, betonarme yapı birimlerini oluşturan beton ile demir donatı arasındaki aderansın farklı kür koşulları etkisi altındaki değişimini incelemişlerdir. Çalışma kapsamı içerisinde su, hava ve naylona sarılmak üzere 3 farklı şartlar altında ve 3,7,14 ve 28. gündeki basınç ve aderans deneyleri üzerinde değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışma beton üretimi için TS EN 197-1'de CEM I 42.5 R (PÇ 42.5) olarak tanımlanan çimento sınıfı 150x150x150 mm boyutlarında imal etmişlerdir. Aderans deneyleri için 400 mm boyunda Ø14 demir donatı kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda suda kür uygulamasında en verimli sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir ve bu koşulu sırasıyla hava kürü ve naylon kürü takip ettiğini sonucuna ulaşmışlardır.

Karahan (2008) çalışmasında, 1:1 ölçekli betonarme kirişleri çelik levhalar ile güçlendirerek eğilme etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Bu amaç kapsamında çalışma döneminde yönetmelik ve saha uygulamasında sıkça kullanılan 20x50 cm en kesitli 4,5 m boyunda betonarme kiriş modeli üzerinde 1 adet yalın (referans) kiriş ve 6 adet farklı kalınlıklardaki çelik levhalar ile güçlendirilmiş elemanlar üzerinden incelemiştir. Güçlendirilme etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla tüm kirişlerde çekme donatısı olarak Ø14, montaj donatısı olarak Ø12, sargı donatısı Ø8 kullanmıştır. Ele alınan model üzerinde yönetmeliğin izin verdiği maksimum ve minimum donatı oranı

içerisinde $p=0,004915$ olarak aldığını belirtmiştir. Kullanılan donatı akma ve kopma dayanımları sırasıyla $f_{yk}= 450$ MPa ve $f_u= 620$ MPa olduğunu belirtmiştir. Beton basınç dayanımının ortalama $f_{ck}= 20$ MPa olarak hazır beton fabrikasından sipariş ederek temin etmiştir. Güçlendirme için kullanılan çelik levhaların akma ve kopma dayanımlarının birbirine çok yaklaşık sonuçlar verdiği görmüştür. Bu değerlerin 280 MPa civarında olduğu tespit etmiştir. Güçlendirme için kullanılan levhaların montajında ise epoksi tercih etmiştir. Sonuç değerlendirilmesinde yük–düşey deformasyon grafikleri üzerinden taşıma gücü, süneklik ve enerji tüketimi üzerinden yapmıştır. Çalışması sonucunda çelik levha güçlendirilmeli betonarme kirişlerden başarılı sonuçlara ulaşıldığını tespit etmiştir ve çoğunda yeterli dayanım yanında sünekliğinde artış elde edildiğini ifade etmiştir.

Montejo et al. (2008), soğuk sıcaklıkların betonarme elemanların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. -40°C ile 20°C arasında değişen sıcaklıklara maruz kalan dört özdeş büyük ölçekli betonarme dairesel kolonun ters döngüsel testinden oluşan çok aşamalı bir araştırma projesinin I. Aşamasının sonuçlarını çalışmalarında özetlemişlerdir. Geçmiş çalışmalarından elde ettikleri veriler, bu çalışmalarındaki malzeme testlerinden elde ettikleri sonuçlarla tamamlayarak, düşük sıcaklıkta beton ve çelik donatının mekanik özelliklerinin tahmini için ampirik bağıntılar geliştirmede kullanmışlardır. Geçmişteki araştırmalarında, düşük sıcaklıklarda test edilen düz beton ve donatı çelik çubuklarının deformasyon kapasitelerinde herhangi bir kayıp olmadan mukavemette bir artış olduğu göstermişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarında, donma sıcaklıklarında test edilen betonarme elemanların yer değiştirme kapasitesinde bir azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Barris et al. (2009), çalışmalarında, betonarme kirişlerde demir donatının GFRP ile güçlendirilmesinin deneysel ve teorik karşılaştırmaları üzerinde durmuştur. Bu kapsamda çalışmalarında donatı oranının ve etkin derinlik/yükseklik oranını değiştirerek kısa vadede eğilme davranışını değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında Bernoulli Hipotezinin orta açıklık için hem çatlaklı hem çatlaksız bölümlerinde geçerli olduğunu ve teorik hesaplamalarda kullanılan yönetmeliklerin ise servis yüküne kadar uyumlu, nihai taşıma gücüne gidildikçe saplamaların olduğunu belirtmişlerdir.

Qu et al. (2009) çalışmalarında GFRP ve çelik donatıların farklı kombinasyonlarla birlikte kullanılmasının eğilme dayanımı üzerinde durmuşlardır. Bu kapsamda çelik donatılı ve GFRP donatılı birer adet referans numunesi imal etmişlerdir ve bu referans numunesi olarak belirtilen kirişler dahil olmak üzere toplamda 8 adet kiriş numunesinde süneklik, taşıma gücü ve hizmet elverişliliği üzerinden değerlendirmeler yapmışlardır. Yaptıkları değerlendirmede sadece GFRP donatılı kirişlere göre hibrit kirişlerin eğilme dayanımına olumlu etki ettiği, yine hibrit kirişlerde sünekliğinin iyileştiğini vurgulamışlardır.

Liu et al. (2010) çalışmalarında, betonarme kirişleri ve betonarmeyi oluşturan beton ve demir donatıların süper düşük sıcaklıktaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu kapsamda sırasıyla 3 farklı demir donatı -180°C ve -80°C arasında, C15 beton sınıfı üzerinde -180°C ve -40°C arasında eksenel basınç deneyi yapmışlardır. Eğilme deneyleri için 6 adet $40 \times 40 \times 300$ mm boyutlarında betonarme kiriş üzerinde -180°C ve -40°C arasında gerçekleştirerek düşük sıcaklık altında mekanik özellikleri ve kusurlarını incelenmişlerdir. DeneySEL çalışmanın ön aşaması olan demir donatı ve beton basınç dayanımlarının düşük sıcaklıklara gidildikçe gevrekliğinin artmasıyla taşıyabildiği yükte artış göstermesine rağmen şekil değiştirme kapasitelerinde düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir. Betonarme kirişleri incelediklerinde sıcaklığın düşmesiyle akma yükünün ve nihai yükün artış göstermekte olduğunu ayrıca kirişlerin eğilme rijitliğinin sıcaklığın düşüşüyle ters orantılı olduğu tespit etmişlerdir.

Özhan (2012) çalışmasında, betonarme kirişlerin eğilme davranışında beton sınıflarının etkisini incelemiştir. Bu amaçla beton sınıfı olarak C20/25, C30/37, C40/50 kullanmıştır. S420a sınıfı çelik donatılar kullanılarak $20 \times 35 \times 300$ cm boyutlarında 15 adet betonarme kiriş numune test etmiştir. Kesit sünekliğinin beton sınıfının yükselmesiyle azaldığını vurgulamıştır. Sünek kırılma için yaptığı betonarme kiriş numunelerinde çekme donatı miktarı oranına bağlı olarak eğilme taşıma gücüne olumlu etki ettiğini belirtmiştir. Sargı donatısı etkisi için maksimum moment ve kiriş mesnet bölgeleri üzerinde sıklaştırma yapmıştır. Maksimum moment noktasında yapılan sıklaştırmanın etkisinin olmadığını, mesnet bölgelerinde yapılan sıklaştırmanın kesme kuvveti ve eğilme kapasitesine katkı sağladığını vurgulamıştır.

Yazıcı vd (2015) çalışmalarında, hızlandırılmış kür şartlarında farklı oranlarda uçucu külün, bu uçucu külleri içeren beton numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada hazırlanan beton numuneleri için CEM I 42,5 R çimento bağlayıcı olarak kullanmışlardır. 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneleri 7 farklı kür koşullarına (A=1 gün standart kür, B=7 gün standart kür, C=28 gün standart kür, D=1 gün 35°C suda kür, E=1 gün 35°C suda kür + 27 gün standart kür, F=3,5 saat 85°C suda kür, G=3,5 saat 85°C suda kür + 1 saat oda sıcaklığında bekletme + toplam 28 günü tamamlayana kadar standart kür) tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışma sonuçlarında kür koşullarının sırasıyla C, G, E, B, F, D, A verimli olduğu, uçucu kül etkisi incelendiğinde ise uçucu kül oranı arttığında verimin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca standart kür koşulunda uçucu kül ikamesiyle erken yaşta meydana gelen basınç dayanımındaki düşüşün sıcak su kürü ile telafi edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Özcan (2017) çalışmasında, farklı basınç dayanımlarında imal edilen beton numunelerinin; standart kür, ıslak-kuru kür ve kuru kür olmak üzere 3 farklı kür koşulları altında 3 günlük erken dayanımları ve 7 ve 28 günlük geç dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu kapsam içerisinde 5 adet farklı basınç dayanımına sahip beton numunelerini (CEM I 42,5 Portland Çimentosu kullanılmıştır.) standart kür, şantiye ortamını temsil etmesi amacıyla sabah ve akşam birer saat su banyosu kürü, laboratuvarda ıslak-kuru kür ve kalıptan süresi dolduktan sonra çıkarılan numuneleri laboratuvar koşullarında kuru kür uygulamıştır. Deneysel çalışma sonuçlarını irdelediğinde erken dönemde (3 günlük numunelerde) ıslak-kuru kür ve kuru kürün standart küre göre düşük beton sınıflarında olumlu sonuçlar verdiğini ancak beton sınıfın yükselmesiyle olumsuz sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Uzun döneme baktığında standart kür koşullarının diğer şartlardan daha verimli olduğunu ve beton sınıfının artmasıyla bu verimin düştüğünü belirtmiştir.

Gemi vd (2018) çalışmalarında, çekme bölgesinin lifli beton ve cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatılı etriyesiz betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Çalışma doğrultusunda 15x20x210 cm boyutlarında 4 adet farklı özelliklerde kirişler imal etmişlerdir. Beton sınıfı olarak C20/25, karışımda kullanılan çimento ise CEM II 42,5, demir donatı olarak akma dayanımı S420 seçmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda GFRP donatılı kirişlerin yük taşıma

kapasitelerinde artış meydana geldiğini, ancak şekil değiştirme de çelik donatıya göre yetersiz olduğunu ve GFRP'li donatılarda liflerin yırtılması veya kopmasıyla ani yük düşüşleri olduğunu tespit etmişlerdir.

Kütük ve Kara (2018) çalışmalarında, kolemanit ilaveli betonlarda farklı kür koşullarında dayanım etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda %0-5 arasında 6 farklı beton için 3 farklı kür uygulaması yapmışlardır. Bu uygulamaları birincisi 7 gün suda kür 90. güne kadar laboratuvarında beklemeye alma, ikinci grup 28 gün suda bekletilip 90. güne kadar laboratuvarında beklemeye alma, üçüncü grup ise 90 gün boyunca suda kür olacak şekilde belirlemişlerdir. Kür şartları tamamlanan numuneleri önce ultrases deneylerine sonrasında eksenel basınç deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışmanın sonuçlarını incelediklerinde hem ultrases hem de basınç deneylerinde kür koşulları ele alındığında kür koşullarının verimleri sırasıyla üçüncü grup, ikinci grup ve birinci grup olacak şekilde belirlemişlerdir. Kolemanit ilavesi baza alındığında %3 ikameli olan beton grubunun en verimli olduğunu %0 ve %5 ikameli beton gruplarına gidildikçe verimin azaldığını belirlemişlerdir.

Mathew and Joseph (2018), çalışmalarında yüksek sıcaklıklara (200°C, 400°C, 600°C ve 800°C) maruz kalan uçucu kül bazlı geopolimer beton kirişlerin eğilme davranışını araştırmışlardır. Çalışma için 150x200x1.100 mm ebatlarındaki kirişlere %0,52 takviye çeliği ile dökülmüştür. Takviye örtüsü olarak 20 mm, 30 mm ve 40 mm kullanılan geopolimer betonun küp basınç dayanımını 57 MPa olarak belirlemişlerdir ve bu kirişlerin deformasyon özelliklerini, moment-eğrilik ilişkilerini ve çatlama davranışlarını gözlemlemişlerdir. Güçlendirilmiş geopolimer beton kirişlerin ortam sıcaklığında deformasyon özelliklerinin klasik betonarmede kullanılan beton kirişlerinkine benzer olduğu ve gerinim uyumluluğu yaklaşımını kullanarak bu özelliklerin tahmin edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Falliona et al. (2019) çalışmalarında, fiber takviyeli hafif köpüklü betonun farklı kür koşullarında eğilme davranışlarını ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Bu kapsamda eğilme deneyleri için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik eğilme elemanlarını imal etmişlerdir. 20±3°C ve %65-75 bağıl nemde laboratuvar koşullarında hava kürü, aynı ortam koşullarında selofan malzeme ile saracak şekilde kür ve 30°C

kontrollü suda kür olmak üzere 3 farklı kür koşulu için 1 adet prizmatik kiriş numunesi ve 2 adet kübik basınç numunesi üzerinden deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonuçlarının, tüm kür koşulları göz önüne alındığında fiber takviyesinin bütün deneylerde eğilme dayanımına katkı sağladığını ancak basınç dayanımlarında ihmal edilebilecek düzeyde kaldığını göstermekte olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu et al. (2020) çalışmalarında yerinde yüksek performanslı beton (HPC) için yeni bir kürleme yöntemi olarak omik ısıtma (OH) kürü önermişlerdir. Bu yöntemle, hızlı yapısal dayanım oluşumuna yardımcı olan omik ısıtma oluşturmak için karbon fiber takviyeli yüksek performanslı beton (CF-HPC) numunesine sabit elektrik enerjisi uygulamışlardır. CF-HPC örneğinde iletken ağ oluşturmak ve CF-HPC'nin gerilme mukavemetini ve sertliğini arttırmak için karbon fiberler (CF'ler) kullanmışlardır. CF'lerin köprüleme davranışını incelemek ve CF'lerin optimal içeriğini belirlemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuçları incelediklerinde, CF-HPC-OH numunesinin 3 günlük sertleştirme süresi boyunca kararlı bir elektrik direnci göstermiş olduğunu elektrik gücü ile kürleme sıcaklığı arasındaki ilişkiyi daha iyi açıklamak için ısı transferi teorisine dayalı termal dengenin sayısal analizi yapmışlardır. Omik ısıtma kürleme yoluyla yerinde inşaat hedefine ulaşmak için HPC'nin gücünü hızlı bir şekilde oluşturmak için etkili bir kürleme yöntemi hakkındaki malumatları detaylı şekilde açıklamışlardır.

Godínez-Domínguez et al. (2021), betonarme çatlaklı bina kirişlerinin eğilme rijitliği için, genel sismik tasarım sürecinde en ilgili ve tartışmalı konulardan biri olan hizmet yükleriyle ilgili sismik yüklemeye maruz kalan çerçevelerin veya bina yapılarının yanal analizi için değerlendirilmesi gerektiğini açıklamışlardır. İlk aşama olarak, tipik düşük sünekliğe sahip detaylı betonarme kesitlerin çatlak atalet momentinin değerlendirilmesinde değişkenlerin etkisi değerlendirirken, kesitlerin şekli, genişlik, en boy oranı, beton basınç dayanımı, çekme donatı oranı, çekme sıkıştırma takviye oranı ve enine çelik sargı dikkate almışlardır. Toplamda 37.800 adet kesitsel analiz gerçekleştirmişlerdir. Kapsamlı parametrik çalışmalarının bir sonucu olarak, gözlenen ilgili değişkenlerin bir fonksiyonu olarak I_{cr} 'nin değerlendirilmesi için bir denklem önermişlerdir. İkinci aşamada, tipik betonarme yapı kirişlerinin etkin eğilme momenti

değerlendirmişlerdir. Bu durumda, her iki kiriş ucunda önceden tanımlanmış uzunlukta çatlak parçaları olan prizmatik elemanlar için esneklik yönteminden türetilen rijitlik denklemlerini kullanmışlardır ve Meksika sismik yönetmeliğine göre değerlendirmeler yapılmıştır.

Sachin and Suresh (2021), yüksek sıcaklığın kendiliğinden yerleşen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini ve GFRP levhalarla donatıldıktan sonra bozulan kirişlerin performansını incelemişlerdir. Sürekli yüksek sıcaklığa maruz kalan ve eğilme yükü taşıma kapasitesi için test edilen güçlendirilmiş kirişleri, GFRP levhalarla güçlendirme benimsenerek yeniden güçlendirmişlerdir.

Sankaramoorthy et al. (2021) Cam Elyaf Takviyeli Polimer [GFRP] laminatlarla güçlendirilmiş beton RC kirişini analiz etmeye çalışmışlardır. Araştırma deneyi, GFRP laminatlarla betonarme kiriş güçlendirmenin performansı ve davranışı incelenerek belirlemişlerdir. Deneyleri için 130x240x3.200mm boyutlarında 12 adet T kiriş imal etmişlerdir. İmal edilen numune testleri, kirişin eğilme davranışını elde etmek için döngüsel yükleme yoluyla yapmışlardır. Kirişin güçlendirme sürecini belirlemek için fiberin yönü, çeşitli oranlarda donatı, GFRP laminatları kirişe eklemişlerdir. GFRP laminatların kirişi güçlendirdiğini ve ayrıca diğer kontrol numunelerine kıyasla numunelerin eğilme tepkisini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Esen vd (2022) çalışmalarında, 16 adet ½ ölçekli betonarme kiriş numuneleri üzerinden beton dayanımı, çekme donatı miktarı ve sargı donatı aralığı parametrelerinin etkisi incelemişlerdir. Üç noktalı eğilme deneyleri üzerinden yük kapasitesi, enerji tüketimi, rijitlik ve süneklikleri üzerinden yorumlamışlardır. 5 MPa basınç dayanımına sahip beton numunesi üzerinde sargı donatısının katkı sağlamadığı, beton basınç dayanımı yükseldiğinde sargı donatılarının veriminin arttığı belirtmişlerdir. Beton basınç dayanımı ile betonarme kirişlerin yük kapasitesi, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimiyle genel olarak doğru orantılı olduğu belirtmişlerdir. Donatı miktarının süneklikle ters orantılı şekilde olduğu ama diğer parametrelere verimi arttırdığı vurgulanmıştır. Sargı donatısının aralığının süneklik ve enerji tüketimi üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre daha etkin olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Wang et al. (2022), bu çalışmada, 3.000 m rakımın üzerindeki bir plato bölgesinde düşük ısılı Portland çimentolu beton (LHPC-C) ve normal Portland çimentolu beton (OPC-C) hazırlamışlardır. Bir plato bölgesindeki beton gerilmesini ve sıcaklığını kaydetmek için bir JMZX-215HAT sensörü kullanmışlardır. Beton ve mikro yapı analizi ürününü değerlendirmek için XRD, TG, SEM ve MIP cihazları kullanmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda iki tip betonun fiziksel, ısı ve deformasyon özelliklerini incelemişlerdir.

Chen et al. (2023) çalışmalarında beton yüzeylerin farklı hava koşullarına maruz kalması altında mikro yapıları ve özellikleri üzerindeki iklim etkisinin mekanizmasını araştırmışlardır. Mikro yapı analizi için beton yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı, termogravimetri, nitrojen adsorpsiyon porozimetrisi, cıva intrüzyon porozimetrisi ve mikrosertlik testlerine tabi tutmuşlardır. Mekanik özellikleri değerlendirmek için geri tepme mukavemeti ve aşınma direnci testleri gerçekleştirmişlerdir. Dayanıklılığı değerlendirmek için çeşitli absorpsiyon koşulları altında sorptivite, vakum doygunluğu ve daldırmadan sonra klorür iyonu geçirgenliği ve donma-çözülme döngüsü ile buz çözme tuzu ölçeklendirme testlerini yapmışlardır.

Cui et al. (2023), çalışmalarında çimento beton kaplamanın, düşük maliyeti, kolay bakımı ve uzun hizmet ömrü nedeniyle, Çin'in batısında yol mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, kaplama betonunun özellikleri, özellikle yüksek rüzgâr ve büyük günlük sıcaklık farkı için, yerel ortama karşı çok hassas olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, kaplama betonunun işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini karışım oranı tasarımından düzenlemeyi amaçlamış olup ardından saha uygulamasının fizibilitesini doğrulamak için yerinde kaplama gerçekleştirmişlerdir. Günlük sıcaklık farkı yaklaşık 20°C ve rüzgâr hızı 5,5–7,0 m/s olan bir plato ortamında arazi uygulaması için, 30 cm kalınlığındaki beton kaplamanın sıcaklık farkını ve iç gerilmesi 4,0 °C içinde dahil üstün çatlama direncini kontrol etmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında yaz aylarında daha teknik bir ifade ile TS1247 (2018)'in geçerli olduğu normal hava koşullarında imalatı yapılan tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, betonarme kirişleri laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imatlatları gerçekleştirilerek dört noktalı (tek düze 2 noktalı yükleme) eğilme etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Deneysel çalışma için tasarımı yapılan betonarme kirişlerin deneyleri gerçekleştirmek proje kapsamında deney düzeneği imalatı yaptırılmıştır. Deney düzeneğinin kontrolü için yapılan pilot deneyler, laboratuvar ve atmosfer ortamında imalatı yapılan betonarme kiriş numuneleri dahil olmak üzere bu tez çalışmasında 9 adet betonarme kiriş numune üretimi gerçekleştirilip deneye tabi tutulmuştur. Çalışma sürecinde takip edilen aşamalar aşağıda sunulmaktadır.

- Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda deney numunelerinin hazırlanması
- Deney düzeneğinin hazırlanması ve pilot deneylerle kontrolünün sağlanması
- Beton eksenel basınç deneyleri, çelik çekme deneyleri ve betonarme kiriş numunelerinin eğilme deneylerinin gerçekleştirilmesi
- Deney sonucu elde edilen verinin işlenmesi
- Elde edilen veri setleri toplu olarak değerlendirilmesi (Tezin ek bölümünde çalışma kapsamında bulunan bütün betonarme kiriş numunelerin detaylı olarak tek tek sunulmaktadır.)

Alt başlıklar halinde deneysel süreç detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3.1. Laboratuvar ve Atmosfere Açık Koşullarda Deney Numunelerinin Hazırlanması

Laboratuvar koşullarının 23 ± 2 °C ve $\%45\pm10$ nem koşullarını sağlaması gerekmektedir. Çalışma kapsamında Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nın bu sıcaklık şartlarını sağlayıp sağlamadığı öncelikli olarak kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sıcaklığın 23 ± 3 °C ve nemin ise $\%35$ oranında olduğunu göstermiştir. Şekil 3.1 (a)'da laboratuvar koşulları ve Şekil 3.1 (b)'de atmosfere açık koşulların sıcaklık ölçümüne ilişkin görsel sunulmaktadır.



(a)

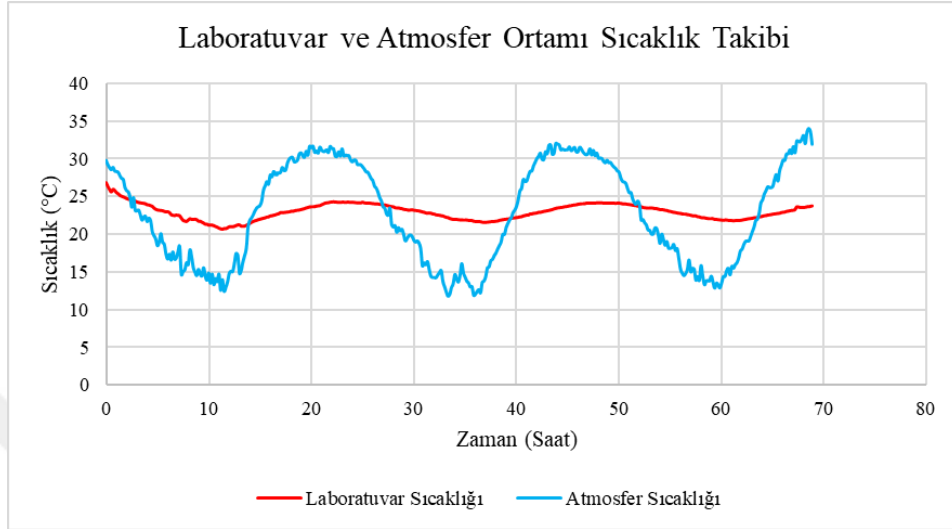


(b)

Şekil 3.1. Sıcaklık ölçümleri, (a) Laboratuvar koşulları sıcaklık ölçümü, (b) Atmosfere açık koşulların sıcaklık ölçümü.

Atmosfere açık koşullarda ise TS 1247 (2018) standardı uyarınca normal hava şartlarının sağlanması beklenmiştir. 3 gün art arda $+5$ °C'nin altına düşmediği ve $+30$ °C'nin üzerine çıkmadığı koşullar normal hava koşulları olarak değerlendirilmiştir. Bu koşullara uygun yaz ayları geldiğinde imalatı işlemine geçilmiştir. Laboratuvar koşullarının belirlenmesi için yapılan sıcaklık ölçümleri sırasında atmosferik koşullarında

sıcaklık takibi yapılmıştır. Ortam koşullarının alınan sıcaklık verisi Şekil 3.2’de sunulmuştur. Veri incelendiğinde laboratuvar sıcaklığının gece- gündüz neredeyse 23 °C’ de sabit kaldığı, atmosferik sıcaklıkların ise geceleri +5 °C’ nin altına inmedği gündüzleri ise +30°C’nin üzerine çıkmadığı görülmüştür.



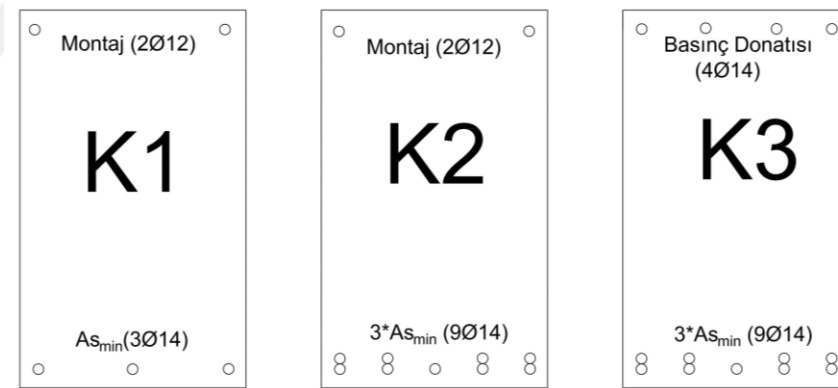
Şekil 3.2. Laboratuvar ve atmosfere açık ortamların sıcaklık takip grafiği

3.1.1. Betonarme kiriş numunelerinin tasarımı

Betonarme taşıyıcı sistemlerin tasarımı ve imalatında ülkemizde yasal olarak düzenlemelerin sunulduğu mevzuatlar (TS 500 2000 ve TBDY 2018) doğrultusunda asgari koşullarda ve uygulamada genel olarak dikkate alınarak betonarme kiriş numunelerinin tasarımı yapılmıştır. Deney numuneleri 1:1 (tam) ölçekli olarak tasarlanmıştır. Tam ölçekli olarak tasarımı yapılan betonarme kiriş numunelerinde geometrik ya da kinematik bir ölçeklendirme olmadığından; prototip-model ilişkisinde boyut analizine gerek kalmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında kullanılacak beton Erzurum’da “Memişoğlu Hazır Beton” santralinden temin edilmiştir. TBDY (2018) uyarınca deprem bölgesi ve durabilite sorunları açısından en az C25/30 sınıfı beton kullanımı şart koşulmaktadır. Baradan ve Aydın (2013) çalışmasında geçirimsiz beton özelliği taşıması ve durabilite karşı daha iyi performans göstermesinden dolayı C30/37 sınıfı betonun kalıcılık bakımından betonarme imalatı için önermektedirler. Bu kapsamda hazır beton tedarikçi firmasından kullandıkları agregalardan temin edilerek C30/37 sınıfı bir beton karışım

hesabı yapılmıştır. Yapılan karışım hesabı doğrultusunda tedarikçi hazır beton santralinden reçeteye uygun beton ile karşılanmıştır. Çelik sınıfı olarak S420 sınıfı inşaat çeliği kullanılması uygun görülmüştür. İnşaat uygulamalarında genel olarak tercih edilen Ø12 montaj donatısı, Ø14 boyuna donatı ve basınç donatısı, Ø8 çelik donatı ise sargı donatısı olarak kullanılmıştır. Eğilme etkisi altındaki davranışın doğru bir şekilde incelenebilmesi için tasarım yapılırken kiriş kesme kapasitesinin eğilme kapasitesinden yüksek olması ve kesme problemi yaşanmaması için en büyük kesme kuvvetlerini karşılayacak şekilde açıklık boyunca Ø8/100 mm etriye donatısı ile donatılmıştır. Betonarme kiriş numunelerin tasarımı Şekil 3.3'te gösterildiği üzere 3 farklı kesit olarak 30x50 cm boyutlarında ve 4,5 m açıklıkta yapılmış ve imal edilmiştir. Betonarme kiriş numunelerin kesit tasarımında K1 kesit için sadece çekme bölgesi boyuna donatı üzerinden minimum donatı oranı $\rho_{\min}=0,00285$, K2 kesiti için TS 500 uyarınca çekme bölgesi boyuna donatısı maksimum olacak şekilde maksimum donatı oranı $\rho_{\max}=0,02000$ ve K3 kesiti için çift donatılı olacak şekilde dengeli kırılma için donatı oranı $\rho_b=0,0237$ olarak hesaplanmıştır.



Tüm kirişler için $b=300\text{mm}$, $h=500\text{mm}$, $c_c=30\text{mm}$, $d=470\text{mm}$, $d'=440\text{mm}$

C30&S420a (enine ve boyuna donatı)

$\rho_{\min}=0,00285$, $\rho_{\max}=0,02000$, $\rho_b=0,0237$

Şekil 3.3. Betonarme kiriş deney numunelerinin tasarlanan kesit özellikleri

Deney numunesi olarak tasarlanan betonarme kiriş numunelerinin çelik donatı yerleşimlerine ait detaylar Çizelge 3.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1. Deney numunelerinin çelik donatı detayları

Kesit Kodu	Açıklama	Çelik Donatı				Toplam çelik donatı hacminin kiriş brüt hacmine oranı (%)
		Çekme	Montaj	Basınç	Enine	
K1	Minimum çekme donatısı oranını sağlayacak şekilde çekme donatısı yerleştirilmiş, tek donatılı ve denge altı kesittir. Etriye bağlantısı için minimum sınırdan montaj donatısı kullanılmıştır.	3Ø14	2Ø12	-	Ø8/100mm	1,03
K2	Kesit genişliğine sığabilecek en büyük miktarda çekme donatısı yerleştirilmiş, tek donatılı ve denge altı kesittir. Etriye bağlantısı için minimum sınırdan montaj donatısı kullanılmıştır.	9Ø14	2Ø12	-	Ø8/100mm	1,69
K3	Kesit genişliğine sığabilecek en büyük miktarda çekme donatısı yerleştirilmiş, çift donatılı ve denge altı kesittir. Basınç donatısı olarak çekme donatısının yaklaşık yarısı miktarda donatı kullanılmıştır.	9Ø14	-	4Ø14	Ø8/100mm	1,99

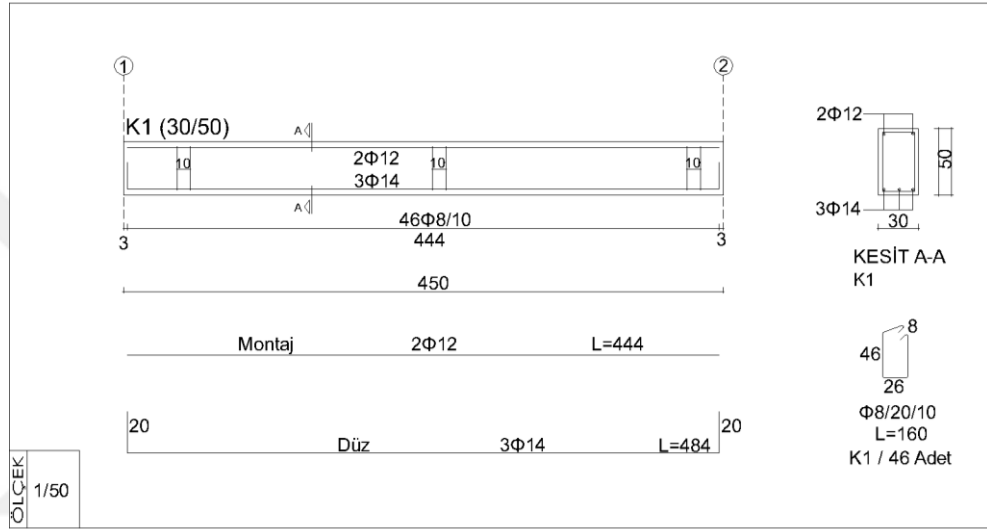
Betonarme kiriş numunelerinden maksimum donatı oranına sahip kiriş kesitinde çelik donatı ve beton arasında sıcaklık değişimi, yani denge sıcaklığına gelişle beraber hidratasyon sürecinin gözlenmesi amacıyla K tipi termokupl ile sıcaklık ölçümü alınmıştır. Aynı zamanda dış ortam sıcaklık ölçümü de alınmıştır. Sıcaklık ölçümü alınırken termal etkilerin görülmesi için kiriş numunesinin 2 ucundan deformasyon ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümler detaylı olarak ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

Betonarme kiriş numunelerinin deney düzeneği tasarımı için gerekli ön hesaplamaları “Deney düzeneğinin tasarımı, imalatı ve kontrolü kontrolü” başlığı altında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca imalatı gerçekleştirilen ve deneye tabi tutulan betonarme kiriş numunelerinin deneysel ve teorik hesaplamaları karşılaştırılabilmesi için imalatda kullanılan betondan 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Alınan beton küp numuneleri her grup kiriş numunelerinin 3, 7, ve 28. günlük basınç dayanımları için 3'er ve deney günü deneye tabi tutulacak her bir betonarme kiriş numunesinin hesaplamaları yapılabilmesi için 2'ser numune olacak şekilde toplamda 60 adet küp numune alınmıştır. Yarmada çekme deneyleri için aynı şekilde her gruptan 2'ser ve deney

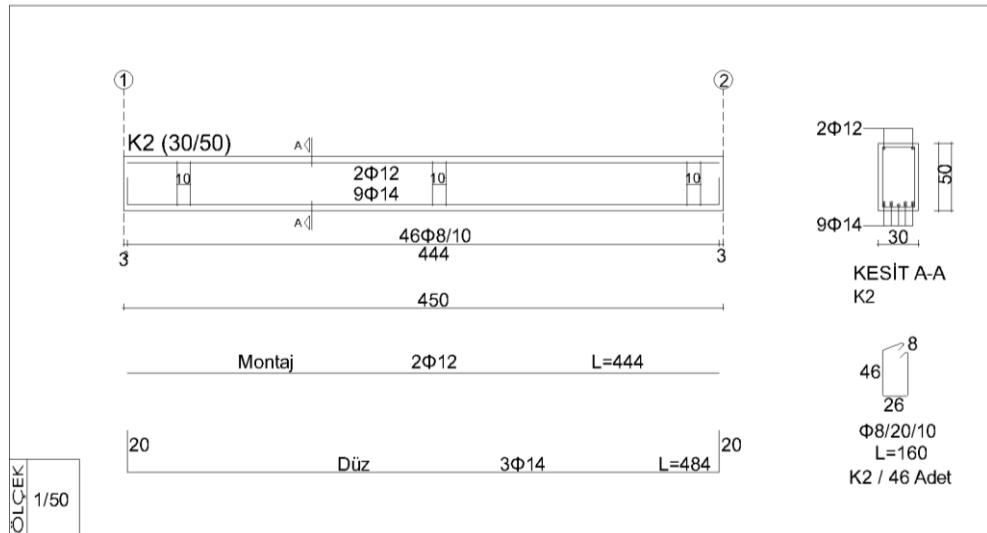
3. MATERYAL ve YÖNTEM

gününe ait 1'er numune olmak üzere toplam 36 adet 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindirik numune örneği alınmıştır. Eğilmede çekme deneyleri için her gruptan 10x10x50 cm boyutlarında prizmatik numune alınmıştır. Kullanılan çelik sınıfının belirlenmesi için her donatı çapından 12 adet çelik donatı örneği alınmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

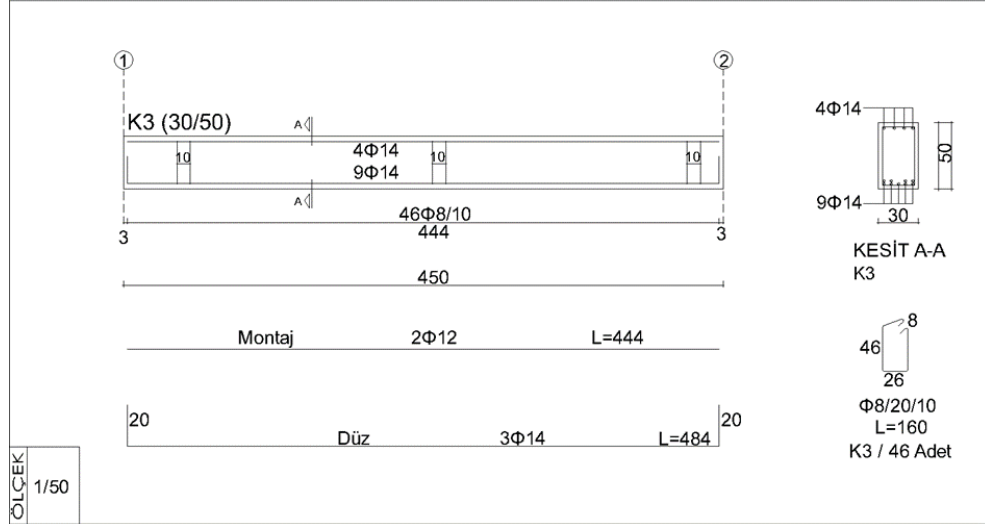
Çalışma kapsamında deneye tabi tutulacak betonarme kiriş numunelerine ait kiriş donatı detayları Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sunulmaktadır.



Şekil 3.4. K1 kesitli kiriş donatı detayı



Şekil 3.5. K2 kesitli kiriş donatı detayı



Şekil 3.6. K3 kesitli kiriş donatı detayı

3.1.2. Betonarme kiriş numunelerinin imalat koşulları

Tez çalışmasının temel amacı dahilinde yaz aylarında imalatı gerçekleştirilen ve laboratuvar koşullarının atmosferik ortam (şantiyede uygulamaya alınan) koşullarını ne kadar yansıttığı değerlendirilmiştir. Çizelge 3.2’de bu kapsamda imalat koşulları detaylı olarak anlatılmaktadır.

Çizelge 3.2. Betonarme kiriş deney numunelerinin imalat koşulları

Normal Hava Koşullarında TS 1247 (2018)’ in geçerli olduğu imalat koşulları (Üst üste 3 gün hava sıcaklığının +5 °C üstünde olması hali)	
Laboratuvar Ortamı (Ortalama Sıcaklık: 23 °C) Haziran-Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim Ayları	Atmosfer Ortamı (Atmosferik Sıcaklık: +5 ile +30 °C arasında) Haziran-Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim Ayları
K1 K2 K3	K1 K2 K3
Laboratuvar ve atmosfer ortamında gerçekleşecek iki grubun imalatında aynı gün aynı beton karışımından imal edilmesi planlanmıştır. Yaz koşullarında imal edileceğinden herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Bu deneysel çalışmanın genel amacı laboratuvar koşullarındaki imalatın gerçek koşullardaki imalat ile karşılaştırılmasıdır.	

Çizelge 3.2’de sunulan laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda K1, K2 ve K3 kesitlerinde 3’er adet kiriş numunesi imal edilmiştir. Yaz aylarında normal hava koşullarında imalatın gerçekleştirilmesinden dolayı beton içerisinde herhangi bir katkı

maddesi kullanılmamıştır. Betonarme kiriş numunelerinin imalatında laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imalatı aynı gün içerisinde hazır beton santralinden gelen aynı araçtaki beton karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları üzerinden laboratuvar koşullarının gerçek imalatı ne denli yansıttığı irdelenmiştir. İmalat sırasındaki detaylar “*Beton dökümü, bakımı ve malzeme özelliklerinin tayini*” başlığı altında detaylı olarak verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında imalatı yapılan kirişlerin Çizelge 3.3’te ortam koşullarına dikkate alınarak yapılan isimlendirilmesi sunulmaktadır.

Çizelge 3.3. Betonarme kiriş numunelerinin isimlendirilmesi

Numune Kodu	Numune Açıklaması
PİLOT-1	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K1 Kesitli Kiriş
PİLOT-2	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K1 Kesitli Kiriş
PİLOT-3	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K1 Kesitli Kiriş
BS0-S1	Yaz koşullarında Laboratuvar Ortamında Dökülen ve Muhafıza Edilen K1 Kesitli Kiriş
BS0-S2	Yaz koşullarında Laboratuvar Ortamında Dökülen ve Muhafıza Edilen K2 Kesitli Kiriş
BS0-S3	Yaz koşullarında Laboratuvar Ortamında Dökülen ve Muhafıza Edilen K3 Kesitli Kiriş
BS1-S1	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K1 Kesitli Kiriş
BS1-S2	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K2 Kesitli Kiriş
BS1-S3	Yaz koşullarında Atmosfere Açık Ortamda Dökülen ve Muhafıza Edilen K3 Kesitli Kiriş

Çizelge 3.3’te sunulan isimlendirme kısaltmalarında İngilizce teknik terimler dikkate alınarak yapılmıştır. Kısaltmalarda sunulan B: Beam (kiriş), S: Summer (yaz) olacak şekilde yapılmıştır. Ortam koşullarını belirtmek için 0: Laboratuvar, 1: Atmosfere açık koşullar olarak belirlenmiştir. S1, S2, S3 ifadeleri ise sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitleri karşılık gelecek şekilde İngilizce kısaltmalarını ifade etmektedir. Laboratuvar ortamı yeşil, atmosfere açık ortam ise sarı renk vurgusu ile ifade edilmiştir.

3.1.3. Betonarme kiriş numunelerinin çelik donatı kafeslerinin imalatı

Betonarme yapı elemanlarının eğilme etkisi altındaki davranışı üzerinde boyuna donatının mekanik özelliklerinin belirleyici olduğu bilinmektedir. Bu deneysel çalışma

kapsamında betonarme kiriş numunelerinin aynı bağdan çelik donatı kafes imalatı gerçekleştirilerek eğilme etkisi altındaki davranışta enine ve boyuna çelik donatıların aynı mekanik özellikleri kullanılarak bu parametrenin etkisi giderilmiştir.

Deneyisel çalışma kapsamında imalatta kullanılan Ø8, Ø12 ve Ø14 çaplarındaki her bağdan rastgele örnek numune alınarak TS 708 Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği (2016) standardı uyarınca fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesinde çelik donatı üzerindeki nervür yapısı ve çelik sınıfını belirlemek için üretim zamanı donatı üzerine işlenmiş kodlandırmalardan yararlanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için Şekil 3.7’de gösterilen Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı’nda mevcut olan UTEST marka universal 1000 kN çekme kapasitesine sahip eksenel çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yapılan çekme deneylerinde yükleme hızı 10 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilecek sonuçların değerlendirilmesi amacıyla çeneler arası ilk boy ve son boy ölçümleri alınmıştır. İlk boy ve son boy değişim üzerinden donatı boyundan bağımsız şekilde değerlendirilmesi amacıyla birim şekil değiştirmeye geçilmiştir. Çap değişimi ihmal edilerek herhangi bir ölçüm alınmamıştır. Şekil değiştirmede yapılan boyuttan bağımsız hale getirmek işlemi yük içinde yapılarak alınan yük ölçümleri çelik donatı çapına bölünerek gerilme değerleri bulunmuştur. Gerilme ve şekil değiştirme grafikleri üzerinden çelik donatı sınıfı belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Çelik donatı mekanik özelliklerinin incelenmesinde çekme deneylerine genel bir görünümü.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çelik donatı imalatı yapım dönemindeki koşullar ve ortamın uygunluğu doğrultusunda Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi garaj katında bulunan depo alanında gerçekleştirilmiştir. İmalatın birebir inşaat koşullarını temsil etmesi amacıyla Erzurum bölgesinde inşaatlarda çalışan demir işçileriyle anlaşarak sağlanmıştır. İmalata ilişkin görsel Şekil 3.8 (a), Şekil 3.8 (b) ve Şekil 3.8 (c)'de sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)

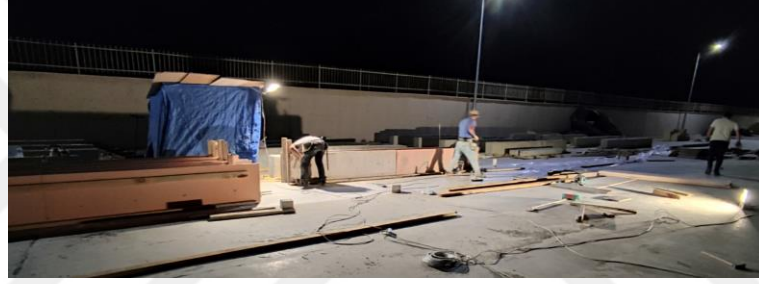
Şekil 3.8. Çelik Donatı Kafesi, (a) ve (b) İmalat aşaması, (c): İmalat sonrası genel görünümü.

Betonarme kiriş numunelerinin donatı kafes imalatı gerçekleştirildikten sonra döküm zamanına kadar donatılarda paslanma ve korozyon oluşmaması amacıyla imalat ortamında muhafaza edilmiştir. Döküm zamanı kararlaştırıldıktan sonra döküm gününden bir gün önce imalat koşullarının gerçekleştirileceği ortam şartlarında bekletilerek beton

basınç dayanım alma (hidratasyon) süresince sıcaklık takibiyle nasıl bir davranış izleyeceği belirlenmeye çalışılmıştır.

3.1.4. Ahşap kalıp imalatı

Betonarma kalıplar bölgede genel uygulama ile uyumlu olacak şekilde 2. sınıf ahşap malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında imalatı gerçekleştirilen kalıp imalatında ilişkin görsel Şekil 3.9 (a), Şekil 3.9 (b) ve Şekil 3.9 (c)'de sunulmaktadır. Ahşap kalıp imalatında atmosfer ortamında yapılacak döküm için kalıplar zemine üzerine kalıp imalatı yapılırken, laboratuvar ortamı dökümü için çelik taşıma aracı üzerinde kalıp imalatı gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



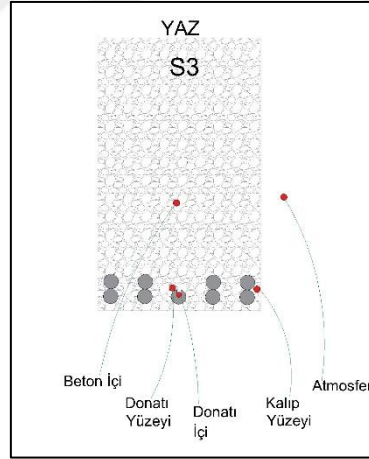
(c)

Şekil 3.9. Ahşap kalıp imalat aşamasına ait genel görüntüler (a) ve (b): Atmosfere açık koşullarda ahşap kalıp imalatı, (c): Laboratuvar koşullarında ahşap kalıp imalatı.

Ahşap kalıp imalatı tamamlandıktan sonra ahşap kalıplar en az 1 gün döküm koşullarına bırakılarak bekletilmiştir. Bu süre sonunda sırasıyla kalıp içi temizliği, yağlanması, çelik donatı kafesi hazırlığı (paspaylarının takılması ve sıcaklık ölçümü için K tipi termokupl yerleştirilmesi) tamamladıktan sonra dikkatli bir şekilde ahşap kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra ahşap kalıplar betonarme imalatının gerçekleşeceği zamanına kadar döküm koşullarında beklemeye alınmıştır.

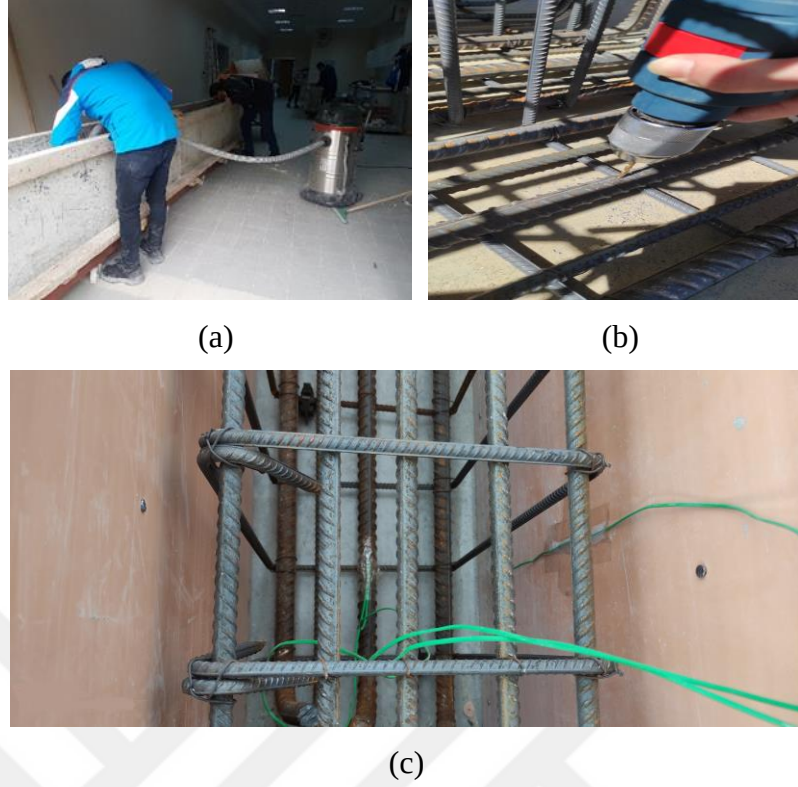
3.1.5. Betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık takibi

Betonarme kiriş numunelerinden beton dökümü yapılan grup numunelerinin hacimsel toplam donatı oranına sahip K3 kesitli kirişleri üzerinden K tipi Termokupl ile sıcaklık ölçümü alınmıştır. Bu işlem kapsamında sırasıyla donatı içi, donatı yüzeyi, beton içi ve kalıp sıcaklık ölçümü için sensör yerleşimi yapılmıştır. Ayrıca ortam koşullarının sıcaklık takibi yapılması için laboratuvar ve atmosfer sıcaklıklarının ölçümü yapılması amacıyla 1'er sensör daha bağlanmıştır. Şematik olarak sıcaklık takibi için kullanılan termokupl sensör yerleşimi Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10. K Tipi Termokupl Yerleşim Şeması

Donatı kafeslerinin sensör yerleşimi ve kalıp temizliği yapıldıktan sonra ahşap kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Sensör yerleşimi ve kalıp temizliği çalışmalarına ilişkin görsel Şekil 3.11 (a), Şekil 3.11 (b) ve Şekil 3.11 (c)'de sunulmaktadır.



Şekil 3.11. Sıcaklık takibi için yapılan çalışmalara ait genel görüntü, (a) Kalıp temizliği, (b) ve (c) Sensör yerleşimi işlemi çalışmalarına ait genel görüntü.

Gedik (2020) çalışmasında da kullanılan K tipi termokupl sensörler ile;

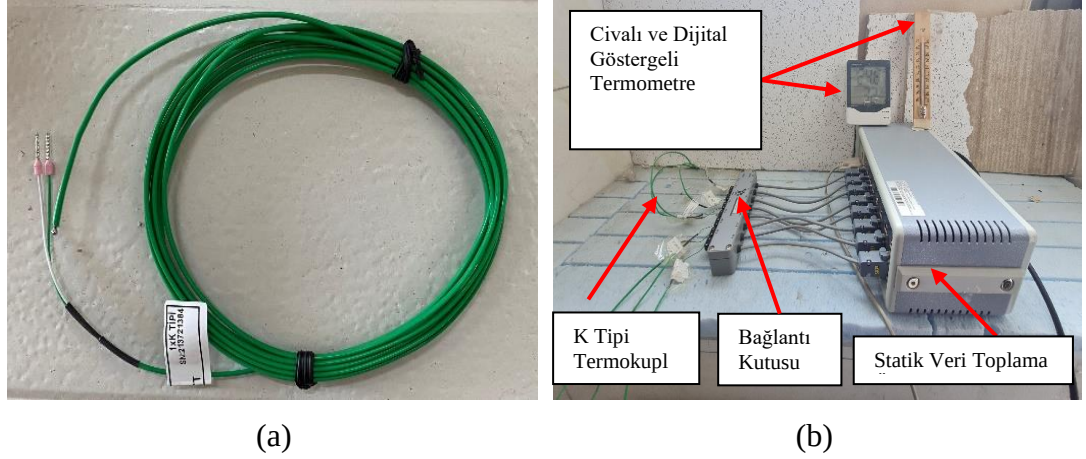
- Çekme bölgesinde kiriş kesitinin ortasına gelen donatının kiriş uçucundan 20 cm içerisinden donatı içi ve yüzeyine 1' er adet sensör yerleştirilmiştir. (Donatı içi sıcaklık ölçümü için seçilen donatı 3 mm çapında matkap ucu ile Ø14 donatı kalınlığının yarısı olan 7 mm derinliğinde delik açılarak yerleştirilmiştir. Donatı yüzeyi olarak donatı içi sensörünün hemen yanına sabitlenmiştir.)
- 1 adet sensör kalıp yüzeyine sabitlenmiştir.
- 1 adet sensör ise beton sıcaklığı tabi için yerleştirilmiştir.
- Laboratuvar koşullarında imalatı yapılan kiriş numuneleri için 1 adet laboratuvar sıcaklık takibi için 1 adet, atmosfere açık koşullarda imalatı yapılacak kiriş numunelerinde ortam sıcaklığı için 1 adet sensör yerleştirilmiştir.

Kalıp yüzeyi ve beton içi sıcaklık tabi için yerleştirilen K tipi termokupllar donatı içine yerleştirilen sensörler ile aynı seviyede olması şartı göz önünde tutularak yerleştirilmiştir ve sıcaklık takibi yapılmıştır.

Yapılacak olan sıcaklık takibinin teknik detayı ve hangi amaçla yapıldığı önemli bir husustur. Ulusal ve uluslararası normlarla saha pratiği olan uzmanların sunduğu özellikle soğukta dökülen betonlarda taze beton dökümü gerçekleştikten sonra 3 gün süresince beton sıcaklığının $+10^{\circ}\text{C}$ ve ortam sıcaklığının -3°C düşmemesinin uygun olacağına dair teknik bilgi verilmektedir. Bunun yanında, taze beton ve çelik donatının eşit sıcaklığa ulaşma (denge sıcaklığı) süresinin aralarında oluşacak aderans davranışı üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir. Bu konu üzerine soğukta dökülen betonarme elamanlarının çekme etkisinde bağ kuvveti-kayma ilişkisini deneysel olarak inceleyen Gedik (2020), çalışmasında kışın yapılan imalatlarda çelik donatı ve betonun denge sıcaklığına ulaşma süresinin etkisinin önemini vurgulamıştır ve denge sıcaklığına ulaşma süresinin kısalmasıyla davranışta mekanik olarak başarılı olduğu belirtmiştir. Bu kapsamda hacimsel donatı oranı yüksek K3 kesitli betonarme kiriş numunelerinden sıcaklık ölçümü yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca Erzurum ilinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada sıcaklık farkının yüksek olduğu bir bölge olduğu bilinmektedir. Gündüz ve gece yüksek sıcaklık farkının gün içinde betonarme kiriş numunelerin davranışının incelenmesi için de önemli bir husustur.

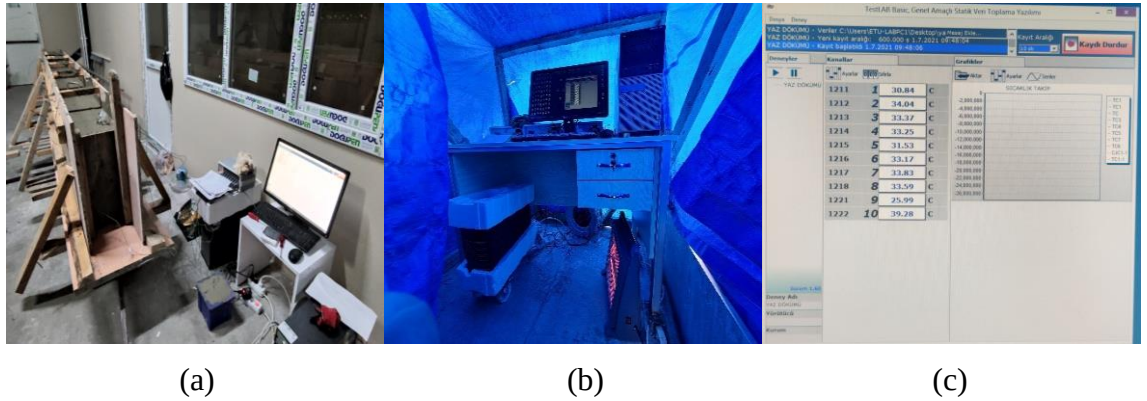
Sıcaklık takibi için Bursa ilinde bir firma tarafından imalatı gerçekleştirilen K tipi termokupllar temin edilmiştir. Bu takip için statik veri toplama ünitesi kullanılmaktadır. Ancak temin edilen K tipi termokupllar bu veri toplama sistemine direk bağlantı sağlayamamaktadır. Bağlantı için bağlantı kutusu olarak adlandırılan ara bir aparat kullanılmıştır. Sistemin kalibrasyonu için temin edilen sensörler ile birlikte 2 adet kalibrasyon sensörü kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerin doğruluğunun kontrolünde ölçüm yerine uygun olarak saplama, civalı veya dijital göstergeli termometreler kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.12 (a)'da kullanılan K tipi termokupl ile Şekil 3.12 (b)'de veri toplama setine ilişkin görseller sunulmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.12. Sıcaklık takibinde kullanılan araç ve gereçler, (a) K tipi termokupl, (b): Veri toplama sistemi.

Döküm süreci ve sonrasında yeterli dayanım sağlayıncaya kadar alınacak sıcaklık ölçümlerinde veri kaybının önlenmesi amacıyla taşınabilir şarjlı UPS güç kaynağı ile desteklenmiştir. Veri toplama sisteminin bilgisayar ortamında görülmesi ve kayıt işlemleri için Testlab Basic (2021) güncel yazılımı ile sağlanmıştır. Atmosfer ortamında imalatı gerçekleştirilecek betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık takibinde kullanılan ölçüm düzeneği herhangi bir yağış, rüzgâr vb. durumlardan etkilenmemesi için bir çadır içerisine kurulmuştur. Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda UPS güç ünitesi ile desteklenen sıcaklık kayıt sistemleri sırasıyla Şekil 3.13 (a) ve Şekil 3.13 (b)'de, veri toplama sistemi arayüzüne ilişkin görsel ise Şekil 3.13 (c)'de sunulmaktadır.



Şekil 3.13. Sıcaklık takip işlemi, (a) Laboratuvar koşullarında sıcaklık takibi, (b) Atmosfere açık koşullarda sıcaklık takibi, (c) Veri toplama sisteminin yazılım arayüzü.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda yapılan imalatların birbirleriyle ilişkin değerlendirilmesi yapılmak üzere; her grup için beton dökümü ve sonrası sıcaklık verisi toplanmıştır. Bu kapsamda Çizelge 3.4'te sunulan bir veri tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 3.4. Numune döküm ve bakım sürecince alınan sıcaklık ölçümlerine ilişkin veri tablosu.

Numune	Atmosferik Sıcaklık (°C)	Döküm Anında Bakım Ortamı (Açık Hava/Laboratuvar/Çadır) Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Taze Beton Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Donatı Sıcaklığı (°C)	Kirişteki toplam çelik donatı hacmi (%)	Döküm Anında Kalıp Sıcaklığı (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaştıkları Sıcaklık (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaşma Süresi (dakika)
xx-S3	-	-	-	-	-	-	-	-

Gedik (2020) çalışmasında betonarme içindeki beton ve çelik donatı malzemelerinin denge sıcaklığına ulaşma sürecinin aderans üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Bu kapsamda imalatı yapılacak betonarme kiriş numunelerinin kalıp sökülme işlemlerinde bu denge sıcaklığı göz önünde tutulması öngörülmüştür. Söz konusu çalışma kısmın yapılacak imalatlar için değerlendirildiğinden, bu çalışmada rutin uygulama dahilinde 3 günlük kalıp alma süresi benimsenmiştir.

3.1.6. Beton dökümü, bakımı ve malzeme özelliklerinin tayini

Tez çalışması kapsamında Çizelge 3.3'te sunulan döküm koşullarına göre isimlendirilen betonarme kiriş numunelerinin beton döküm, bakım ve malzeme özelliklerinin tayin işlemleri gerçekleştirilmiştir. Pilot kiriş numuneleri ile birlikte toplamda 9 adet tam ölçekli betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Bu kapsamda Çizelge 3.5'te imalatı gerçekleştirilecek olan betonarme kiriş numunelerin döküm zamanları ve döküm anındaki atmosferik sıcaklıkları sunulmaktadır.

Çizelge 3.5. Betonarme kiriş numunelerin döküm zamanları ve döküm anındaki atmosferik sıcaklıkları.

Numune Grubu	Tanımlanan Döküm Anı Sıcaklığı (°C)	İmalat Tarihi	Döküm Anında Ortalama Atmosferik Sıcaklık (°C)
BS0	(+5) ve üstü	29 Haziran 2021	20,3
BS1	(+5) ve üstü	18 Haziran 2022	30,7

Çizelge 3.5’te sunulan parametreler, betonarme kiriş döküm ve döküm anındaki atmosferik sıcaklıkları ifade etmektedir. Tüm betonarme kirişlerin imalatı için gerekli beton, Memişoğlu Erzurum Beton A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Beton temin gerçekleşen firmaya ait beton karışımın hazırlandığı sisteme ilişkin görsel Şekil 3.14’te sunulmuştur.



Şekil 3.14. Memişoğlu Erzurum Beton A.Ş beton üretim santrali

Betonarme kirişlerin imalatında kullanılacak C30/37 sınıfı beton için karışım hesabı yapılmış ve Çizelge 3.6’da sunulan reçete kullanılmak üzere TS EN 206 + A2 Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk (2021) standardı uyarınca beton temini gerçekleştirilmiştir. İmalatın yazın gerçekleştirilmesinden dolayı beton içerisinde herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamıştır.

Çizelge 3.6. C30/37 sınıfı beton karışım reçetesi

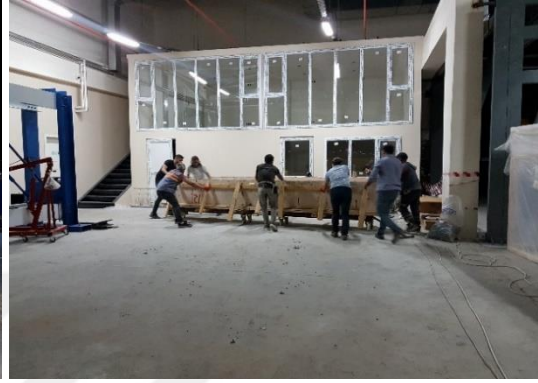
Malzeme	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Çimento (CEMI - PC42,5-R)	133	400
Su	214	214
Hava	10	-
Kum (0-3 mm)	193	421
Çakıl (5-12 mm)	450	1.134
Mıcır	-	-
Toplam	1.000	2.169

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.3'te sunulan betonarme kiriş numuneleri TS 1247 (2018) standardının geçerli olduğu normal beton döküm koşullarında laboratuvar ve atmosfere açık koşullarında imalatları gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen (Pilot deneylerde dahil) betonarme kirişler ve örnek numunelere ilişkin görseller Şekil 3.15 (a), Şekil 3.15 (b), Şekil 3.15 (c), Şekil 3.15 (d), Şekil 3.15 (e) ve Şekil 3.15 (f)'de sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.15. Betonarme kirişler ve örnek numune alma işlemi, (a), (b) ve (c) Laboratuvar koşullarında beton döküm işlemi, (d), (f) ve (g) Atmosfere açık koşullarda gerçekleştirilen beton dökümü işleminin genel görüntüleri.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Beton döküm işleminden sonra betonarme kiriş numunelerinin ve örnek beton numunelerinin kalıptan alınmış ve Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterildiği üzere kendi döküm koşullarında bekletilmeye devam edilmiştir.



Şekil 3.16. Atmosfere açık koşullarda bekletilen betonarme kirişler



Şekil 3.17. Laboratuvar koşullarında bekletilen betonarme kirişler

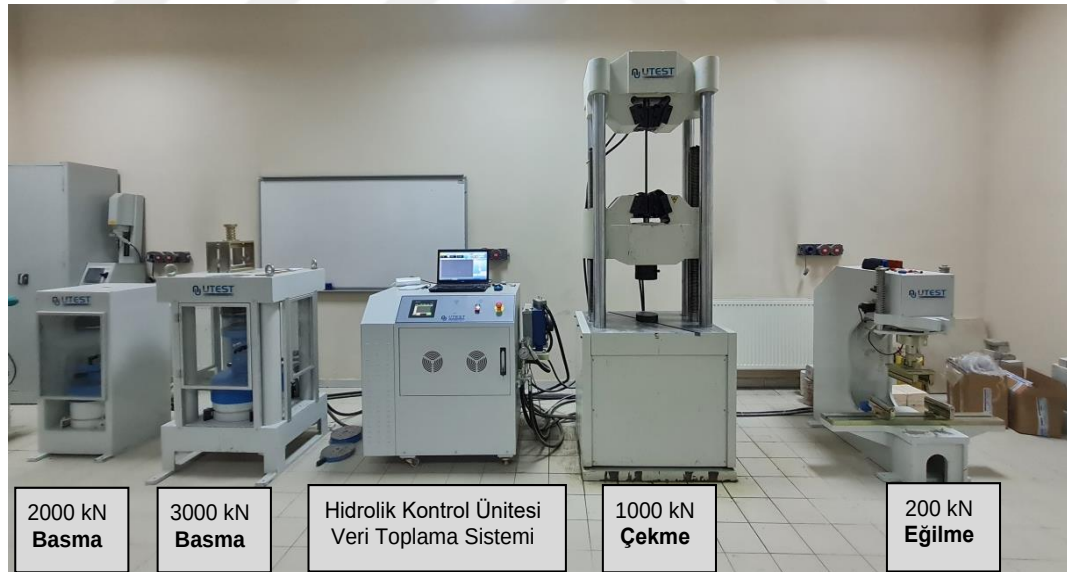
Betonarme kiriş numunelerinin kalıp söküm işleminden sonra sıcaklık etkisiyle yaşayacakları su kaybının önlenmesi ve uygulamada su ile nemli tutma işlemi temsil etmesi açısından atmosfer açık koşullardaki su bakım uygulaması Şekil 3.18’de sunulmaktadır.



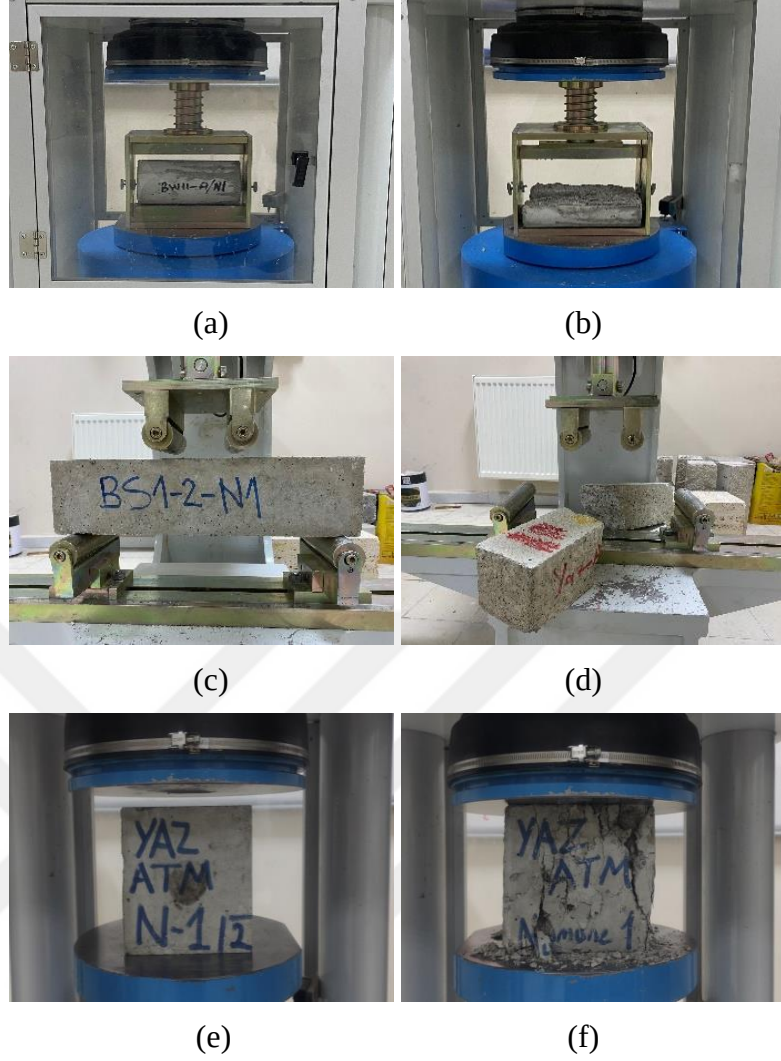
Şekil 3.18. Betonarme kiriş numunelerin nemli tutulma işlemi

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Taze beton karışımından 15x15x15 cm küp, 10x20 cm ölçülerinde silindir ve 10x10x40 cm ölçülerinde beton numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler 3, 7, 28 ve deney günlerine eksenel basınç ve çekme dayanımlarının tayini amacıyla tahribatlı deneylere tabi tutulmuştur. Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda mevcut bulunan ve Şekil 3.19'da genel görüntüsü verilen UTEST marka universal test cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda beton numuneleri Türk standartları olan; TS EN 12390-6 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini (2010) standardı uyarınca yarmada çekme, TS EN12390-5 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini (2021) standardı uyarınca eğilmede çekme ve TS EN 12390-3 Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini (2019) standardı uyarınca eksenel basınç testleri yapılmıştır. Tahribatlı yöntemlerle yapılan beton numune deneylerine ilişkin görsel ise Şekil 3.20 (a), Şekil 3.20 (b), Şekil 3.20 (c), Şekil 3.20 (d), Şekil 3.20 (e), ve Şekil 3.20 (f)'te sunulmaktadır.



Şekil 3.19. Laboratuvarda mevcut bulunan universal test cihazlarının genel görünümü



Şekil 3.20. Tahribatlı yöntemler ile beton mekanik özelliklerinin belirlen, (a) ve (b) Yarmada çekme deneyleri, (c) ve (d) Eğilmede çekme deneyleri, (e) ve (f) Eksenel basınç deneyleri.

Tahribatlı deneylere ek olarak betonarme kiriş numuneleri ve beton numunelerine tahribatsız deneylerde yapılmıştır. Tahribatsız deney yöntemleri olarak TS EN 12504-2: Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız deneyler - Geri sıçrama değerinin tayini (2021) standardına göre Proceq marka N tipi sertlik çekici ile “*Schmidt Çekici (Beton Test Çekici)*” beton sertliği üzerinden basınç dayanımına geçiş yapılmış, yine aynı markalı ultrasonik atımlı dalga hızı (UPV) ölçümü TS EN 12504-4: Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini (2021) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Schmidt çekici ile beton üzerinde gerçekleştirilen deneyde çekiç üzerinde sertlik değeri okunur ve çekiç üzerinden uygulama yönüne bağlı olarak verilen kalibrasyon eğrileri üzerinden basınç dayanım değerleri okunmaktadır. Ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümlerinde Raouf and Ali (1983) ve Turgut and Kucuk (2006)

çalışmalarında sunulan kalibrasyon bağıntılarıyla eksenel basınç dayanımı için çıkarım yapılmıştır. Tahribatsız deney yöntemleri kullanılarak malzeme basınç tespit çalışmalarına ilişkin görsel Şekil 3.21’de sunulmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 3.21. Tahribatsız yöntemlerle yapılan beton numune deneyleri: (a); Schmidt çekici (Beton Test Çekici)” yöntemi, (b); ultrasonik atılımlı dalga hızı (UPV) ölçüm yöntemi.

Beton imalatı ve malzeme dayanım deneyleri ilişkin sonuçlar “ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA” bölümünde detaylı olarak sunulmaktadır.

3.1.7. Betonarme kirişlerin termal genleşme katsayılarının tayini üzerine deneysel çalışma

Beton ve çelik donatı malzemelerinin beraber kullanılmasıyla elde edilen kompozit yapı elemanlarıyla oluşturulan betonarme yapılarda iki malzemenin beraber kullanılmasının asıl nedeni birbirine çok yakın termal genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Uysal (2004) çalışmasında, herhangi bir maddenin ısıtılması veya soğutulması sırasında atomsal boyutlarda hareketlenmeler oluşmaktadır. Madde ısıtıldığında atomlar arası mesafenin artışıyla uzama, soğutulduğunda atomlar arasındaki mesafede kısalma meydana gelmektedir. Maddenin sıcaklığının 1°C artış veya azalması durumunda maddenin birim boyunda meydana gelen değişim maddenin lineer termal genleşme katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Termal genleşme katsayısı “ α , sıcaklık değerinin θ_1 ’den θ_2 ’ye çıktığı haldeki boydaki değişim ΔL , θ_1 sıcaklıktaki ilk boy L_1 ile ifade edilecek olursa termal genleşme katsayısı Denklem 3.1;

$$a = \frac{\Delta L}{L_1 x (\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.1)$$

Souder and Hidnert (1919), çalışmalarında termal genleşme testleri sırasında toplanan veri birikiminden numuneler seçmişlerdir ve yalıtım malzemelerinin sıcaklık değişimlerine maruz kaldığı durumlarda termal genleşmenin önem arz ettiği vurgulamışlardır. Genleşme katsayıları aralığı oldukça geniş olduğu, bazı numuneler için 1.6×10^{-6} $1/^\circ\text{C}$ değerinden 109×10^{-6} $1/^\circ\text{C}$ değerine kadar değişmekte olduğunu belirtmişlerdir. Numuneler sıcaklık döngüsünden geçirildiğinde, özellikle 60°C 'nin üzerindeki sıcaklıklara ulaşıldığında kalıcı bir şekil değiştirme yaptığı gözlemlenmiştir. Her zaman bir büzülme olan bu uzunluk değişimi, hafif bir büzülmenin metalik elektrotları veya ekleri sıkıştırma ve tutma eğiliminde olduğu durumlarda avantaj sağlayabildiğini, öte yandan bu değişikliklerin hassas boyutlara bağlı hassas cihazlarda çok ciddi etkilere sebep olabileceğini vurgulamışlardır.

Johnson and Parsons (1944), çalışmalarında donmaya karşı direncin betonun gerektirdiği özelliklerden biri olduğu beton yapılarında agreganın termal genleşmenin önemli bir faktör olabileceğini belirtmişlerdir. Örneğin, bir agreganın termal genleşmesi çimentonun bileşenlerinden önemli ölçüde farklıysa, potansiyel bir uyumsuzluğun mevcut olacağını ve bu durumun betonun büyük sıcaklık değişikliklerine maruz kalması durumunda aşırı iç gerilimlere neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Fakat beton agregalarının ısı genleşme özelliklerine ilişkin yeterli bilgi eksiktir. Buna göre, agrega malzemelerinin özelliklerine ilişkin genel bir çalışmanın bir parçası olarak, çeşitli kaynaklardan agregalar elde etmişlerdir ve agregaları oluşturan çeşitli kaya ve mineralleri temsil eden fraksiyonlara ayırmışlardır. Daha sonra -20°C ile $+60^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında kayalar ve mineraller için doğrusal termal genleşme katsayıları belirlemişlerdir. Çalışmalarında agregaların çeşitli kaya ve mineral fraksiyonlarının tanımını, bu malzemelerin ilgili termal genleşme katsayılarını ve betona bağlı olarak termal genleşmeyi etkileyebilecek faktörleri değerlendirmişlerdir.

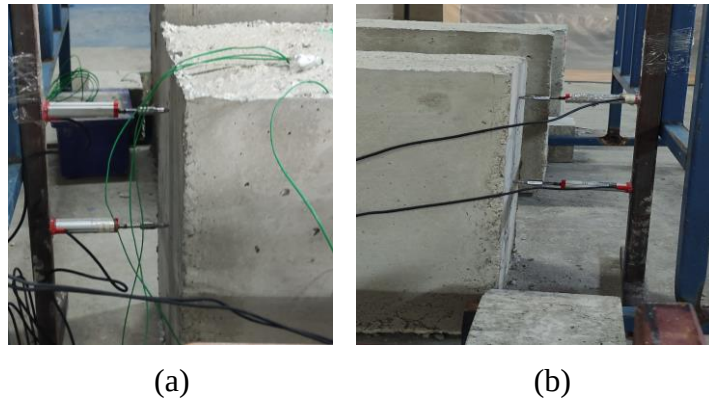
Uysal (2004), çalışmasında yapı elemanlarında yüksek termal etkilerin sonucu olacak büyük gerilmeler oluşabileceğini ve bu gerilmelerin hasara neden olabileceğinden bahsetmiştir. Termal etkiler sonucu çatlak oluşması ve buna bağlı olarak dayanımın azalması, mevcut yüklerin meydana getirdiği gerilmelere ilave olarak termal gerilmelerle

daha büyük gerilme değerlerine ulaşması sonucu yapı güvenliğinde dikkate değer azalma olacağını vurgulamıştır.

Gerçekleştirilen deneysel tez çalışması kapsamında imal edilen betonarme kiriş numunelerinde bu konu üzerine çalışma yapılarak irdelenmiştir. Bu amaçla imalatı gerçekleştirilen ve yeterli dayanımı alması beklenen betonarme kiriş numunelerinin Şekil 3.22 (a) ve Şekil 3.22 (b)'de gösterildiği üzere sıcaklık takip işlemi ile beraber kiriş numunelerinin her iki uç kısmından potansiyometrik cetveller yardımıyla deformasyon ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık-deformasyon takibi için kullanılan Testlab Basic (2021) programının yazılım arayüzü ve oluşturulan deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 3.23'(a) ve Şekil 3.23 (b) de sunulmaktadır. Çalışma ile betonarme kiriş numunelerinin;

- Sıcaklık-zaman grafikleri
- Deformasyon-zaman grafikleri
- Sıcaklık-deformasyon grafikleri
- Sıcaklık-deformasyon grafikleri

üzerinden elde edilen değerler dikkate alınarak gerekli hesaplamalar ile betonarme kirişler üzerinde termal genleşme katsayıları ve davranış irdelenmiştir. Ancak, laboratuvar ortamında sıcaklık sabit kaldığından neredeyse sıfır değerinde deformasyon okunmuş ve elde edilen veri ile termal genleşme katsayısı hesabının anlamsız olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 3.22. Betonarme kiriş numuneleri sıcaklık-deformasyon ölçüm düzeneği, (a): Kiriş numunesi sol uç yerleşimi, (b): Kiriş numunesi sağ uç potansiyometrik cetvel sensör yerleşimi.



(a)

Deney No	Kanal	Değer	Birim
1211	1	22.66	C
1212	2	21.03	C
1213	3	21.79	
1214	4	22.48	
1215	5	27.98	mm
1216	6	21.00	mm
1217	7	27.18	mm
1218	8	32.36	mm

(b)

Şekil 3.23. Sıcaklık-deformasyon ölçümü ait genel görünüm ve kullanılan yazılım arayüzü, (a) Sıcaklık-deformasyon takibi için oluşturulan deney düzeneği, (b) Veri toplama istemi yazılımının arayüzü.

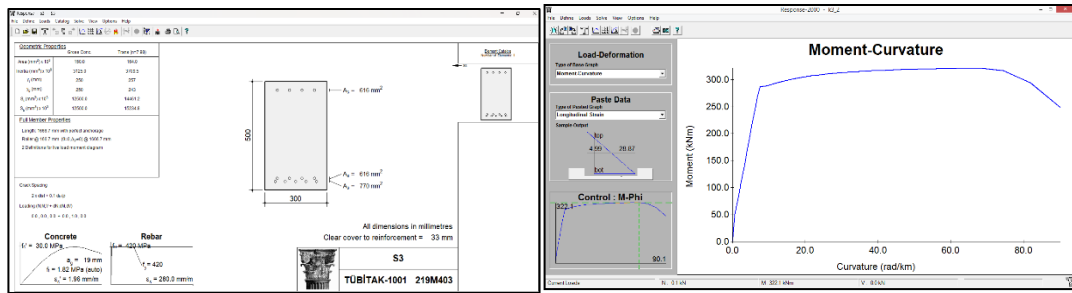
3.1.8. Deney düzeneğinin tasarımı, imalatı ve kontrolü

Çalışma dahilinde tam ölçekli betonarme kirişin dört noktalı eğilme etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda ulusal ve uluslararası pek çok dizinde yeterli teknik özelliklere sahip deney düzeneklerinin kullanıldığı görülmüştür. Yapılacak olan deneysel çalışmada laboratuvar zeminin güçlü zemin olmayışı en önemli kısıtlama olmuştur. Gazi Üniversitesi'nde tam ölçekli deneyler gerçekleştiren Karahan (2008) çalışmasında aynı gerekçelerden dolayı kapalı devre olarak tanımlanabilecek kiriş yükleme sistemi kullanmıştır. Bu yöntem benzer bir sistem tasarımı ve üretilmesi deneysel çalışmanın yürütülmesi için zorunlu hale gelmiştir. Kapalı devre sistemler, deney sırasında uygulanan yükün kapalı yükleme çerçevesi içerisinde elastik şekilde değiştirme enerjisine çevirerek dengelemesi ve zemine sadece düzenek ile betonarme kiriş numunelerinin ağırlığını aktarmasıdır.

Dört noktalı eğilme deneyinde 4,5 m açıklığa sahip betonarme kirişlerin ortasına eşit uzaklıkta birbirine 1 m mesafede iki mesnet üzerine bir çelik yük aktarma kirişi ve bu kirişin ortasına hidrolik piston ile monolitik olarak artan tekil yük uygulanması tasarlanmıştır. Bu nedenle, deney düzeneğinin tasarımında en önemli kriter uygulanacak tekil yük değeri olmuştur. Deneyisel çalışma kapsamında imalatı yapılan bütün betonarme kirişler denge altı kesit olarak tasarlanmıştır. K3 kesitli betonarme kiriş çekme ve basınç donatısına ve en büyük moment taşıma kapasitesine sahip olmasından dolayı deney düzeneğinin tasarımında bu kesit referans alınarak yapılmıştır.

Deney düzeneği tasarım çalışmalarında K3 kesitli betonarme kiriş gruplarının C30/37 sınıfı beton ve S420 çelik sınıfı karakteristik malzeme dayanımları üzerinden teorik akma momentı taşıma kapasitesi 293,1 kN.m olarak hesaplanmıştır. Dört noktalı eğilme deneyi için K3 kesitli betonarme kiriş numunesinin bu kapasiteye ulaşması için uygulanması gereken tekil yük $P_{mak} = 335$ kN olduğu belirlenmiştir. Yükleme düzeneğinin bu değeri karşılayabilmesi için 50 ton kapasiteli olarak imal edilmesi uygun görüldüğü belirtilmiştir.

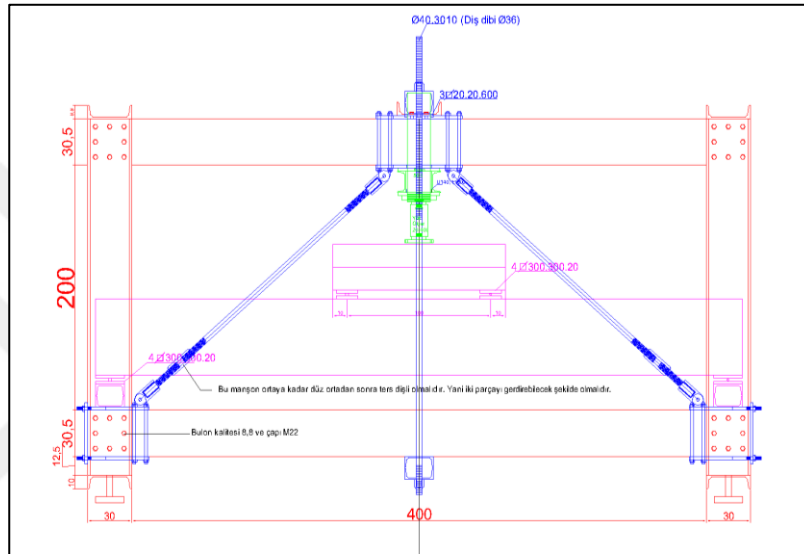
Yükleme çerçevesinin imalatı öncesinde TS 708 Çelik-Betonarme İçin-Donatı Çeliği (2016) standardı uyarınca betonarme kiriş imalatında kullanılmak üzere temin edilen donatılardan her bağdan örnek numune alınarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyisel çalışma sonucu donatı dayanımları kullanılarak Response2000 (2000) yazılımında K3 kesitli betonarme kirişler için yeniden moment taşıma kapasite analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda K3 kesitli betonarme kiriş numunelerinin moment-eğrilik grafiği Şekil 3.24 (a) ve Şekil 3.24 (b)' de sunulmuştur.



Şekil 3.24. Response2000 yazılımında betonarme kiriş analizi, (a) Response2000 yazılımında K3 kesitli betonarme kiriş numunesinin oluşturulması, (b) Deneyisel olarak belirlenen malzeme dayanımları ile yapılan kesit analizi.

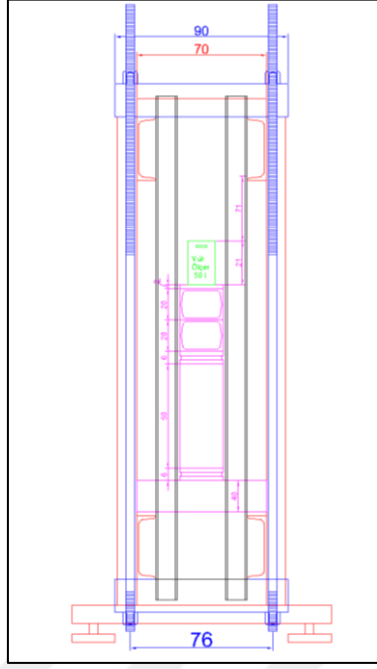
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Şekil 3.24'te sunulan analizlerde K3 kesitli betonarme kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesi $M_r = 322,1$ kN.m kadar ulaşabileceği ve bunun için uygulanacak maksimum tekil yükün $P_{\max} = 390,4$ kN olarak hesaplanmıştır. Çelik yükleme sistemi için öneride belirtilen 50 ton' luk kapasitenin yeterliği olacağı sonucuna varılmıştır. Bir sonraki aşamada çelik çerçeve yükleme düzeneğinin tasarım ve analizine geçilmiştir. Tasarlanan çelik çerçeve yükleme düzeneğinin ön görünüşüne ilişkin görsel Şekil 3.25'te sunulmuştur.



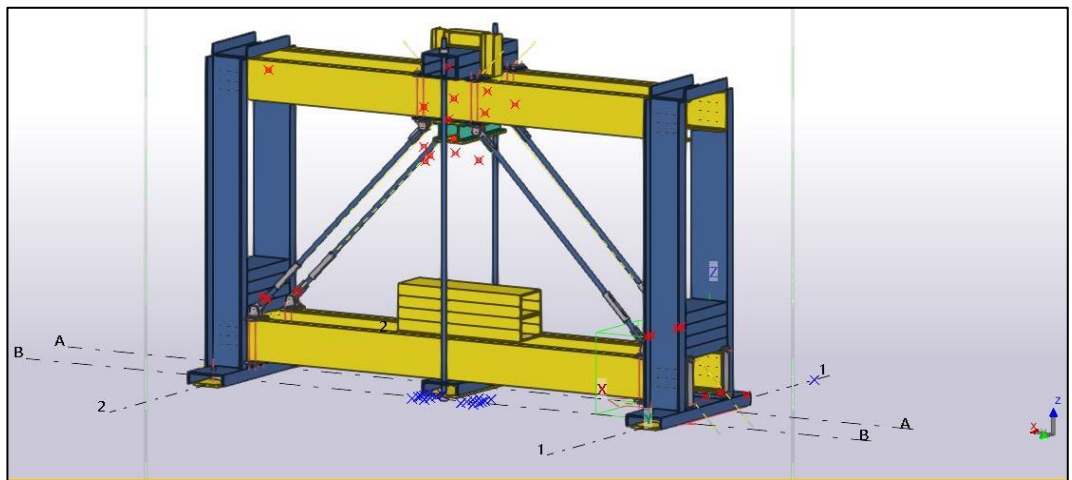
Şekil 3.25. Çelik çerçeve yükleme düzeneği ön görünüşü

Şekil 3.25'te sunulan yükleme çerçevesi bulonlu ve kaynaklı birleşimlerden oluşmaktadır. Ana parçaların birleşiminde yüksek dayanımlı (8.8) 22 mm' lik bulonlarla yapılmıştır. Yükleme çerçevesi Şekil 3.26'da görüldüğü üzere 70 cm genişliğinde yapılmıştır. Dikme ve çaprazların kaldırılmasıyla betonarme kirişlerin oturacağı iç genişlik 50 cm olarak tasarımı yapılmıştır. Yükleme çerçevesinin tasarım görselleri Autocad (2021) yazılımında hazırlanmıştır.

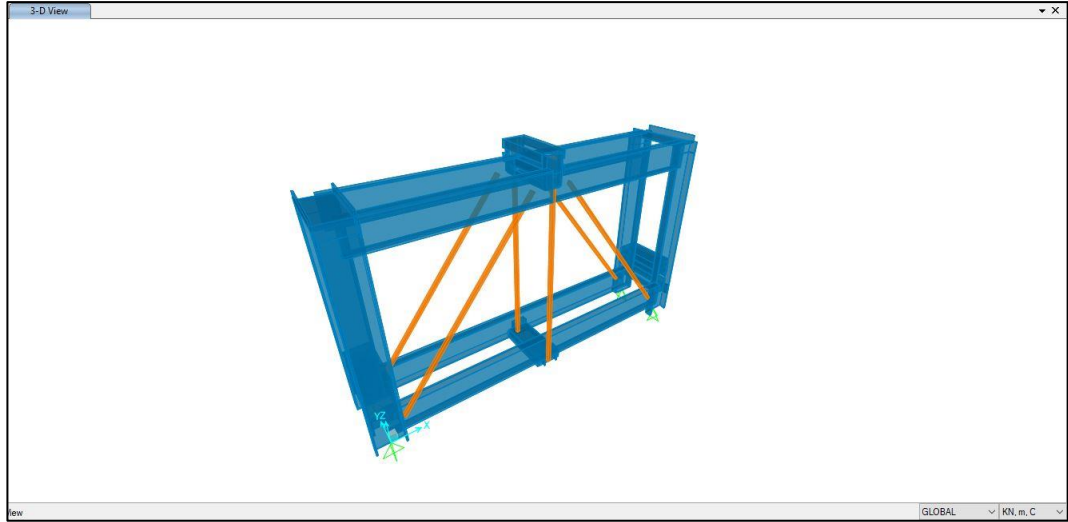


Şekil 3.26. Yükleme düzeneği yan görünüşü

Mimari çizimleri işlemi tamamlandıktan sonra yükleme çerçevesi Tekla Structures (2021) ve SAP2000 (2021) yazılımları kullanılarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Yükleme çerçevesinin ana taşıyıcıları üzerinde UPN350 ve UPN300 çelik profilleri çalışılmıştır. Yapılan analizlerde UPN300 çelik profilin yeterli olduğu ve imalatı kullanılmasına karar verilmiştir. Modelleme ve analiz için kullanılan yazılımlara ilişkin görseller sırasıyla Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de modellemelere sunulmaktadır.

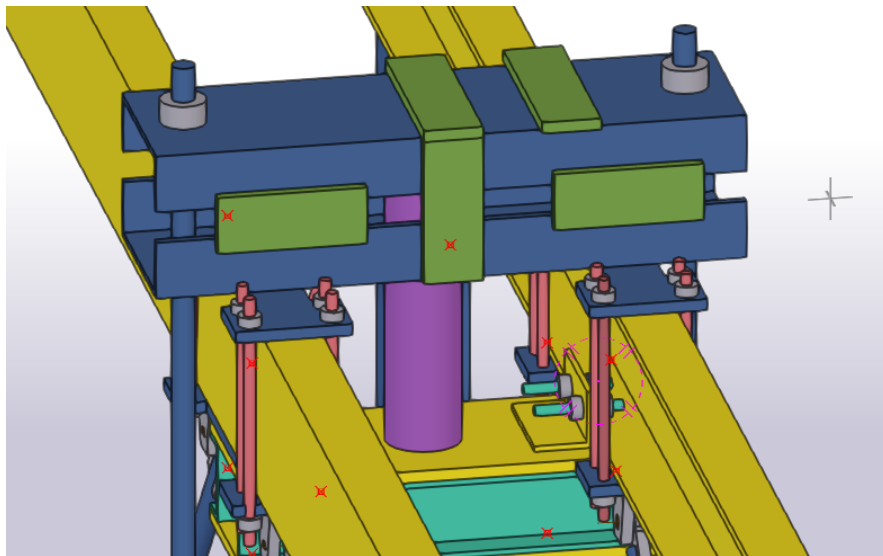


Şekil 3.27. Tekla Structures (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli



Şekil 3.28. SAP2000 (2021) yazılımında oluşturulan yükleme çerçeve modeli

Yapısal modellemelerde yapılan analizlerde 50 ton yükleme etkisinde UPN300 profil kullanılmasında sistemde oluşan elastik deformasyonlar 3,92 mm uzama ile orta dikmede meydana gelmiştir. Bu yük etkisi altında presin bağlı olduğu üst kiriş profillerinde 2,24 mm, alt kiriş profillerinde ise 3,08 mm sehim yaptığı hesaplanmıştır. Oluşacak iç kuvvetler dikkate alınarak tekraren kontrol edilmiş ve imalat aşamasına geçilmiştir. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne bölümü özel olarak dikkatli bir şekilde çalışılmıştır. Şekil 3.29’da sunulan hidrolik piston haznesinin detaylı görselde profil ve bağlantılara ek olarak 2 cm kalınlığındaki plakalar için ek güçlendirmeler kullanılarak imal edilmiştir.



Şekil 3.29. Hidrolik pistonun yerleştirileceği hazne tasarımı

Çelik yükleme çerçevesi imalat için gerekli malzemelerin temin edilmiş ve Erzurum Teknik Üniversitesi garaj ve atölyeler bölgesinde yer verilen laboratuvar alanında işinde teknik uzmanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Profil ve diğer çelik bileşenlerin montaj tez çalışmasını destekleyen proje ekibi ve bursiyerlerinin gözetimi eşliğinde yapılmıştır. Yükleme çerçevesi imalatın uygulamasının kolaylık sağlaması amacıyla giriş kapısına yakın yapılmıştır ve imalat tamamlandıktan sonra deneylerin gerçekleştirildiği yere Şekil 3.30’da sunulan görselde olduğu gibi mobil vinç ile yerine alınmıştır.

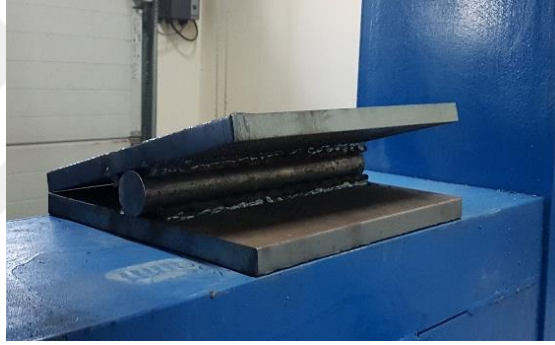


Şekil 3.30. Yükleme çerçevesinin deneysel çalışma alanına yerleştirilmesi

Yükleme çerçevesinin önemli bileşenleri olan mesnetler ve tekil yükü kirişlere aktarılması amacıyla kullanılacak kutu profiller tasarıma uygun olarak imal edilmiştir. Yükleme için kullanılacak yük hücresinin pistonu ve yükleme başlığına bağlantısında kullanılacak ara parçaların torna işlemleri de proje ekibi ve bursiyerlerinin kontrolü altında yaptırılmıştır. Mesnet plakalarına ek olarak 2 cm kalınlığında plakalar temin edilmiştir ve yedeğe alınmıştır. Bir diğer önemli husus ise deneysel çalışmanın gerçekleştirileceği alanda gezer vinç olmamasıdır. Bu hususta, her biri 2 ton taşıma kapasitesine sahip 2 adet portatif vinçler kullanılarak betonarme kiriş numuneleri düzeneğe alınması sağlanmıştır. İmalat sonrası yükleme çerçevesi ve deney numunelerinin düzeneğe yerleştirilmesinde kullanılacak portatif vinçlere ilişkin görsel Şekil 3.31’de sunulmaktadır. Mesnet detaylarına ilişkin görsel ise Şekil 3.32’de sunulmuştur.

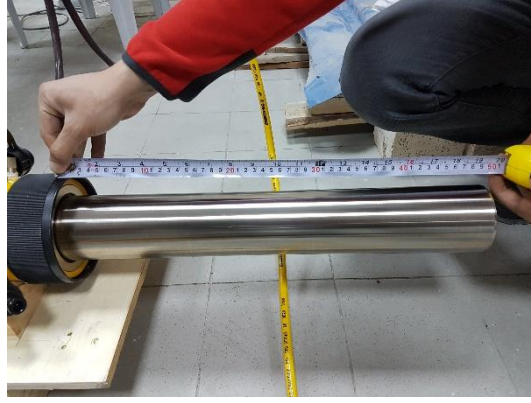


Şekil 3.31. Yükleme çerçevesi ve portatif vinçlerin genel görünümü



Şekil 3.32. Yükleme çerçevesi mesnet detayı

Bir sonraki aşamada hidrolik piston ve el pompasından oluşan yük uygulama ünitesi temin edilmiştir ve yükleme çerçevesine entegre edilmiştir. Hidrolik piston için yükleme çerçevesinin tasarımı için seçilen 50 ton yükleme ve betonarme kiriş numunelerinin orta nokta çökme değerleri baza alınarak 50 ton kapasiteli ve 511 mm strock uzunluğuna sahip ENERPAC marka RR5020 model çift tesirli hidrolik silindir ile ENERPAC marka P464 model el pompa adaptörü, manometre ve hortumları ile temin edilmiştir. Piston temin edildikten sonra Şekil 3.33'te sunulduğu üzere piston strock uzunluğu kontrol edilmiştir ve yükleme çerçevesine entegre işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.33. Hidrolik piston strock uzunluğunun kontrolü

Betonarme kiriş numunelerinin deneylerinde uygulanacak olan yük ölçümü için Şekil 3.34’te sunulan Erzurum Teknik Üniversitesi laboratuvarında bulunan CAS marka 100 ton kapasiteli yassı yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinin kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra hidrolik pistonu entegresi yapılmıştır. Entegre işleminden sonra pilot deneylere geçilmiştir. Pilot deneylerde yük hücresinin hidrolik piston ve başlık arasındaki ara parçalarda oluşan temassızlık ve yük aktarmama sorunlarıyla karşılaşmıştır ve farklı bağlantı uygulamalarıyla sorunlar düzeltilerek sorunsuz yük ölçümü alınmıştır.



Şekil 3.34. Yük ölçümünde kullanılan CAS marka yassı yük hücresi

3.1.9. Ölçüm düzeneği

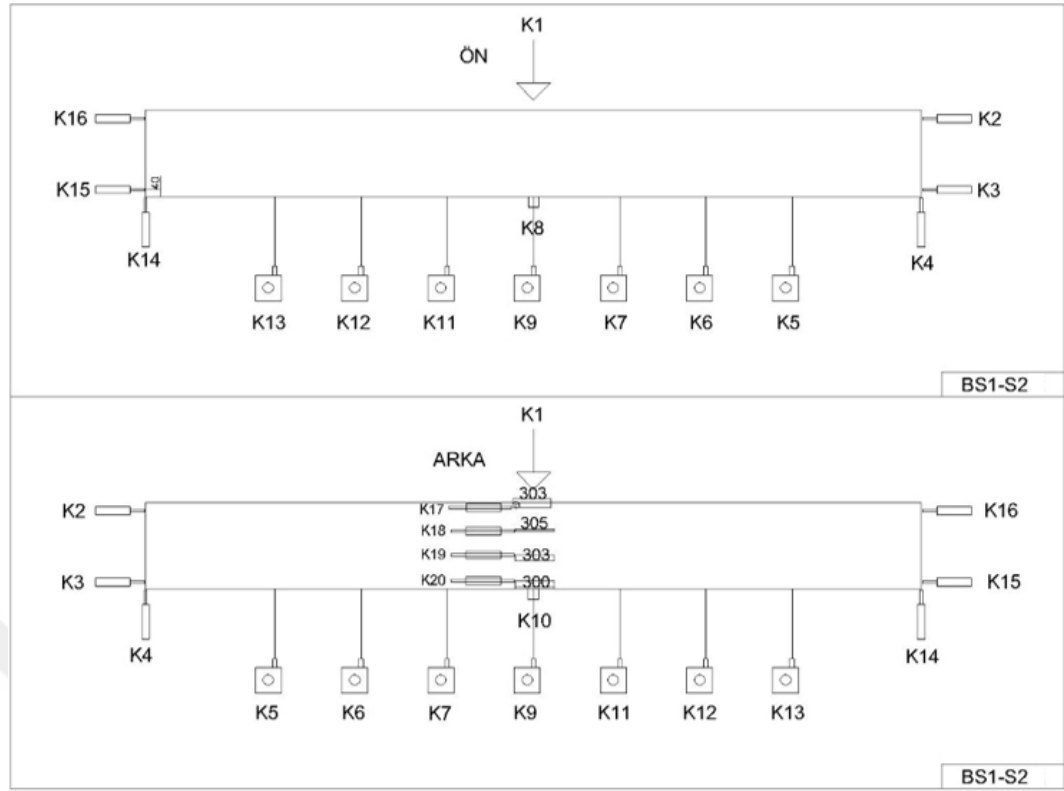
Deneysel tez çalışmasının en önemli hususu yük ölçümünün yanında mekanik davranış parametresi olan kiriş numunesinin orta nokta düşey çökme değeridir. Bu ölçümlere ek olarak kiriş numunesinin maksimum moment bölgesinden eğrilik hesaplarında kullanılmak üzere yatay deformasyon ölçümünde potansiyometrik cetvel

türü deformasyon ölçüm sensörleri temin edilmiştir. Opkon marka sensörler yerli üretim olup İstanbul’ da faaliyet gösteren bir firmadan tedarik edilmiştir. Tedarik edilen cihazlarla birlikte, yürütücü kuruluş envanterinde bulunan LVDT türü deformasyon ölçüm sensörlerinden de yararlanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan tüm sensör tiplerine ilişkin genel görüntüsü Şekil 3.35’te sunulmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılacak tüm sensörlerin kalibrasyonları yapılmıştır. Yapılan kalibrasyonların doğruluğu cetvel ve şerit metre kullanılarak teyit edilmiştir.



Şekil 3.35. Deformasyon ölçümlerinde kullanılan sensörlerin genel görünümü

Deneysel çalışmanın en önemli verisi olan orta nokta düşey çökme değerinin ölçümünde sensörlerde oluşabilecek herhangi bir sorunun önüne geçilmesi amacıyla kiriş numunelerinin orta noktasına 3 adet düşey sensör bağlantısı yapılmıştır. Mevcut sensör sayısının yeterli sayıda olmasından hareketle kiriş açıklığı boyunca ~50 cm aralıklarla düşey yer değiştirmeler için sensörler yerleştirilerek kirişin deney sırasında açıklık boyunca yapacağı sehimin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, istenilen yük seviyesinde kiriş deformasyon paterninin çıkarılması mümkün olmuştur. Betonarme kiriş numunelerin üzerinden alınan düşey ve yatay yer değiştirmelerin ölçümü için yerleştirilen sensör yerleşim planı ön ve arka görünümüne ilişkin genel görsel Şekil 3.36’da sunulmaktadır.



Şekil 3.36. Betonarme kiriş numunelerinin yük ve deformasyon ölçüm sensörlerinin yerleşim planı.

Şekil 3.36’da sunulan sensör yerleşim planında K harfi veri toplama sisteminde her sensörün bağlantısı yapılan kanal kelimesine kısaltması olarak kodlandırılmıştır. Bu harfin yanında bulunan sayılar ise veri toplama sisteminde bağlantı yapılan kanal numarasını temsil etmektedir. Yerleşim planında verilen isimlendirmede, K1 yük hücre, K2, K3 ve K4 mesnet noktalarının düşey yer değiştirmesini temsil etmektedir. Ön ve arka sensör planı incelendiğinde orta noktada bulunan K8, K9 ve K10 orta nokta düşey deformasyon ölçer sensörlerdir. Bu üç sensöre ilave olarak K5, K6, K7, K11, K12 ve K13 sensörleri ile istenilen yüklerdeki paternleri oluşturmak için düşey deformasyonu ölçecek şekilde yerleştirilen sensörlerdir. Eğrilik hesaplamaları amacıyla kirişin arka kısmının orta noktasında 300 mm mesafede ölçüm alınması için yatay deformasyon sensörleri temsil eden K17, K18, K19 ve K20 kodlu sensörler yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. K2, K3, K15 ve K16 kodlu sensörler betonarme kiriş numunelerinde uç bölgelerde oluşacak dönmelerin ölçümü amacıyla yerleştirilmiştir. Ancak betonarme kiriş numunelerinin performans değerlendirme çalışmalarında kullanılmamıştır.

DeneySEL çalışmanın en önemli değerlendirme verisi olan yük ve deformasyon ölçümlerinin alınmasında sensörlerin bağlantısında 8 kanallı 3 adet statik veri toplama

3. MATERYAL ve YÖNTEM

sistemi birbirine seri bağlanarak toplamda 24 kanallı bir düzenek oluşturularak alınmıştır. Veri toplama sisteminin bilgisayar ortamına aktarılmasında Testlab Basic (2021) yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışma sırasında herhangi bir elektrik kesintisi vb. olayların önüne geçmek amacıyla online UPS güç kaynağı kullanılarak desteklenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan veri toplama sistemine ilişkin görsel Şekil 3.37’de sunulmaktadır.



Şekil 3.37. Deneysel çalışmada kullanılan veri toplama sistemi genel görünümü

Pilot numune deneyleri öncesi hazırlanan veri toplama sistemi ve yükleme çerçevesine ilişkin genel görünümü Şekil 3.38’de sunulmaktadır.

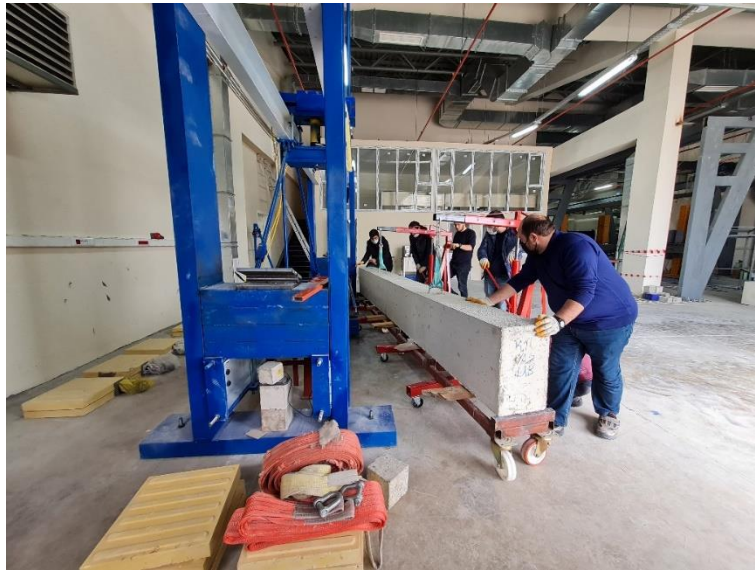


Şekil 3.38. Yükleme çerçevesi ve veri toplama sisteminden oluşan deney düzeneği

3.1.10. Pilot deneyler ve yükleme düzeneğinin kontrolü

Yükleme düzeneği ve veri toplama sistemlerinin kurulum aşaması tamamlandıktan sonra pilot deneyler ile kontrol aşamasına geçilmiştir. Bu amaç kapsamında 3 adet pilot betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Kontrol aşamasında pilot numuneler üzerinden betonarme kiriş numunelerin deney düzeneğine taşınması ve alınması, yükleme düzeneğinin ve veri toplama sisteminin kontrolleri sırasıyla yapılmıştır.

Laboratuvar önünde bulunan boş alanda gerçekleştirilen imalatlarda betonarme kiriş numuneleri zemin üzerinde deney gününe kadar muhafaza edilmiştir. Deney günü içeri alınmasında portatif vinçlerin ayak uzunluklarından dolayı zeminden kaldırılamamıştır. Bu konuda yürütücü kuruluş araçlarından yardım alınarak zeminden kaldırılarak kiriş numunelerinin taşınması için özel yaptırılan tekerlekli çelik taşıma aracı üzerine yerleştirilmiş ve çelik taşıma aracı üzerindeki aralıklarda ahşap parçalar ile desteklenerek deney düzeneğinin önüne taşınmıştır. Bu aşamadan sonra çelik taşıma araçları yerden yüksekliklerinde portatif vinçlerin altına girebilecek şekilde tasarımı yapılmış ve yükleme çerçevesine yerleştirilmesinde bu özelliğinden yararlanılarak portatif vinçler ile yerleştirilmiştir. Deneylerin doğru ölçüm yapılması için taşınması ve sisteme alınması işlemi sırasında özenli bir şekilde alınarak herhangi bir çatlak vb. hasar oluşmaması sağlanmıştır. Betonarme kiriş numunelerinin laboratuvar alanına taşınmasına ilişkin görsel Şekil 3.39’da sunulmaktadır.



Şekil 3.39. Betonarme pilot kiriş numunelerin taşınması işleminin genel görünümü

Taşınma işleminden sonra yükleme düzeneği alınması işlemine geçilmiştir ve bu işleme ilişkin görsel Şekil 3.40’da sunulmaktadır.

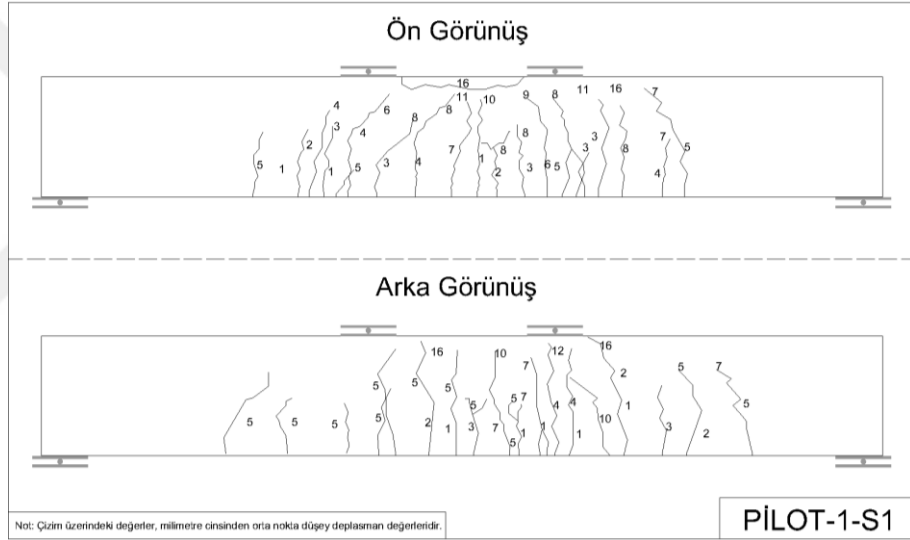


Şekil 3.40. Betonarme pilot kiriş numunelerinin yükleme düzeneğine alınması işlemine ilişkin genel görünümü.

Şekil 3.40’da sunulduğu üzere betonarme kiriş numunelerinin sisteme bu şekilde alınmasına karar verilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra betonarme kiriş numuneleri detaylı şekilde incelenerek herhangi bir hasar olup olmadığı kontrolleri yapılmıştır ve herhangi bir hasarın oluşmadığı teyit edilmiştir. Pilot deneylerle yapılan işlemler sırasıyla verilmiştir.

DeneySEL çalışma kapsamında yükleme düzeneğine alınan ilk betonarme kiriş numunesi PİLOT-1 kodlu numune olmuştur. PİLOT-1 kodlu betonarme kiriş numunesi K1 grubu kesite sahip olup portatif vinçler ve halatlar yardımıyla başarılı bir şekilde düzeneğe yerleştirilmiştir. “Ölçüm düzeneği” başlığında yer verilen sensör yerleşimine uygun olarak sensörler yerleştirilmiştir. Sonrasında yükleme için salt eğilme davranışı incelenmesi amacıyla 4 noktalı eğilme deneyine uygun olarak yükleme mesnetleri ve yükleme kirişleri yerleştirilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Deney günü beton basınç dayanımı için küp numune üzerinden aksenal basınç deneyi yapılarak 32 MPa olarak belirlenmiştir.

K1 grubu kesite sahip PİLOT-1 numunesi 4 noktalı eğilme deneyinde yapılan yükleme ile eğilme momentinin maksimum ve sabit değer aldığı alması beklenen kirişin ortasında 1 m açıklıkta ilk çatlağın geldiği tespit edilmiştir. Ancak yük verisi okunamamıştır. Eğilme çaylağının ilk oluştuğu anda orta nokta çökme değeri 3,48 mm olarak okunmuştur. Kirişin 120 mm düşey deplasman yaptığı anda beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı gözlemlenmiştir. Betonarme kiriş numunesinde 4 noktalı eğilme deneyi için yapılan yükleme düzeni Şekil 3.41’de sunulan çatlak desenleri ve beton ezilme bölgeleri detaylı olarak incelendiğinde istenilen yüklemenin doğru şekilde yapıldığı göstermektedir. Ancak yük verisinin okunamaması yük hücresiyle ilgili sorun olduğunu göstermektedir. PİLOT-1 kodlu betonarme kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrasına ilişkin görsel Şekil 3.42 (a) ve Şekil 3.42 (b)’de sunulmaktadır.



Şekil 3.41. PİLOT – 1 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni



(a)

(b)

Şekil 3.42. PİLOT-1 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.

PİLOT-1 kodlu ilk pilot deney sonucu kiriş orta açıklığında meydana gelen eğilme çatlakları ve bu takiben oluşan göçme mekanizması incelendiğinde beklenen yüklemenin düzgün şekilde sağlandığı anlaşılmıştır. Mesnet bölgelerinin altından alınan düşey çökme değerinin 0,1 mm ve altında olduğu belirlenmiştir. Alınan deformasyon ölçümleri doğruluğu kontrol edilmiştir ve bir sorun olmadığı anlaşılmıştır. Ancak, yük ölçümü okunamadığından yük hücresi veri aktarımında bir sorun olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda önce kanal bağlantısı kontrol edilmiştir ve bağlantıda herhangi bir sorun olmadığı ortaya çıkmıştır. Sorunun piston, yük hücresi ve yükleme başlığı arasındaki bağlantı parçalarından kaynaklanacağı düşünülerek farklı bir bağlantı konfigürasyonu tasarlanarak PİLOT-2 kodlu numunenin deneyine geçilerek tekrar kontrol edilmiştir. Bu kapsamda yapılan değişiklik Şekil 3.43 (a) ve Şekil 3.43 (b)'de sunulmaktadır.

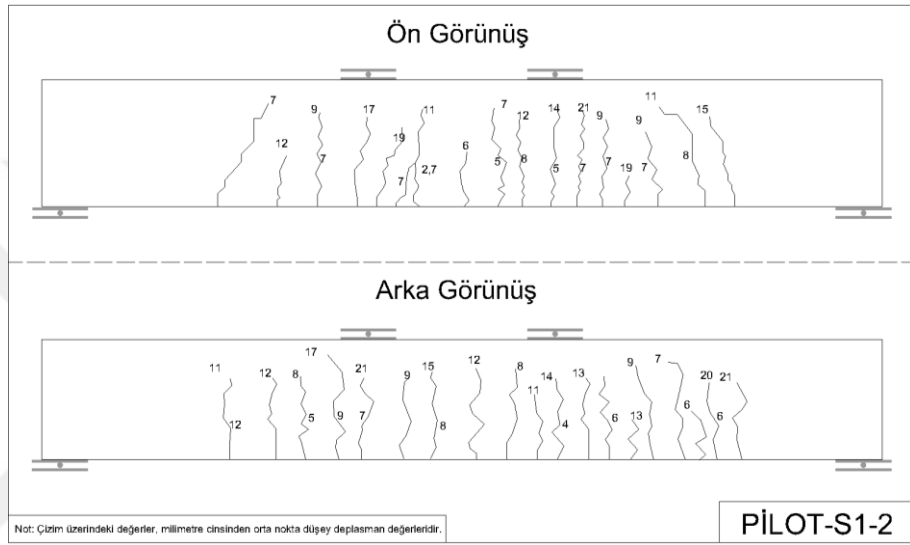


Şekil 3.43. Yükleme mekanizması yapılan değişiklik, (a) PİLOT-1 deney sırasında yük hücresi aktarma mekanizması, (b) PİLOT-2 deney sırasında yük hücresi aktarım mekanizması.

PİLOT-1 numunesinin deneyinde orta nokta çökme değerlerinin ölçümü için kiriş orta noktasının ön ve arka tarafına 2 adet LVDT kullanılarak ölçüm alınmaya çalışılmıştır. Ancak ölçüm için yüzey ne kadar pürüzsüz hale getirilse bile ölçümün doğru olarak alınabilmesi için uygun olmadığı, deneyin ilerleyen aşamalarında sıkışma ve sürtünmeden dolayı hasar alabilecekleri anlaşılmıştır. Bu kapsamda, sonraki pilot deneylerde bu iki sensör yerine potansiyometrik cetvel türü olan sabit bağlantı aparatlarıyla kiriş altına bağlantı yapılarak ölçüme geçilmiştir. LVDT'ler ise kirişin daha az düşey yer değiştirme yapan kiriş mesnetlerine yakın bölgelere yerleştirilerek hedeflenen ölçümlerin alınmasına karar verilmiştir.

Yükleme sisteminde ve sensör yerleşiminde yapılan değişikliklere karar verildikten sonra PİLOT-2 kodlu K1 kesitli kiriş numunesinin deney aşamasına geçilmiş

ve deney düzeneğine alınmıştır. Deney gerçekleşeceği gün beton eksenel basınç dayanımı 32 MPa olarak tayin edilmiştir. Deney başlangıcında düşük yüklerde (~ 4 kN civarında) yük hücresinden veri okuması alınabilinmiştir. Ancak kiriş numunesinin düşey çökme değeri artış gösterirken okunan yükün sabit kalması yük hücresinin için yapılan değişikliğin olumlu olmadığı gözlemlenmiştir. Deneye orta nokta düşey çökme değeri üzerinden devam edilmiştir. Deney orta nokta düşey çökme değeri 225 mm ve Şekil 3.44'te sunulan çatlak deseni oluşuncaya kadar devam edilmiştir.



Şekil 3.44. PİLOT – 2 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni

PİLOT – 2 numunesi deney aşamasında yük hücresi ile hidrolik piston bağlantı noktasında çelik plakanın yük artışıyla eğilerek yük hücresi ile teması kaybetmeye başladığı ve yük değerinin okunmasına engel olduğu fark edilmiştir. Söz konusu problemin giderilmesi amacıyla plaka kalınlığı artırılmasına karar verilmiştir. PİLOT–2 kodlu betonarme kiriş numunesinin deney öncesi ve sonrası ilişkin genel görünümü Şekil 3.45 (a) ve Şekil 3.45 (b)’de sunulmaktadır.

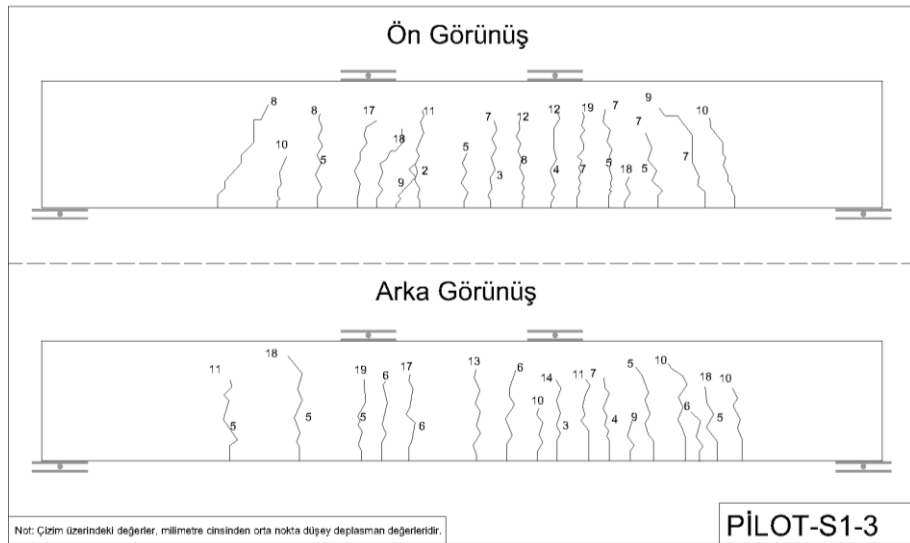


(a)

(b)

Şekil 3.45. PİLOT-2 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.

Yük hücresinde bağlantılarında karar verilen değişiklikler yapılarak PİLOT-3 kodlu betonarme kiriş numunesinin deney aşamasına geçilmiştir. Önceki deneylerde olduğu gibi öncelikle deney günün eksenel basınç dayanımı 31 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada ilk düşey çatlağın 2 mm orta nokta düşey çökme değerinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Beton basınç bölgesinin ezilmesi yaklaşık 100 mm orta nokta düşey çökme değerinde meydana gelmiştir. Kiriş numunesinde akma başlangıcı 124 kN seviyelerinde olmuş ve yapılan hesaplamalarda beklenen değerle örtüştüğü tespit edilmiştir. Deney sonucu elde edilen çatlat desenine ilişkin çizimler Şekil 3.46’da ve kiriş numunesinin deney öncesi ve sonrası genel görünüşleri Şekil 3.47 (a) ve Şekil 3.47 (b)’de sunulmaktadır.

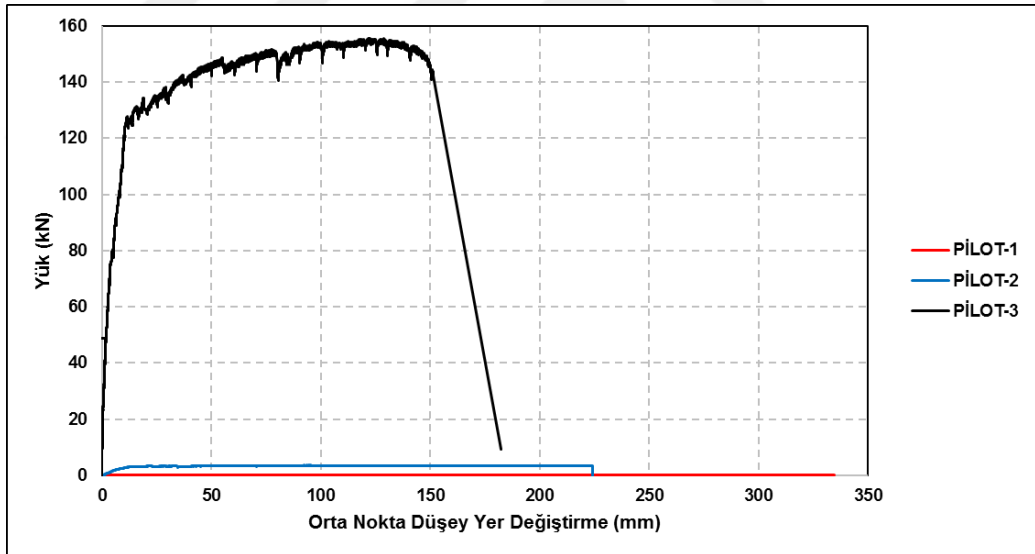


Şekil 3.46. PİLOT – 3 numunesinin deney sonu oluşan çatlak deseni



Şekil 3.47. PİLOT-3 numunesinin, (a) Deney öncesi görüntüsü, (b) Deney sonu görüntüsü.

Yapılan pilot deneyler sonucu test düzeneği kontrol edilmiştir ve deneysel çalışmada için imal edilen tam ölçekli betonarme kirişlerin deney aşamasına geçilmesine hazır olduğuna karar verilmiştir. Ayrıca yapılan pilot numune deneylerinde elde edilen yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri Şekil 3.48’de toplu olarak sunulmuştur.



Şekil 3.48. K1 kesitli pilot deney numunelerinin yük- orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.

3.1.11. Betonarme kiriş eğilme deneyi

Deneysel tez çalışması kapsamında 6 adet tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinin dört noktalı eğilme deneyleri ile eğilme davranışı incelenmiştir. Betonarme kiriş numunelerinin deney prosedürüne ilişkin takip edilen yöntem aşağıda belirtildiği gibidir.

- İmalatı gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kiriş numuneleri deney düzeneğine alınmıştır. Deney düzeneğine alınan numuneler herhangi bir çatlak vb. hasar olup oluşmadığı kontrol edilmiştir.
- Herhangi bir hasar olmadığı tespit edildikten sonra deney sırasında oluşacak çatlakların takibini kolaylaştırmak için kirişlere ince bir şekilde kireç badana işlemi yapılmıştır.
- Kiriş orta noktası merkez olacak şekilde yük aktarımında kullanılacak 30x30x2 cm boyutlarındaki yükleme mesnetleri orta noktaları arası 1 m olacak şekilde hızlı donan kartonpiyer alçısıyla sabitlenmiştir. Mesnet plakalarının üzerine mesnet elemanları olan dolu silindir çubuklar yerleştirilip üzerine 30x30x2 cm boyutlarında bir plaka daha yerleştirilir. Bu işlemin ardından tekil yükü bu iki noktaya aktarması için tasarlanan yükleme kirişi olarak adlandırılan kutu profil yerleştirilmiştir.
- Yük aktarma sistemi tamamlandıktan sonra deformasyon ölçümlerinde kullanılacak sensörler karar verilen yerleşim planına uygun olarak yerleştirilmiştir. Kiriş numunelerinin düşey yer değiştirme paternini belirleyebilmek için kiriş orta noktasından mesnetlere doğru 50 cm aralıklar ile kirişin sağ ve sol tarafına 3'er adet düşey yer değişme ölçüm sensörleri ve orta nokta düşey yer değiştirmesi için 3 adet toplamda 9 adet sensör yerleştirilmiştir. LVDT ölçüm sensörleri mesnete yakın bölgelere yerleştirilirken herhangi bir zarar görmemesi için yüzey pürüzsüz hale getirilmiştir. Orta açıklık kısmında kalan potansiyometrik cetvel sensörleri ise kiriş alt kısmına 5x5x1 cm boyutlarında alüminyum plakalar temin edilmiş ve bu plakalara bağlanarak ölçüm alınmıştır. Plakalar kiriş altına yapıştırılması işleminde yapıştırılacak alanlar pürüzlülüğü arttırarak çift bileşenli epoksi ile yapıştırılmıştır.
- Eğrilik hesaplamalarında kullanılacak veriler için, kiriş arka yüzeyinde kirişin orta noktasından 150 mm sağ tarafa ve 150 mm sol tarafta toplamda ~300 mm ölçüm boyu olacak şekilde kiriş numunelerinin yüksekliği boyunca 4 adet sensör yerleştirilmiştir. Kiriş numunesinin yüksekliği boyunca kiriş üst kısmı ve alt kısmından montajı yapılabilmesi için 40 mm mesafede en uç iki sensör yerleşimi yapılmıştır. Diğer iki sensörün

yerleşiminde ise uç bölgelere yerleştirilen iki sensör arası mesafe ölçülmüştür ve eşit aralıklara bölünerek yerleştirilmiştir. Sensörlerin montajı yapıp yerine sabitlendikten sonra misine ipi kullanılmıştır ve gerdirme yapılarak sensörlerin direk olarak ölçüm alması sağlanmıştır.

- Kiriş numunelerinin taşınmasın aşaması için kiriş uçlarından ~1,2 m açıklıktaki kancalara çelik zincirler ile deney düzeneğinin üst kirişleri üzerinden mapa yardımıyla kiriş sehimini kısıltmayacak şekilde birbirine bağlanmıştır. Bu uygulamanın amacı kiriş göçme anında oluşabilecek herhangi bir probleme karşın güvenlik amacıyla yapılmıştır.
- Yükleme sırasında kutu profilden yapılan yükleme kirişinde bir eğilme olmaması amacıyla yük hücresine bağlı olan mafsallı başlık ile arasına 30x30x2 cm boyutlarındaki bir plaka ile desteklenmiştir.
- Yük hücresi ve deformasyon sensörleri veri toplama sistemine bağlantıları yapılarak deneye hazır hale getirilmiştir.
- Deney sırasında kiriş ön kısmında oluşacak çatlakların takibini kolaylaştırması açısından kiriş ön yüzeyi 2 adet projektör ile aydınlatılması sağlanmıştır.
- ENERPAC marka el pompası ile yükleme yapılmıştır.
- Deney aşamasına geçildiğinde yükleme sırasında oluşacak çatlaklar takip edilmiştir. Oluşan çatlaklar olduğu düşey yer değiştirme değerleriyle birlikte kırmızı kurşun kalem ile çizilerek kiriş üzerine not edilmiştir. Ayrıca deney öncesi bir kiriş çizelgesi oluşturularak çatlak gelişimleri bu çizelge üzerine not edilmiştir.
- Deney sırasında çatlak gelişimi sırasında fotoğraf çekimleri yapılmıştır. Buna ek olarak deneyler video kayıt altında gerçekleştirilmiştir.
- Deneyin sonlandırılmasından sonra düzenekte oynama yapılmadan çatlak genişlikleri ve çatlaklar arası mesafelerin ölçümü yapılmıştır. Bu işlemde tamamlandıktan sonra deney düzeneğinin kurulum işlemi tersten işlenecek şekilde numune sistemden alınarak rezerv alana alınmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Eğrilik hesaplamaları için kullanılan yatay deformasyon sensörlerinin yükleme öncesine ilişkin genel görünümü Şekil 3.49’da, deneye hazır hale getirilen betonarme kiriş numunesinin deney önce ön ve arka cepheye ilişkin genel görünümü Şekil 3.50 (a) ve Şekil 3.50 (b)’de sunulmaktadır.



Şekil 3.49. Eğrilik hesaplamalarında kullanılacak yatay deformasyon sensörlerinin yerleşimi.



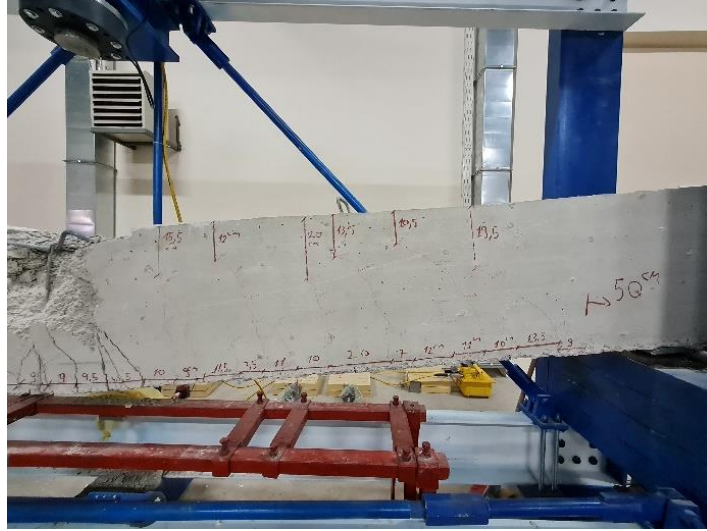
(a)



(b)

Şekil 3.50. Deneye hazır betonarme kiriş numunesinin, (a) Deney öncesi ön cephe, (b) Deney öncesi arka cephe genel görüntüsü.

Deney sonlandırıldıktan sonra çatlaklar arasında mesafe ölçümüne ilişkin görsel Şekil 3.51’de, deney sonrası muhafaza edildiği rezerv alana alınan betonarme kiriş numunelerine ilişkin görsel Şekil 3.52’de sunulmaktadır.



Şekil 3.51. Deney sonrası çatlaklar arasında mesafe ölçümü



Şekil 3.52. Deney sonrası muhafaza edildiği rezerv alana alınan betonarme kiriş numuneleri.

3.1.12. Deneysel verinin işlenmesi

Tez çalışması kapsamında, sıcaklık takibi ve kiriş yükleme deney verisi olmak üzere iki başlık altında gruplandırılmıştır. Sıcaklık takip verisi betonarme kiriş numuneleri imal sürecinde alınmıştır. Bu ölçümler:

- Döküm anındaki taze beton sıcaklığı
- Döküm anındaki atmosfer sıcaklığı
- Döküm anındaki bakım ortam (laboratuvar) sıcaklığı

- Döküm anından itibaren her 10 dakikada bir 72 saat boyunca kalıp, beton ve donatı sıcaklığının takibi
- Kalıp, beton ve donatı sıcaklığına ek olarak döküm anından itibaren en az 72 saat boyunca dökümün gerçekleştiği ortam sıcaklığı

alınarak sağlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında kayıt altına alınan sıcaklık verisi ulusal olarak TS 1247 (2018) standardının geçerli olduğu koşullara uygun beton dökümü yapılıp yapılmadığı kontrol değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu kapsamda K3 kesitli betonarme giriş grupları üzerinden K tipi termokupl sensörler ile sıcaklık ölçümleri alınarak sıcaklık-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler üzerinden beton ve donatının denge sıcaklığına ulaştıkları sıcaklık ve zaman değerleri belirlenmiştir. Çizelge 3.4'te verilen çizelge doğrultusunda sıcaklık verisi toplanarak; beton, donatı ve kalıp sıcaklık değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı olarak denge sıcaklığına ve bu ana kadar geçecek sürenin hesaplanması için analitik bağlantılar türetilmesi amacıyla yapılmıştır.

Sıcaklık ölçüm verisi üzerinde yapılan bir başka çalışma ise olgunluk yöntemi ile beton dayanım tahmini ve eşdeğer yaş hesaplamalarıdır. Olgunluk yöntemiyle betonun dayanımını tahminini konu alan TS 13508 Olgunluk yöntemi ile beton dayanımının tahmini (2012) normunda betonun dayanımı tahmini edilmesiyle; kalıp alma, tekrar kalıbın hazırlanması, soğuk hava koruma önlemlerinin sonlandırılması ve yolların trafiğe açılması gibi kritik işlemlerin başlatılmasına veya sonlandırılmasına izin verilebileceği ifade edilmektedir. Normda yöntem olarak laboratuvar ortamında anormal sıcaklık şartlarında kür uygulanmış numunelerin dayanımlarının tahmininde de kullanılabileceğine yer verilmiştir.

Olgunluk yöntemini sınırlayan kriterler aşağıda sunulmaktadır.

1. Beton, hidratasyonu tamamlayacak şartlarda saklanmalıdır.
2. Yöntemde, uzun vadedeki dayanımda erken yaşlardaki beton sıcaklığı dikkate alınmamalıdır.
3. Yöntem, beton karışımının potansiyel dayanımını gösteren diğer yöntemler ile desteklenmelidir.

Tahmin edilen dayanımın doğruluğu, kısmen dayanımı belirlenen beton için uygun bir olgunluk fonksiyonunun kullanılmasına bağlıdır. Olgunluk yöntemi ile beton dayanımını tahmin edilmesinde aşağıda verilen sıra takip edilmelidir:

- Kullanılan beton karışımı için laboratuvar deneyleri ile bir dayanım-olgunluk ilişkisi geliştirilmelidir.
- Dayanımı tahmin edilecek yapıdaki betona ait sıcaklık geçmişi, beton dökümünden itibaren, dayanım tahmini istenilen zamana kadar kayıt altına alınmalıdır.
- Kayıt altına alınan sıcaklık geçmişi, arazide kullanılan betonun olgunluk indeksinin hesabı için kullanılmalıdır.
- Hesaplanan olgunluk indeksi ve dayanım-olgunluk ilişkisi kullanılarak, yapıdaki betonun dayanımı tahmin edilmelidir.

Sıralanan hususlar dikkate alınarak; tüm numune grupları için sıcaklık takibi yapılan K3 kesitli kirişlerde olgunluk yöntemi ile beton dayanımı tahmini ve eşdeğer yaş hesaplamaları yapılarak yöntemin atmosfere açık ortamda (şantiye ortamında) imal edilen beton için kullanılabilirliği incelenmiştir.

Kiriş numunelerinin mekanik davranışının incelenmesi amacıyla aşağıdaki ölçümler alınmıştır.

1. Uygulanan yük
2. Yük etkisinde düşey yer değiştirmeler
3. Eğrilik hesaplamaları için kiriş numunesinin orta noktası merkez olacak şekilde sağından ve solundan eşit mesafelerde toplamda ~300 mm ölçüm boyunda yatay deformasyon ölçümleri
4. Mesnet bölgesinden düşey yer değiştirme ölçümleri

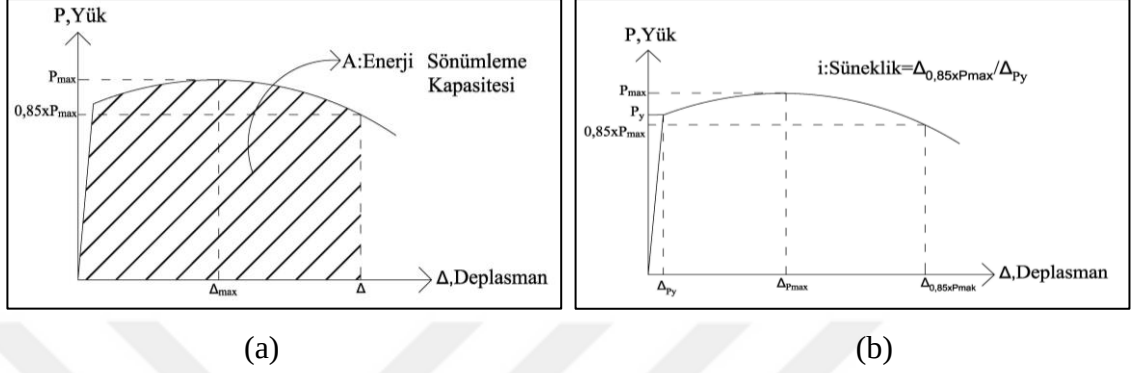
Deneysel çalışma ile elde edilen sayılar veriler kullanılarak aşağıdaki sunulan grafikler çizdirilerek; ilk çatlak anındaki eğilme momenti, akma momenti, maksimum moment vb. belirlenen parametreler tablo haline getirilerek karşılaştırmalı olarak değerlendirme yapılmıştır.

1. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafikleri
2. Moment-Eğrilik grafikleri
3. Deplasman paterni oluşturmak için Yük-Düşey yer değiştirme grafikleri
4. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafiği üzerinde başlangıç rijitliği hesaplanması
5. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafiği üzerinde (normalizasyon işlemi yapılarak) enerji sönümleme miktarlarının ve süneklik değerinin belirlenmesi
6. Moment-Eğrilik grafiği üzerinden süneklik (maksimum eğrilik/akma eğriliği) değerlerinin hesaplanması

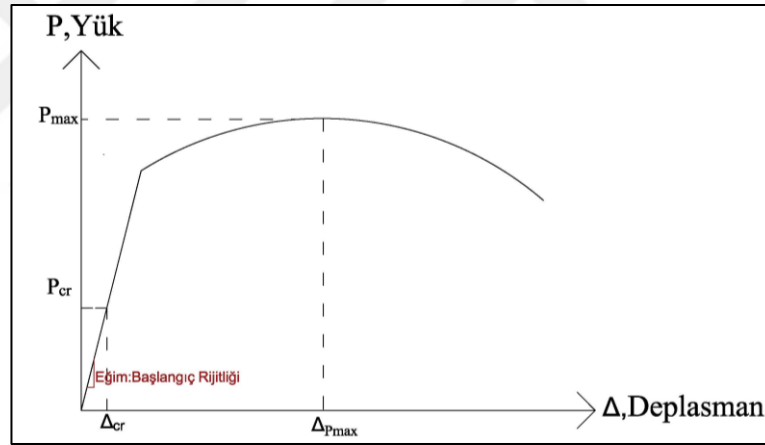
Yük-Orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinde Şekil 3.53 (a) ve Şekil 3.53 (b)'de gösterildiği şekilde süneklik ve enerji kapasiteleri hesaplamaları yapılmıştır. Bütün kiriş numuneleri birbirleriyle ilişkilendirile bilmesi amacıyla normalizasyon işlemi yapılmıştır. Bu işlem için tüm kiriş numunelerinin maksimum yük (P_{max}) noktası belirlenmiştir. Maksimum yük noktası belirlendikten sonra $0,85 \times P_{max}$ noktası

3. MATERYAL ve YÖNTEM

belirlenmiştir. Başlangıç ve $0,85 \times P_{max}$ noktaları arasında kalan enerji sönümleme ve süneklik hesaplamaları yapılmıştır. Başlangıç rijitliğinin hesaplamalarında başlangıç ile ilk çatlak oluştuğu noktalar arasında yapılmıştır ve Şekil 3.54'te parametrik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.53. Betonarme kiriş numunelerinin, (a) Enerji sönümleme kapasitelerinin, (b) Süneklik hesaplama yöntemi.



Şekil 3.54. Yük-Orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri üzerinden başlangıç rijitliğinin hesaplama yöntemi.

Betonarme kiriş numunelerinin deney verisi kullanılarak TS 500 (2000) ve TBDY (2018) ulusal normlar dikkate alınarak, kiriş moment taşıma kapasiteleri “Taşıma Gücü Yöntemi” hem teorik hem de deneysel olarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Her kiriş numunesi için deneysel verilerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda Response2000 (2000) yazılımında kesit analizleri yapılmıştır; teorik ve deneysel olarak elde edilen moment eğrilik ilişkileri incelenmiştir. Başlangıç rijitlikleri ve çatlama kiriş rijitleri yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri üzerinden hesaplanmış ve her kesit kendi içerisinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Kiriş numuneleri içeriğın kullanılan malzemeler olan beton ve çelik donatılar mekanik özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. İmalatta kullanılan çelik donatılar çekme deneylerine tabi tutulmuş, hem dayanım hem de üzerinde bulunan nervür detayları ve işaretlerinin TS 708 (2016)' ya uygunlukları üzerinden değerlendirilmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışmasında yaz aylarında laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme etkisi altında mekanik davranışlarının incelenmesi amacıyla; 0,3x0,5x4,5 m ölçülerinde ve 3 farklı kesit özelliğine sahip pilot deney numuneleri dahil toplamda 9 adet tam ölçekli betonarme kiriş numuneleri deneysel olarak incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında uluslararası yayın çıkması durumu göz önünde bulundurulduğundan araştırma kapsamında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin isimlerinin kısaltmalarında İngilizce kısaltmaları kullanılmıştır. B: Beam (Kiriş), S: Summer (Yaz), 0: Laboratuvar Ortamı, 1: Atmosfer Açık Alan'ı temsil ederken S1, S2 ve S3 ise sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitlerini temsil etmektedir. Bu başlık altında betonarme kiriş numunelerinin deneysel çalışmalarında elde edilen araştırma sonuçları sunulmaktadır.

4.1. Sıcaklık Ölçümleri

Deneysel çalışma kapsamında beton dökümü ve sonrasında alınan sıcaklık ölçüm verisi bu bölümde sunulmaktadır.

4.1.1. Döküm anında sıcaklık takibi

Tez çalışması kapsamında yaz şartlarında (+5°C üstü ve +30°C altı normal hava koşulları) toplamda 2 grup olmak üzere betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Laboratuvar ve atmosfere açık ortamlarda gerçekleştirilen betonarme kiriş numuneleri imal edilmiş olup dört noktalı deneye tabi tutulmuştur. Beton döküm anında tüm kirişlerden sıcaklık ölçüm değerleri Çizelge 4.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1'de sunulan sıcaklık verisi Çizelge 3.5'te sunulan beton döküm tarihlerine göre kronolojik olarak sıralanmıştır. Her bir kiriş numunesinin beton dökümü ve örnek numune alma süreleri ~15 dakika içerisinde sonlanmıştır. K3 kesitli hacimce donatı miktarı %1,99 ile en fazla olan betonarme kiriş numunelerinden termokupl sensör ile uzun süreli sıcaklık takibi yapılmıştır. Sıcaklık takibinde beton ve çelik donatı için denge sıcaklığı ve bu sıcaklığa ulaşma süreleri tayin edilmiştir.

Çizelge 4.1. Beton döküm anında sıcaklık takibi

Numune Kodu	Numune	Atmosferik Sıcaklık (°C)	Döküm Anında Bakım Ortamı (Açık Hava/Laboratuvar/Çadır) Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Taze Beton Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Donatı Sıcaklığı (°C)	Kirişteki toplam çelik donatı hacmi (%)	Döküm Anında Kalıp Sıcaklığı (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaştıkları Sıcaklık (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaşma Süresi (saat)
BS0	S1	18,9	21,7	26,9	14,3	1,03	15,0	-	-
BS0	S2	18,9	21,3	26,6	14,8	1,69	14,3	-	-
BS0	S3	18,9	21,4	26,7	18,4	1,99	18,9	46,5	21,7
BS1	S1	31,0	31,0	24,5	28,0	1,03	31,0	-	-
BS1	S2	31,0	31,0	24,5	29,0	1,69	31,0	-	-
BS1	S3	30,0	30,0	24,5	28,0	1,99	30,0	39,9	20,2

Çizelge 4.1’de sunulan her kiriş numunesinin ayrı ayrı sıcaklık verisi kolay anlaşılabilir olması için her grup numunenin ortalama değerleri alınarak Çizelge 4.2’de sunulurken, uzun süreli sıcaklık takibi yapılacak K3 kesitli kiriş verisi Çizelge 4.3’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. Tüm gruplar için ortalama sıcaklık ölçüm verisi

Numune	Atmosferik Sıcaklık (°C)	Döküm Anında Bakım Ortamı (Açık Hava/Laboratuvar/Çadır) Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Taze Beton Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Donatı Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Kalıp Sıcaklığı (°C)
BS0	18,9	18,9	26,5	16,8	17,5
BS1	30,7	30,7	24,5	28,3	30,7

Çizelge 4.3. K3 kesitli betonarme kiriş numuneleri için ortalama sıcaklık ölçüm verisi

Numune Kodu	Numune	Atmosferik Sıcaklık (°C)	Döküm Anında Bakım Ortamı (Açık Hava/Laboratuvar/Çadır) Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Taze Beton Sıcaklığı (°C)	Döküm Anında Donatı Sıcaklığı (°C)	Kirişteki toplam çelik donatı hacmi (%)	Döküm Anında Kalıp Sıcaklığı (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaştıkları Sıcaklık (°C)	Donatı ve Betonun Termal Dengeye Ulaşma Süresi (saat)
BS0	S3	18,9	21,4	26,7	18,4	1,99	18,9	46,6	21,7
BS1	S3	30,0	30,0	24,5	28,0	1,99	30,0	39,9	20,2

Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te sunulan veriler birlikte incelendiğinde TS 1247 (2018) uyarınca atmosferik hava şartlarına uygun olarak kurgulandığı şekilde imal edilmiştir.

Yaz şartlarında imalatı gerçekleştirilen betonarme kiriş numunelerinin taze beton sıcaklıkları BS0 grubu için 26,5°C ve BS1 grubu için 24,5°C olmuştur. Birçok bilimsel

çalışma, norm ve uygulama örnekleri ile birlikte değerlendirildiğinde; normal hava koşullarında yapılacak beton imalatında ideal taze beton sıcaklıklarının 15-20°C arasında olduğunun ifade edilmesi mümkündür. Beton imalatının düzenleyen ulusal standart TS EN 206+A2 (2021) uyarınca beton imalatında taze beton sıcaklığının minimum sınır değer olarak 5°C olması gerektiği, ancak üst sınır olarak herhangi bir değer sunulmadığı görülmüştür. Ayrıca, hazır beton teknik detaylarını standardize eden Amerika standardı ASTM C94/C94M-22a (2022)'de maksimum taze beton sıcaklığının 32°C üst sınır değer olduğu sunulmaktadır. Bu iki standart üzerinden taze beton sıcaklık değerinin 5-32°C arasında olması gerektiği belirlenmiştir ve çalışma kapsamında yaz koşullarında imalatı gerçekleştirilen taze beton sıcaklığının sınır değerlerinin bu aralık içerisinde kaldığı görülmüştür. İki yaz grubu için yapılan her iki imalatında ortalama ~26°C sıcaklıkta taze beton kullanılmıştır. Ayrıca hava sıcaklıklarının gün içerisinde nispeten yükselmesi nedeniyle imalatı sonrasında kiriş düzenli olarak su ile ıslatılarak bakım yapılmıştır.

Betonarme kiriş numunelerinin imalatında döküm anındaki çelik donatı sıcaklıklarının BS0 imalatı için ortalama 16,8°C ve BS1 imalatında 28,3°C olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin genel olarak ortam sıcaklıklarından ~2°C daha düşük olduğu görülmüştür. Chen and Su (2020) çalışmalarında güneş ışınları etkisiyle çelik donatı sıcaklıklarının 80°C seviyelerine kadar çıkabileceğini ve döküm anında donatı yüzeyinin bu denli yüksek olmasının betonarme elemanlarının aderansının olumsuz yönde etki edeceğini rapor eden çalışmaların bulunduğunu ifade etmişlerdir. Erişilebilen bilimsel çalışma ve normlar dikkat alındığında normal hava şartlarında betonarme imalat anında çelik donatı sıcaklıkları ilişkin sınır değerlere ulaşamamıştır. Chen and Su (2020) çalışmalarında, laboratuvar şartlarında, 50°C ve 70°C sıcaklıklara sahip çelik donatı üzerine taze beton dökülerek üretilen numunelerin korozyon davranışını incelemişlerdir, döküm anındaki yüksek sıcaklığa sahip çelik donatı numunelerinin korozyon performanslarının daha zayıf olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışma kapsamında yaz koşullarında imalatı gerçekleştirilen betonarme kiriş numunelerinin çelik donatı sıcaklıklarının ortam koşullarıyla uyumlu olduğu ve Chen and Su (2020) çalışmasına referansla; ilerleyen dönemlerde zayıf korozyon davranışı göstermeleri beklenen yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmadıklarının ifade edilmesi mümkündür.

4.1.2. Kiriş numune sıcaklık takibi

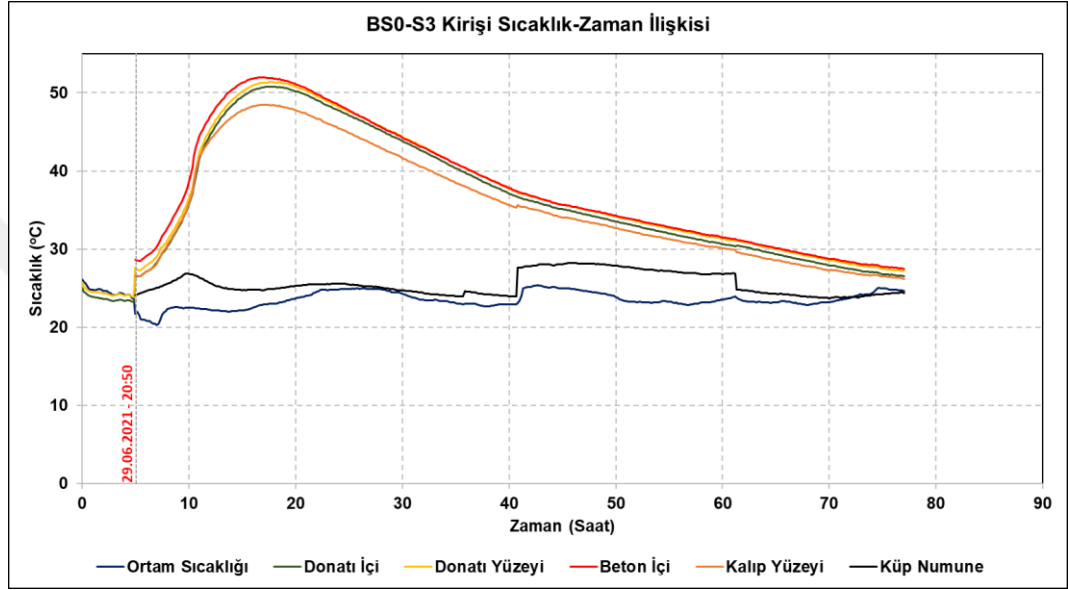
Tez çalışması kapsamında laboratuvar ve atmosferik ortam koşullarında yazın tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinin imalatı gerçekleştirilmiştir. Her iki ortam koşullarında 3 farklı kesit özelliğine sahip betonarme kiriş numunelerinden K3 kesitli kiriş numuneleri üzerinde döküm anından itibaren 72 saatlik sıcaklık takibi yapılmıştır. Sadece K3 kesitli betonarme kiriş numuneleri üzerinden sıcaklık takibinin yapılmasının nedeni hacimsel donatı miktarı olarak %1,99 ile diğer kesitlerden daha yüksek olmasıdır. Her grup için K3 kesitli kiriş numunelerinin sıcaklık takibi doğrultusunda ortam sıcaklığı, donatı içi, donatı yüzeyi, beton içi ve kalıp yüzeyinden sıcaklık verisi alınmış, bu veriler üzerinden sıcaklık-zaman grafikleri çizdirilmiştir. Sıcaklık takibinde kullanılan termokupl sensörlerin bağlandığı ara bağlantı aparatında müsait kanal olması durumunda örnek numune olarak alınan 15x15x15 cm küp numunelerden de sıcaklık takibi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında sıcaklık takibinde 72 saatlik veriler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Ancak ölçüm koşullarının imkân verdiği kiriş numunelerinden 28 günlük sıcaklık takibi yapılmıştır. 72 saatlik sıcaklık takibi üzerinden değerlendirmeler ve 28 günlük sıcaklık takibinden elde edilen veriler doğrultusunda çizdirilen sıcaklık-zaman grafikleri EK-1’de sunulmuştur. İlk imalat sırasında beton dökümü öncesinden kayıt alma işlemine başlanarak ortam, donatı ve kalıp sıcaklık kayıtları alınmıştır. Bu sayede kalıp ve donatının döküm koşullarında beklerken bulunduğu ortamdaki etkilenme durumları hakkında bilgi sunan bu ölçümlerde grafiklerde sunulmuştur.

Her bir grubu temsilen seçilen K3 kesitli betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık takibinden elde edilen verilerle çizdirilen sıcaklık zaman grafiklerinin üzerine beton dökümünün gerçekleştirildiği gün ve saat belirtilmiştir. Buna ek olarak, atmosferik hava şartlarından etkilenen grafik verisinin doğru şekilde yorumlanabilmesi amacıyla ilk 72 saatlik süre içerisindeki gece-gündüz dönemleri de grafik üzerinde belirtilmiştir.

BS0-S3 Kirişi

Sırasıyla sunulacak olan sıcaklık takip grafiklerinden birincisi Şekil 4.1’de sunulan BS0 grubuna ait olan, beton dökümü dış ortamda yapıldıktan hemen sonra laboratuvar ortamına alınarak ilk başta 28 günlük süre sonuna kadar ve devamında deney gününe kadar bu ortamda bekletilen, BS0-S3 kodlu kiriş numunesine aittir.



Şekil 4.1. BS0-S3 kirişi sıcaklık takip grafiği

29 Haziran 2021 tarihinde akşam saat 20:50’de beton dökümü yapılan BS0-S3 kirişinin döküm anında taze beton sıcaklığı 26,7°C iken, dış atmosfer sıcaklığı 18,9°C olarak ölçülmüştür. Çizelge 4.1’deki veri ile buradan sonra sunulacak olan grafik verisi birlikte incelendiğinde; bazı numunelerin döküm anındaki taze beton sıcaklık değerlerinin bahsi geçen tablo ve ilgili grafik üzerinde birkaç derece fark ettiği görülecektir. Çizelge 4.1’de sunulan sıcaklıklar döküm anında saplamalı termometre ile ölçülen sıcaklık verisidir. Döküm sonrası atmosferik koşullarda bırakılan ya da laboratuvar ortamına alınan numune için termokupl sensörlerin veri toplama cihazına bağlanma süresi duruma göre 25~30 dakika arasında olmuştur. Bu bakımdan grafik üzerinden okunan ilk beton sıcaklığı değerinin döküm anındaki taze beton sıcaklığı olarak değerlendirilmesi hatalı olacaktır. Döküm anındaki taze beton sıcaklığı değeri olarak Çizelge 4.1’de sunulan verinin kullanılması gerekmektedir.

Döküm öncesi kalıp ve donatısı laboratuvarında bekletilen BS0-S3 kirişinin beton dökümünden önce yaklaşık 5 saatlik süre ile kalıp, donatı sıcaklığı ve laboratuvar sıcaklık kaydı alınmıştır. 72 saatlik sıcaklık takibi sürecinde laboratuvar ortam sıcaklığının sabit denebilecek bir değerde kalıp kalmadığının kontrolü amacıyla yapılan istatistiki hesaplamada; laboratuvar ortam sıcaklığı ortalaması 23,6°C olurken, bu verinin standart sapması 1,0°C ve değişim katsayısı %4,3 olarak hesaplanmıştır. Yine bu süre zarfında ölçülen en düşük ve en yüksek ortam sıcaklığı sırasıyla 20,3°C ve 26,1°C olarak belirlenmiştir. Bu durumda, BS0-S3 kirişinin tasarlandığı şekilde ~24°C sabit ortam sıcaklığında muhafaza edildiği sonucuna varılmıştır.

BS0-S3 numunesi için beton dökümünün hemen öncesinde donatı ve kalıp sıcaklığının ~24°C olduğu ve bu değer aynı andaki 23,6°C' lik laboratuvar sıcaklığı ile eşitlendiği görülmüştür. Beton dökümünden hemen sonra donatı yüzey sıcaklığı 9,2°C artışla; 18,4°C' den 27,6°C' ye çıkmıştır. Şekil 4.1'de beton dökümünden hemen sonra hidratasyonun başladığı ve buna bağlı olarak beton, donatı ve kalıp sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. Kalıba alındığı andaki sıcaklığı 26,7°C olan ve sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında muhafaza edilen kiriş betonu dökümden sonraki 11,8. saatte; 25,3°C' lik bir artışla 52,0°C maksimum iç sıcaklığa ulaşmıştır ve bu andan sonra sıcaklık düşüşe geçmiştir. İlk 72 saat içerisinde BS0-S3 kirişi için ölçülen en düşük beton sıcaklığı 27,5°C olmuştur. BS0-S3 kirişinin döküm sonrası 72 saatlik sıcaklık takibi süresince ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri Çizelge 4.4'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.4. BS0-S3 kirişi sıcaklık takibi çalışmasında ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.

Sıcaklık (°C)	Bakım Ortamı		Donatı İçi	Donatı Yüzeyi	Beton	Beton ile Temas Eden Kalıp Yüzeyi
	Atmosfer	Laboratuvar				
Maksimum	34,3	25,4	50,8	51,4	52,0	48,5
Minimum	13,2	20,3	26,5	27,2	27,5	26,2

BS0-S3 kirişi beton ve çelik donatısı dökümden 21,7 saat sonra aynı sıcaklığa ulaşmıştır. Gedik (2020) çalışmasına referansla; denge sıcaklığı olarak tabir edilen bu sıcaklık 46,6°C olarak ölçülmüştür. Burada dikkat çeken önemli bir husus, denge sıcaklığına ulaştıkları andan itibaren donatı yüzeyi ve beton sıcaklığının eşitlenmiş

olmasıdır. Bir başka ifadeyle, denge sıcaklığına ulaştıktan sonra hidratasyon ısısının azalmasına bağlı olarak sıcaklık düşüşü meydana gelse de donatı ve beton bu düşüşü aynı sıcaklık değerinde birlikte takip etmişlerdir.

Dökümden 72 saat sonra kalıp alınmıştır; aynı anda laboratuvar sıcaklığı $24,6^{\circ}\text{C}$ iken donatı yüzeyi sıcaklığı $27,2^{\circ}\text{C}$ ve beton sıcaklığı ise $27,5^{\circ}\text{C}$ ölçülmüştür. Esasen bu deney elemanı için 28 günlük sıcaklık takibi yapılmıştır. Ancak, veri bütünlüğünün sağlanması açısından beton dökümü öncesi dâhil olmak üzere beton dökümünden 72 saat sonraki sürede alınan veri Şekil 4.1’de sunulmuştur. Grafikte yer almayan ve 72 saat sonrasını içeren sıcaklık verisi incelendiğinde; kiriş numunesinden alınan beton ve donatı sıcaklığının beton dökümünden ~105 saat sonra ortam sıcaklığı ile aynı rejimde ve yaklaşık olarak aynı değerde seyrettiği görülmüştür.

BS0-S3 kirişi sıcaklık takibi çalışmasında, kiriş elemanı haricinde kiriş betonundan alınan ve kirişle aynı ortamda bekletilen standart (15x15x15 cm) küp numune için de beton sıcaklığı takibi yapılmıştır ve sıcaklık takip grafiği Şekil 4.1’de sunulmuştur. Kiriş betonu ve donatı sıcaklıklarının hidratasyon başlangıcından itibaren $\sim 24^{\circ}\text{C}$ ’lik sabit ortam sıcaklığından etkilenmedikleri görülürken, bu durum küp numune için tam tersi seyretmiştir. Küp numune sıcaklığının yer yer $\sim 5^{\circ}\text{C}$ ’lik artışla ortam sıcaklığının üstünde; fakat aynı grafik rejiminde seyrettiği görülmektedir. Bu bulgu, küçük hacimli betonların ortam sıcaklığından daha fazla etkilendiği sonucuna götürse de; yapılan literatür incelemeleri konunun adyabatik ortam ve A/V (atmosfere açık yüzey alanı/hacim) parametreleri üzerinden tartışılması gerektiği sonucunu doğurmuştur.

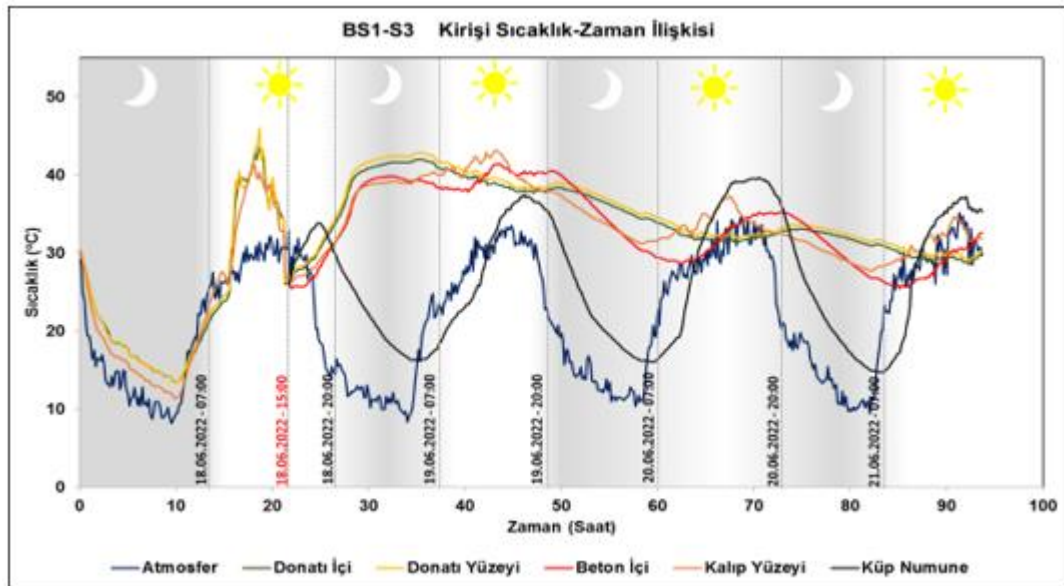
Betonun hidratasyon davranışında atmosfere açık alan/hacim (A/V) değerinin önemli bir parametre olduğu literatürde pek çok kaynakta ifade edilmektedir. Bu hususun altını özellikle çizen Kim (2010) çalışmasında kütle betonlarında hidratasyon sonucu açığa çıkan ısı enerjisi etkisiyle oluşan sıcaklık artışının beton üzerindeki etkileri konu etmektedir. A/V oranı arttıkça, betonun döküm sonrası hidratasyon sürecinin dış ortam sıcaklığından etkilenme düzeyinin arttığı şematik gösterimlerle ifade etmektedir. A/V oranının düşük olduğu uygulamalar kütle betonları olurken, oranın nispeten yüksek olduğu uygulamaların kiriş ve döşeme imalatları olduğunu ifade etmek mümkündür. Proje kapsamında imal edilen 0,3x0,5x4,5 m ölçülerindeki kirişlerde A/V oranı 2 iken,

proje kapsamında beton numunesi olarak kullanılan ve uygun imalatlarda sıcaklık takibi yapılan 0,15x0,15x0,15 m ölçülerindeki betonarme küp numunelerde 6,7'dir. Yüksek A/V oranı kirişlerle aynı koruma koşullarında muhafaza edilen küp numunelerin beton dökümü sonrası hidrasyonun başladığı ve hızla ilerlediği erken dönemde (*CEM I 42,5 R tipi çimento ile imal edilen betonlarda bu süresinin ilk 48 saat olduğunu ifade etmek mümkündür*) atmosferik koşullardan kirişlere nazaran daha yüksek oranda etkilenebileceğini göstermektedir. Bu hususun mekanik davranışı etkileyebileceği ve alınan küçük hacimli beton numunelerinin tahribatlı deney sonuçlarının kiriş betonundan farklı gelebileceği düşüncesi oluşmuştur.

Kalıp alındığı anda BS0-S3 kirişi beton iç sıcaklığı 27,5°C ve donatı yüzey sıcaklığı 27,2°C olarak ölçülmüştür. Bu andan itibaren kalıptan alınan BS0-S3 kirişi laboratuvar ortamında deney gününe kadar beklemeye alınmıştır.

BS1-S3 Kirişi

K3 kesitli BS1-S3 kirişi üzerinde sıcaklık takibi yapılmış ve grafik halinde Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. BS1-S3 kirişi sıcaklık takip grafiği

BS1-S3 kirişi beton dökümü 18 Haziran 2022 tarihinde saat 15:00'te atmosferik hava sıcaklığı 30,0°C iken gerçekleştirilmiştir. Döküm anında taze beton sıcaklığı 24,5°C ve çelik donatı yüzey sıcaklığı 28,0°C ölçülmüştür. Diğer bütün numunelerden farklı olarak; gündüz koşullarında beton dökümü yapılan bu numunede döküm anında taze beton sıcaklığının çelik donatı sıcaklığından daha düşük olduğu kaydedilmiştir.

Dökümün yapılacağı açık hava koşullarında bekletilen bu numune için dökümden 21 saat önce başlamak üzere kalıp, donatı ve atmosferik sıcaklık kaydı alınmıştır. Bu sıcaklık kaydının başladığı andan itibaren atmosferik sıcaklıkla beraber kalıp ve donatı sıcaklıklarında düşüş olduğu; bununla birlikte atmosferik hava sıcaklığından çelik donatının ~5°C ve kalıp malzemesinin ~3°C daha sıcak seyrettiği görülmektedir. Güneş ışınlarının numuneye teması ile birlikte donatı ve kalıp sıcaklıklarının gün ortasına kadar atmosferik sıcaklıkla yaklaşık olarak aynı ilerlediği; ancak gün ortasında doğrudan güneş ışınları ile temas eden kalıp ve donatının atmosferik sıcaklıktan ~13-15°C daha yüksek sıcaklığa eriştikleri; çelik donatının 46°C, ahşap kalıbın ise 40°C sıcaklığa ulaştıkları görülmektedir. Gün ortasından itibaren beton döküm anına kadar geçen yaklaşık ~3 saatlik sürede kalıp ve donatı sıcaklığında düşüş olduğu; beton dökümünden yaklaşık 30 dakika sonra çelik donatı yüzey sıcaklığında ~1°C'lik düşüş meydana geldiği ve donatı yüzey sıcaklığının 27,1°C olduğu belirlenmiştir.

BS1-S3 numunesi çelik donatı ve beton sıcaklıkları dökümden sonra 20,2. saatte 39,9°C'lik sıcaklık değerinde termal denge sıcaklığına ulaşmışlardır. Ancak, bu noktadan itibaren donatı yüzeyi ve beton sıcaklıkları arasında fark olduğu ve betonun gün ortası saatleri dışında genel olarak donatıdan düşük sıcaklıklarda seyrettiği görülmektedir. BS1-S3 kirişinin döküm sonrası 72 saatlik sıcaklık takibi süresince ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri Çizelge 4.5'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.5. BS1-S3 kirişi sıcaklık takibi çalışmasında ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.

Sıcaklık (°C)	Bakım Ortamı		Donatı İçi	Donatı Yüzeyi	Beton	Beton ile Temas Eden Kalıp Yüzeyi
	Atmosfer	Laboratuvar				
Maksimum	35,1	35,1	42,0	42,9	41,3	43,2
Minimum	8,3	8,3	26,5	26,7	25,5	26,2

BS1 grubu numune imalatında, beton küp numune için de sıcaklık takibi yapılmıştır ve grafiği Şekil 4.2’de sunulmuştur. Döküm sonrası atmosferik sıcaklık düşmesine rağmen; BS1-S3 numunesi ile aynı ortamda bulunan küp numunede döküm sonrasındaki ilk 4 saatlik süre içerisinde hidratasyon kaynaklı, $\sim 7^{\circ}\text{C}$ ’lik sıcaklık artışı kaydedilirken, bu süre sonrasında beton sıcaklığının atmosferik sıcaklık ile aynı rejimde hareket ettiği gözlemlenmiştir. BS1-S3 numunesinin 72 saat sonunda beton iç sıcaklığı $32,6^{\circ}\text{C}$, donatı yüzey sıcaklığı $32,2^{\circ}\text{C}$ iken kalıbı alınmıştır ve dış atmosfere açık koşullarda deney gününe kadar bekletilmiştir.

4.1.3. Kiriş betonu olgunluk indeksi hesaplamaları

Saul (1951) çalışmasıyla ilk olarak ortaya atılan betonda olgunluk teorisi, Bergström (1953) çalışmasıyla genişletilmiştir ve beton basınç dayanımı tahmininde tahribatsız bir inceleme olarak literatürde yer almıştır. Ulusal standart olan TS 13508 (2012) olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımını tahmin etmek için uygulanacak süreci kapsamaktadır. Bu standart kapsamında beton olgunluk seviyesini tanımlama amacıyla kullanılan olgunluk indeksi, sıcaklık-zaman faktörü veya belirli bir sıcaklıktaki eşdeğer yaş kavramıyla ifade edilmektedir. Bu yöntemde, betondan alınacak sıcaklık ölçümünden hesaplanacak olgunluk indeksi ile buna karşılık eksenel basınç dayanımının tahminine imkân veren olgunluk bağlantılarının üretilmesini ve kullanımını esas almaktadır.

Topçu ve Karakurt (2002) çalışmalarında, olgunluk kavramını temel olarak betonun dayanım kazanmasında rol oynayan birleşik faktörlerden ısı-zaman ilişkisinin belirlenmesine dayanan bir yöntem olduğu ifade etmişlerdir. Bu yöntem, inşaat sırasında yerine yerleştirilmiş betonun gelecek dayanımı hakkında tahmin edilebilmesi amacıyla olgunluk derecesi veya olgunluk indeksi; betonun sertleşme durumunu belirleyen bir faktör olarak değerlendirmektedirler.

TS 13508 (2012)’de olgunluk yöntemi yoluyla yapıdaki (yerinde) beton dayanımının tahmin edilemesiyle;

1. Kalıp sökülmesi ve tekrar kalıbın hazırlanması,

2. Tendonların art germe işlemleri,
3. Soğuk havada koruma önlemlerinin sonlandırılması,
4. Yolların trafiğe açılması

gibi kritik işlemlerin başlatılmasına izin verilebileceği ifade edilmektedir. Tez çalışması kapsamında laboratuvar ve atmosfer ortamında imal edilen tam ölçekli betonarme kiriş numuneleri üzerinden sıcaklık takibi gerçekleştirilmiştir. Beton, donatı, kalıp ve döküm ortam sıcaklıkları 10 dakika aralıklarla döküm anından itibaren 72 saat süresince kayıt alınmıştır ve bu süre sonrasında kalıp alma işlemi gerçekleştirilmiştir.

ACI PRC-306 (2016), beton eksenel basınç dayanımının 24,5 MPa'ya ulaştığı anda kalıptan alma işleminin gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, sürekli sıcaklık takibi yapılan bir betonun dayanım tahmininde olgunluk yöntemlerinin kullanılmasının mümkün olabileceği açıktır. Betondan alınan küp/silindir numuneler üzerinden eksenel basınç dayanım testleri ile tahribatlı yöntemlerle mekanik özelliklerin belirlenme durumu mevcut şartlarda gerekli ve zorunlu olduğu, ancak muhtelif sebeplerle, özellikle erken dönemde, bu imkânın olmayışı durumunda tahribatsız yöntemlerin kullanılması yarar sağlayacaktır. Bu duruma istinaden, çalışma kapsamında imal edilen tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinden örnek numuneler alınarak bunlar üzerinden tahribatlı yöntemlerle mekanik dayanımlarının tayinleri gerçekleştirilmiş; eş zamanlı olarak ultrasonik atılımı dalgası hızı ölçüm deneyi ve beton test çekici uygulamaları ile tahribatsız olarak beton eksenel basınç dayanımı tayinleri yapılmıştır. Olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımı tayini beton iç sıcaklık verisi üzerinden yapılan bir çalışma olması nedeniyle tercih edilebilir bir tahribatsız muayene yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Liu et al. (2020) çalışmalarında soğuk havalarda dökülmüş ve yalıtım plakaları ile koruma uygulanmış betonlar için beton iç sıcaklık değişimi hesabına yönelik bir matematiksel model önermişlerdir, bu modelle teorik olarak hesaplanan beton içi sıcaklık verisi olgunluk yöntemi uygulamaları dahilinde beton basınç dayanımı tahmininde kullanmışlardır. Saha çalışması öncesi yapılan bu hesaplamalar ile; beton dökümünden sonraki süreçte beton dayanımını gelişimi tahminiyle imalat sürecinin planlanmasında kullanılabileceğinin altı çizilmiştir.

Gerek ACI PRC-306 (2016) ve gerekse TS 13508 (2012) aynı Amerikan standardını, ASTM C1074-19e1 (2021), temel alarak olgunluk yöntemine ilişkin çalışma esaslarını belirtmişlerdir. Bu kapsamda olgunluk yöntemi ile beton dayanımı tahmini için, yukarıda belirtilen normlarda ortak olmak üzere aşağıda verilen sıra takip edilmelidir:

1. Kullanılan beton karışımı için laboratuvar deneyleri ile bir dayanım olgunluk ilişkisi geliştirilmelidir.
2. Dayanımı tahmin edilecek yapıdaki betona ait sıcaklık geçmişi, beton dökümünden itibaren, dayanım tahmini istenilen zamana kadar kayıt altına alınmalıdır.
3. Kayıt altına alınan sıcaklık geçmişi, arazide kullanılan betonun olgunluk indeksinin hesabı için kullanılmalıdır.
4. Hesaplanan olgunluk indeksi ve dayanım-olgunluk ilişkisi kullanılarak, yapıdaki beton dayanımı tahmin edilmelidir.

Olgunluk indeksi kavramı; TS 13508 (2012)'de olgunluk indeksini olgunluk fonksiyonu kullanarak çimento esaslı karışımın sıcaklık geçmişi esas alarak olgunluğu belirten değer olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan indeks, hesaplamada kullanılan sürede çimento esaslı malzemelerin puzolanik reaksiyonu veya hidratasyonu için gerekli suyun sağlanması şartıyla olgunluğun bir göstergesidir. En yaygın kullanılan iki olgunluk indeksi sıcaklık-zaman faktörü ve eşdeğer yaştır.

Tez çalışmasının destekleyen projenin önerisinde olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımı tahminine ilişkin bir çalışma planlanmadığından beton karışımları için laboratuvar deneyleri ile dayanım-olgunluk ilişkileri geliştirilememiştir. Bu nedenle, laboratuvar ve atmosfer açık ortamında imal edilen betonarme kiriş numunelerinden beton ve atmosferik sıcaklık verisi ile olgunluk yöntemi dâhilinde bir beton dayanımı tahmini yapılamamıştır. Ancak, proje çalışmaları neticesinde tahribatlı yöntemle elde edilmiş 3 günlük eksenel basınç dayanımı değerleri ve 3 günlük beton sıcaklık takibi verisi mevcuttur. Bu veri kullanılarak olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımı tahmininin laboratuvar ve atmosfer açık ortamında imal edilen yaz grubu numunelerinde ne derece güvenilir olduğuna dair bir çalışma yapılması mümkün olduğu düşünülmüştür.

Şöyle ki; sıcaklık verisi kullanılarak tüm imalat grupları için betonun 72 saat sonundaki olgunluk parametreleri hesaplanabilir ve bu değerler 72 saatlik eksenel basınç dayanımı değerleri ile karşılaştırmalı olarak incelenebilir. Buradan çıkarılacak sonuçlar üzerinden olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımı tahmininin laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen betonlar için geçerliliği üzerine kısmen de olsa bir değerlendirme yapılabilir.

Yukarıda sıralanan hususlar dikkate alınarak, 72 saat süresince sıcaklık takibi yapılan tüm beton grupları için TS 13508 (2012)'de sunulan olgunluk indeksi parametrelerinin (sıcaklık-zaman faktörü ve eşdeğer yaş) hesabının yapılması amacıyla bir çalışma yapılmış ve bu kapsamda eldeki verinin güvenilirliği bakımından *sıcaklık-zaman faktörü* değerlerinin olgunluk indeksi olarak hesaplanmasına ve değerlendirilmesine karar verilmiştir. Eşdeğer yaş indeksinin hesaplanmasında kullanılan parametre sayısının çokluğu ve deneysel olarak belirlenmesinin gerekliliği nedeniyle, eşdeğer yaş hesapları yapılmamıştır.

Çalışma kapsamında eldeki sıcaklık verisi üzerinden tüm beton grupları için 24, 48 ve 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerleri hesaplanmıştır. 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerleri ile eksenel basınç dayanımı değerleri; olgunluk yöntemi ile beton basınç dayanımı tahmininin güvenilirliğinin kısmen de olsa irdelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte, 24, 48 ve 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerleri aynı karışımdan yazın imal edilen ve 0-40°C arasındaki ortam sıcaklıklarında 72 saat süre ile bekletilen betonlarda olgunluk gelişiminin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla değerlendirilmiştir. Burada kısaca TS 13508 (2012) uyarınca sıcaklık-zaman faktörü parametresinin hesabı hakkında bilgi sunulmasında yarar görülmektedir.

Olgunluk fonksiyonlarından sıcaklık-zaman faktörünün hesaplanmasında TS 13508 (2012)' de sunulan Denklem 4.1 kullanılmaktadır:

$$M(t) = \Sigma(T_a - T_0)x\Delta t \quad (4.1)$$

Burada;

$M(t)$: t yaşındaki sıcaklık-zaman faktörü (derece-gün veya derece-saat)

Δt : Zaman aralığı (gün veya saat)

T_a : Δt süresince betonun ortalama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve

T_o : Başlangıç sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dır.

Denklem 4.1'de sunulan matematiksel ifade; esasen betonun iç sıcaklık takip-zaman grafiği altında kalan alanın başlangıç sıcaklığı üzerinde kalan kısmını nümerik olarak hesaplatmaktadır. Burada kullanılan başlangıç sıcaklığı, *betonun dayanım almaya/mukavemet geliştirmeye başlayabileceği en düşük iç sıcaklığıdır* ve her beton karışımı için farklı olacağı açıktır. Başlangıç sıcaklığı (datum temperature) TS 13508 (2012) uyarınca deneysel olarak belirlenmesi gereken bir parametredir. Başlangıç sıcaklığı; çimento tipine, hidrasyon hızını etkileyebilecek olan kimyasal katkı veya diğer katkıların tip ve miktarlarına ve betonun sertleşirken maruz kalacağı sıcaklık aralığına bağlıdır. Ancak, bu çalışma kapsamında başlangıç sıcaklıklarının belirlenmesi için TS 13508 (2012)'de detayları sunulan deneysel yapılmamıştır. Bununla birlikte, TS 13508 (2012), katkısız CEM I çimentosu ile üretilen ve 0°C ila 40°C kür sıcaklığına maruz kalacak beton karışımları için başlangıç sıcaklığı değeri olarak 0°C 'yi önermektedir. Tez çalışması kapsamında imal edilen betonların tamamında katkısız CEM I tipi çimento kullanılmış; yaz numunelerinin tamamı ilk 72 saat süresince 0°C ila 40°C kür sıcaklığına maruz kalmışlardır. Bu nedenle, bu çalışmada başlangıç sıcaklığı 0°C alınarak ve beton iç sıcaklık takibi verisi kullanılarak; tüm beton grupları için sıcaklık-zaman faktörü değerleri hesaplanmıştır. Başlangıç sıcaklığı (datum temperature) seçilirken yapılan literatür araştırmasında Elaty et al. (2017) çalışmalarında farklı tür ve dozajlardaki çimento ile imal edilen betonlar için deneysel olarak başlangıç sıcaklığı tayini yapıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmada; çimento türü ve dozajı bakımından, proje çalışmalarında kullanılan katkısız betona yakın olan bir karışım için başlangıç sıcaklığı olarak tayin edildiği belirlendiği görülmüştür. Elaty et al. (2017) çalışmasında yer verilen $-2,2^{\circ}\text{C}$ başlangıç sıcaklığı değeri dikkate alındığında; TS 13508 (2012) uyarınca kabulü yapıp sıcaklık-zaman faktörü hesaplarında kullanılan 0°C başlangıç sıcaklığı değerinin çok hatalı bir yaklaşım olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.6’da sıcaklık takibi yapılan tüm kiriş numuneleri için 24, 48 ve 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerleri ile 72 saat sonunda tahribatlı eksenel basınç dayanımı testi ile belirlenen dayanım değerleri yer almaktadır. Eksenel basınç dayanımı deneylerinde kullanılan numuneler, sıcaklık takibi yapılan kiriş ile aynı koşullarda muhafaza edilmişlerdir.

Çizelge 4.6. Tüm beton grupları için 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü ve tahribatlı eksenel basınç dayanımı testi ile elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri.

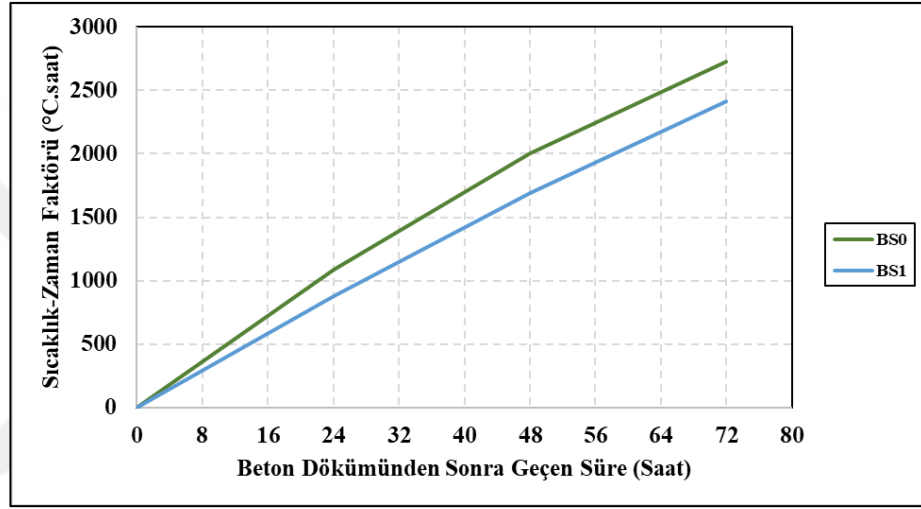
Kiriş	Sıcaklık-Zaman Faktörü (°C.Saat)			Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)	72 Saat Sonunda Elde Edilen Sıcaklık-Zaman Faktörü Değerinin Referans Numuneden Farkı (%)
	24 Saat Sonunda	48 Saat Sonunda	72 Saat Sonunda		
BS0-S3	1.088	2.002	2.727	21	13
BS1-S3	877	1.690	2.415	18	0*

*: Olgunluk indeksi farkı hesaplamalarında BS1-S3 yaz numunesi referans alınmıştır.

Çizelge 4.6’da sunulan numunelerde katkısız beton kullanılmıştır. Her döküm grubu için sunulan 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerleri incelendiğinde en yüksek olgunluk indeksinin 2.727°C.saat ile sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında bekletilerek imal edilmiş olan BS0-S3 kirişi için hesaplandığı görülmektedir. Bu kiriş betonun 3 günlük eksenel basınç dayanımı 21 MPa olarak belirlenmiştir.

Tüm kiriş numunelerinin 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü değerlerinin, referans numune olarak seçilen yaz grubu kirişi BS1-S3 numunesine referansla farkları % olarak hesaplanmış ve son sütunda yer verilmiştir. Yaz koşullarında imal ve ~24°C sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında imal edilip bekletilen BS0-S3 kiriş betonu; aynı karışımdan imal edilen ve atmosferik yaz koşullarında bekletilen BS1-S3 kiriş betonuna kıyasla 72 saat sonunda %13 oranında daha yüksek bir olgunluk indeksi değerine ulaşmıştır.

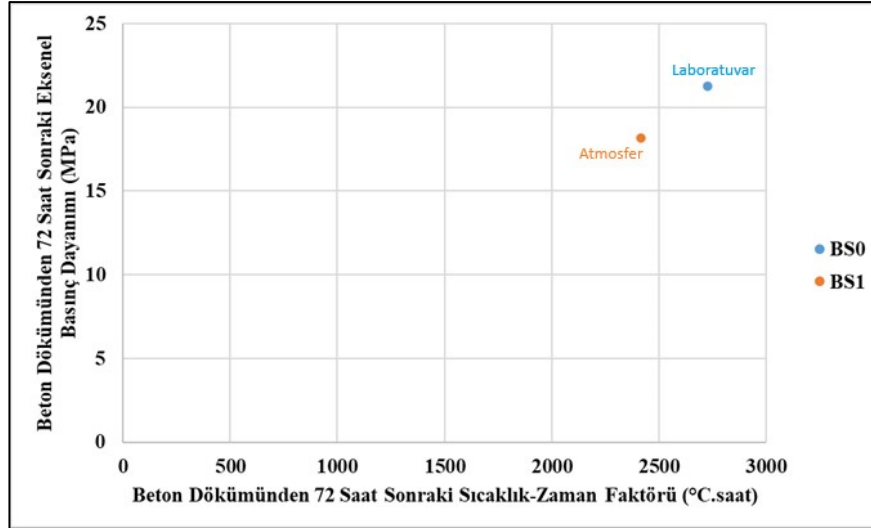
Normal hava (yaz) koşullarında katkısız betondan imal edilen ve atmosferik şartlarda bekletilen BS1-S3 kirişinin gerek 0-72 saat aralığındaki olgunluk indeksi gelişimleri ve gerekse 72 saat süre sonundaki olgunluk indeksi değeri $2.415^{\circ}\text{C}.\text{saat}$ değerleriyle, aynı karışımdan imal edilip sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında bekletilen BS0-S3 kirişi betonu için hesaplanan değerden düşüktür. Bu noktada, katkısız betonla imal edilen kiriş betonlarının 0-72 saat aralığındaki sıcaklık-zaman faktörü gelişimlerinin grafik halinde sunulması daha açıklayıcı olacağı düşünülmektedir. Söz konusu grafikler Şekil 4.3'te toplu halde sunulmaktadır.



Şekil 4.3. Katkısız betonla imal edilen kiriş betonlarının 0-72 saat aralığındaki sıcaklık-zaman faktörü gelişimleri.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere yaz koşullarında katkısız betondan imalatı yapılan ve atmosferik şartlarda bekletilen BS1-S3 kiriş betonlarının 0-72 saat süre zarfındaki olgunluk gelişimi, laboratuvar ortamında bekletilen BS0-S3 kiriş betonuna göre sıcaklık-zaman faktörü gelişim hızından düşük olduğu dikkat çekmektedir.

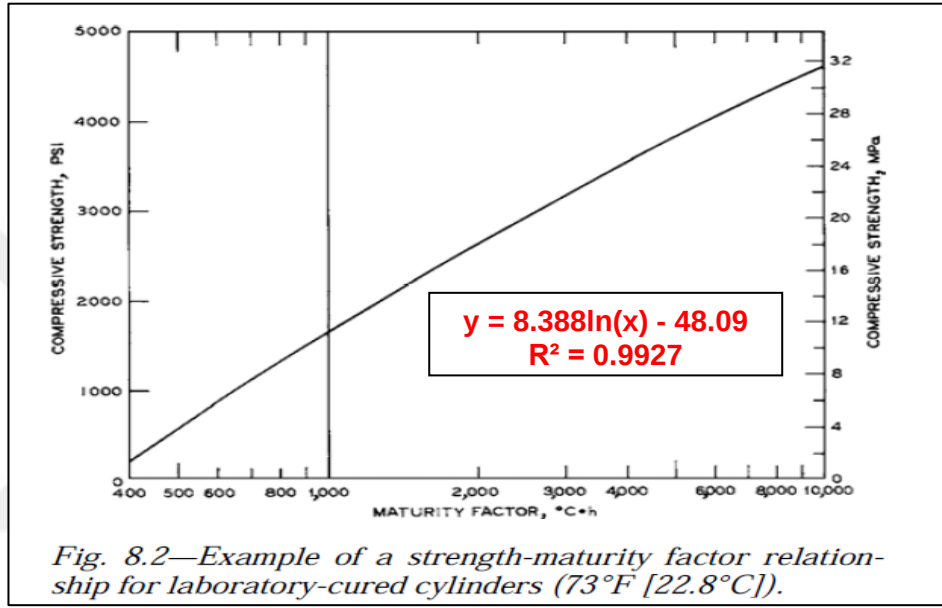
Çalışma kapsamında katkısız beton ile imal edilmiş kiriş numunelerinin 72 saat sonundaki sıcaklık-zaman faktörü ile eksenel basınç dayanımlarının karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla Şekil 4.4'te sunulan grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Katkısız betonla imal edilen kiriş numuneleri için 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü ve eksenel basınç dayanımı grafiği.

Anonymous (2022) çalışmalarında betonda olgunluk kuralı; “Aynı bir karışımdan elde edilen ve aynı olgunlukta olan betonlar, bu olgunluğa erişmek için kullanılan sıcaklık-zaman kombinasyonları ne olursa olsun yaklaşık olarak aynı dayanıma sahiptirler” ifadesi ile karşılık bulmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve aynı bileşime sahip katkısız beton grubu ile imal edilen kirişlerin 72 saat sonundaki olgunluk indeks değerlerinin yaz aylarında imal edilen kiriş numunelerinin tamamının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu durumda, proje kapsamında yaz aylarında laboratuvar ve atmosfer açık ortamda imalatı yapılan katkısız beton karışımı için üretilmiş olan olgunluk fonksiyonu kullanılarak beton dayanımı tahmini yapılmasının kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır. Bu hususla ilişkili olarak, Şekil 4.4’te sunulan grafiğin incelenmesi yararlı olacaktır. Sıcaklık-zaman faktörüne karşılık eksenel basınç dayanımı değerlerinin işaretlendiği grafikte; yazın laboratuvar ve atmosfer açık ortamda imalatı yapılan betonların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu hususun altının çizilmesi amacıyla, proje kapsamında soğuk hava şartlarındaki imalatın gerçekleşmesi üzerine yapılan çalışmanın referans kirişleri olan yaz imalatında da kış ayları imal edilen betonlarda olgunluk indeksi kullanılarak beton dayanımı tahmini yapılması konusuna geniş yer veren ACI PRC-306 (2016), olgunluk-dayanım ilişkisi için çıkarılmış örnek bir fonksiyon grafiğine, Şekil 4.5’te sunulduğu şekliyle yer vermektedir. Söz konusu bağıntının, proje kapsamında incelenen *katkısız betonlar* için geçerli olduğunu varsayalım. Kış imalatları sonraki dönemlerde çıkacak bir doktora tezi çalışmasında detaylı olarak incelenmiş olup bu tez çalışması kapsamında yazın imalatı gerçekleştirilen betonarme kiriş numuneleri

üzerinden yapılmıştır. Olgunluk – dayanım fonksiyonlarında, *olgunluk indeksi olarak sıcaklık-zaman faktörü ya da eşdeğer yaş parametresi kullanımından bağımsız olarak*, olgunluk indeksi eksenini logaritmik ölçekte sunulmaktadır. Bu husus dikkate alınarak yapılan matematiksel hesaplamalar neticesinde Şekil 4.5'te sunulan fonksiyon için üretilen matematiksel bağıntı da ayrıca grafik üzerinde gösterilmiştir. Söz konusu bağıntının, ACI PRC-306 (2016)'da yer almadığının ve proje çalışmaları kapsamında üretildiğinin ifade edilmesinde yarar görülmektedir.



Şekil 4.5. 22,8°C' de laboratuvar ortamında bakımı yapılmış silindir beton numuneleri için örnek bir dayanım-olgunluk faktörü ilişkisi, ACI PRC-306 (2016).

Şekil 4.5'te sunulan fonksiyon kullanılarak; katkısız betonla imal edilen kiriş grupları için 72 saat sonundaki olgunluk indeksi değerine karşılık gelen dayanım tahminleri yapılmıştır ve toplu halde Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Şekil 4.5'te sunulan olgunluk indeksi-dayanım ilişkisinde, olgunluk indeksi olarak sıcaklık-zaman faktörü kullanıldığından, üretilen fonksiyon bu örnek çalışmada kullanılmıştır. Esasen yapılan çalışmanın amacı, kışın ve yazın aynı karışımla dökümü yapılan betonlar için; aynı karışım reçetesiyle üretilmiş laboratuvar numuneleri üzerinden çıkarılmış bir olgunluk-dayanım fonksiyonunun, *projede üretilen veri dahilinde*, geçerliliğinin sayısal bir şekilde irdelenmesidir. Yukarıda belirtildiği üzere tez çalışması kapsamında yaz kiriş numuneleri üzerinde irdelenmeye çalışılmıştır. Kışın yapılan imalatlar sonraki dönemlerde çıkacak bir doktora tezi çalışmasında kapsamlı olarak incelenecektir.

Çizelge 4.7. 72 saatlik sıcaklık-zaman faktörü değerleri üzerinden Şekil 4.5'te sunulan olgunluk indeksi-dayanım ilişkisi kullanılarak yapılan beton dayanımı tahmini değerleri.

Kiriş	Sıcaklık-Zaman Faktörü (°C.saatt)	Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)		Fark (%)
		Tahribatlı Deney Sonucu	Olgunluk İndeksi Üzerinden Tahmin	
BS0-S3	2.727	21	18	-14
BS1-S3	2.415	18	17	-5

Çizelge 4.7 incelendiğinde, üretilen olgunluk-dayanım fonksiyonu ile yaz grubu betonlar için yapılan 72 saatlik dayanım tahminlerinin sırasıyla %5 farkla, yazın imal edilen ve atmosferik ortamda bekletilen numunelerin deneysel dayanım değerlerine yakın sonuç verdiği görülmektedir. Bu oran, aynı karışımdan imal edilip laboratuvar ortamında bekletilen beton için %14 olmuştur.

Topçu ve Akman (2005) çalışmalarında da savunulduğu üzere, kalıp alma sürelerinin tayininde olgunluk yönteminin kullanılabilecek olmasıdır. Çalışma kapsamında detaylandırılma sonuçları; ASTM C1074-19e1 (2021) uyarınca kontrollü laboratuvar şartlarında üretilmiş olgunluk indeksi-dayanım bağıntılarının yazın imal edilecek betonlarda kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Ancak, beton numunelerinin 72 saat süre içerisinde aralıklı olarak tahribatlı deneylerle dayanımlarının belirlenmemiş olması nedeniyle bu çalışmadan anlamlı sonuçlar çıkarılamamıştır. Beton ve donatı yüzeyi sıcaklığının eşitlendiği saat ve sıcaklık derecesinin kalıp alma süresinin tayininde bir parametre olarak değerlendirilmesi uygulaması esasen bir olgunluk yöntemi uygulaması gibi değerlendirilebilir. Zira sadece sıcaklık ve zaman faktörlerinin kullanılacağı bir uygulama olarak kurgulanmıştır. Yaklaşım benzerliği nedeniyle; olgunluk yöntemi ile dayanım tahmini ve buna bağlı olarak kalıp alma süresine karar verilmesi konusunda bilgi sunulmasında yarar görülmüştür.

4.1.4. Kalıp alma anındaki donatı, beton ve atmosfer sıcaklıkları

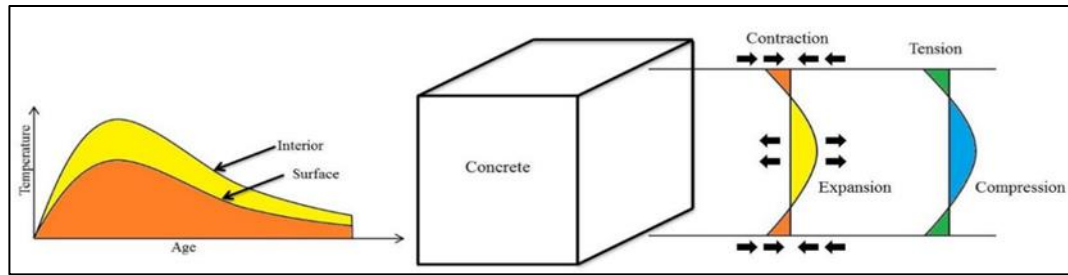
Her döküm grubundan sıcaklık takibi yapılan K3 kesitli kirişler için; kalıp alınma ve atmosfere bırakılma anındaki donatı yüzey sıcaklığı, beton iç sıcaklığı, beton yüzey sıcaklığı ve atmosferik hava sıcaklıkları toplu halde Çizelge 4.8'de sunulmaktadır. Kiriş

yüzey sıcaklıkları kalıp ile çevrelenen alt ve yan yüzeyler ile kalıp ile çevrelenmeyen üst yüzeyden alınan değerlerin ortalaması olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.8. 72 saat sonunda kalıp alınma işlemi esnasında ölçülen donatı yüzeyi, beton içi, beton yüzeyi ve atmosferik hava sıcaklıkları.

Kiriş Numunesi	72 saat sonunda kalıp alma dönemindeki sıcaklık (°C)						
	Donatı Yüzeyi	Beton İçi	Beton Yüzeyi	Atmosfer	Beton Yüzeyi - Beton İçi	Beton İçi-Donatı Yüzeyi	Beton Yüzeyi-Atmosfer
BS0-S3	27,2	27,5	25,8	24,6	-1,7	0,3	1,2
BS1-S3	30,2	32,6	31,2	29,6	-1,3	2,4	1,6

Çizelge 4.8’de 72. saatin sonunda beton içi ve beton yüzeyi arasındaki sıcaklık farkları sunulmuştur. Beton içi sıcaklığı ölçümü, kesitin hemen hemen ortasına tekabül eden bir noktaya yerleştirilen termokupl ile yapılmıştır. Bu durumda, beton içi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık değişimi kesit derinliği boyunca 250 mm, kesit genişliği boyunca 150 mm mesafede meydana gelmiştir. Yaz grubu numunelerde bu fark BS0-S3 kirişinde 1,7°C, BS1-S3 kirişinde ise 1,3°C olarak hesaplanmıştır. Esasen kalıp alma anında kiriş betonunun tamamının ~29,5°C beton sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür. 72 saat sonunda kiriş betonu merkezi (çekirdeği) ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farklarının irdelenmesinin iç yapıda termal gerilme kaynaklı çatlak oluşumu üzerine değerlendirme yapılabilmesidir. Şekil 4.6’da beton bir blokta beton içi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle beton kütleğinde meydana gelecek gerilmelerin açıklandığı bir görsel sunulmaktadır.



Şekil 4.6. Diferansiyel iç sıcaklık nedeniyle beton kütledeki gerilme dağılımı (Crowley 2014).

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere; beton içi ve yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkları nedeniyle beton yüzeyi büzülmeye, beton çekirdeği ise genişlemeye çalışacaktır. Bu

durumda; beton yüzeyinde çekme, bünye içerisinde orta bölgelerde ise basınç gerilmeleri oluşacaktır. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımından düşük olduğundan beton bünyesindeki sıcaklık farkları öncelikle yüzeye yakın bölgelerde çatlak oluşumuna yol açabilecektir.

Beton dökümünden sonraki ilk günlerde beton içi sıcaklık farklarının termal çekme gerilmelerine yol açabileceği; bu gerilmelerin ise betonun çekme dayanımını geçmesi halinde betonda çatlaklar oluşabileceği bilinmektedir; bu mekanizmanın detaylı bir başka izahı ise Üte (2012) çalışmasında sunulmaktadır. Üte (2012) çalışmasında İzmir’ in Bayraklı ilçesinde inşa edilen Folkart Towers yapısının temeli için yapılan 3 m kalınlıklı kütle betonunda sıcaklık takibi ve termal gerilme hesapları hakkında bilgi sunmaktadır. Beton içi sıcaklık farklarının, bilhassa kütle betonlarında yüksek değerlere ulaşması durumunda, termal şekildeğiştirme kaynaklı gerilmeler nedeniyle betonda çatlamaya yol açabileceği ifade etmektedir. Üte (2012) çalışmasında sıcaklık takibi yapılan temel betonunun merkezinden dışarıya doğru 50 cm aralıklarla yerleştirilen termokupl türü sensörlerle alınan sıcaklık ölçümleri üzerinden yapılan değerlendirme ile beton içi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20°C’ yi geçmeyecek şekilde koruma önlemlerinin alındığı ifade etmektedir. Benzer bir çalışma Ramyar et al. (2022) çalışmalarında yayınlanmıştır. Çalışmalarında deneysel saha çalışmaları ışığında kütle betonlarında çatlamamanın meydana gelmemesi için beton içi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20°C geçmemesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Kütle betonunu çatlamayı en aza indirmek için çimentonun hidratasyonundan ve buna bağlı hacim değişikliğinden kaynaklanacak ısı oluşumuna karşı önlemler alınmasını gerektirecek kadar geniş boyutlardaki her hacimdeki beton olarak tanımlayan TS 13815 (2018) standardı; kütle betonunda ısıl deformasyondan kaynaklı çatlakları önlemek için betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının düz betonlarda 20°C, donatılı betonlarda 25°C’yi aşmamasını tavsiye etmektedir. İçyapıda çatlak oluşumuna yol açabilecek beton çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farklarının genel olarak kütle betonları için çalışıldığı görülmektedir. Bununla birlikte; TS 13815 (2018) standardının kapsamında “kütle betonu uygulaması için geçerli birçok prensipten genel beton işlerinde de yararlanılabileceği” ifadesine yer verilmektedir. Bu noktadan hareketle, tez çalışması kapsamında termal davranışları incelenen betonarme kirişlerin kalıptan alındığı andaki

beton içi-yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle içyapıda çatlak oluşma durumunun incelenebilmesi amacıyla Mehta and Monteiro (2001) çalışmasında sunulan formülün kullanılmasına karar verilmiştir. Kaba bir yaklaşımla da olsa; Mehta and Monteiro (2001) kaynağından alınarak Denklem 4.2’de sunulan formül ile kütle betonlarının içi ve yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkı kaynaklı çekme gerilmesi hesaplanmaktadır. Hesaplanan çekme gerilmesi; 72 saat sonunda tahribatlı deneylerle belirlenen eksenel basınç dayanımı sonuçları kullanılarak TS 500 (2000) uyarınca hesaplanan eksenel çekme dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bir başka ifadeyle; Denklem 4.2 ile hesaplanan termal sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmelerinin, betonun yaşına göre sahip olduğu çekme gerilmesi dayanımını aşmamasına dikkat edilmiştir; 72 saat sonundaki mevcut deneysel veri ile bu kıyaslama yapılabilmektedir.

$$\sigma_T = K_r \frac{E}{1+\phi} \alpha \Delta t \quad (4.2)$$

Burada;

σ_T : Sıcaklık farkı nedeniyle beton bünyesinde oluşan eksenel çekme gerilmesi, (MPa)

K_r : Beton elemanın kısıtlanma faktörü

E : Betonun elastik modülü, (MPa)

α : Betonun termal genleşme katsayısı, ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Δt : Betonda iç kısım ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı

ϕ : Sünme katsayısı’dır.

Sağlık vd (2007) çalışmalarında betonun kısıtlama faktörü açıklanmış; Denklem 4.2’de yer alan kısıtlama faktörünün 0 ile 1 arasında değişen bir katsayı olduğu ifade etmişlerdir. Esasen bu çalışmada, beton için iki ayrı kısıtlama faktöründen bahsedilmektedir. Bunlardan birincisi betonun büzölmeye karşı kendi içyapısındaki kısıtlama faktörü; diğer ise büzölmeye karşı temel bağlantısından kaynaklanan kısıtlama faktörüdür. Temel bağlantısından dolayı betondaki büzölmeye karşı gelişen kısıtlama faktörünün temel zeminin kaya olması durumunda 1 alınabileceği, betonun büzölmeye karşı herhangi bir kısıtlanması yok ise (serbest) $K_r=0$ olacağı Sağlık vd (2007)

çalışmalarında ifade edilmektedir. Tez çalışması kapsamında incelenen kirişler betonarme olup; içyapısında büzülmeye karşı çalışan çelik donatıların olması ve bununla birlikte 72. saat sonu itibariyle ahşap kalıp içerisinde bulunan betonun termal etkilere karşı bir nevi dış kısıtlamasının olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda, Denklem 4.4'te kullanılacak kısıtlanma faktörü 1,0 kabul edilmiştir.

Betonun termal genleşme katsayısı TS 500 (2000) ve Ersoy et al. (2003) kaynaklarına referansla $1 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ alınmıştır. 72. saat sonuna kadar beton, ahşap kalıp içerisinde kalmıştır. Bu durumda termal etkilerle meydana gelebilecek genleşme nedeniyle, ahşap ve beton arasında sürtünme oluşabilecektir. Bu nedenle; Denklem 4.2'de kullanılacak olan sürtünme katsayısı ahşap ve beton arasındaki sürtünme katsayısıdır ve Anonim (2019) elektronik kaynağından 0,62 olarak alınmıştır.

Kiriş numunelerinin dökümden sonraki 72. saat sonu itibariyle beton içi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle beton bünyesinde meydana gelebilecek çekme gerilmelerinin hesabında ve değerlendirmesinde kullanılmak üzere; kiriş betonlarının 3 günlük elastisite modülü ve eksenel çekme dayanımları TS 500 (2000) uyarınca hesaplanmıştır. Elastisite modülü hesabında Denklem 4.3, eksenel çekme dayanımı hesabında Denklem 4.4 kullanılmıştır.

$$E_{cj} = 14.000 + 3.250\sqrt{f_{cj}} \quad (4.3)$$

$$f_{ctj} = 0,35\sqrt{f_{cj}} \quad (4.4)$$

Burada;

E_{cj} : j günlük betonun elastisite modülü, (MPa)

f_{cj} : j günlük betonun eksenel basınç dayanımı, (MPa)

f_{ctj} : j günlük betonun eksenel çekme dayanımı, (MPa)'dır.

Sıcaklık takibi yapılan K3 kesitli kirişler için 72 saat sonunda, beton yüzeyi ve beton içi arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan termal çekme gerilmeleri Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır ve kiriş betonlarının Denklem 4.4 kullanılarak hesaplanan eksenel çekme dayanımları ile birlikte Çizelge 4.9’da sunulmaktadır.

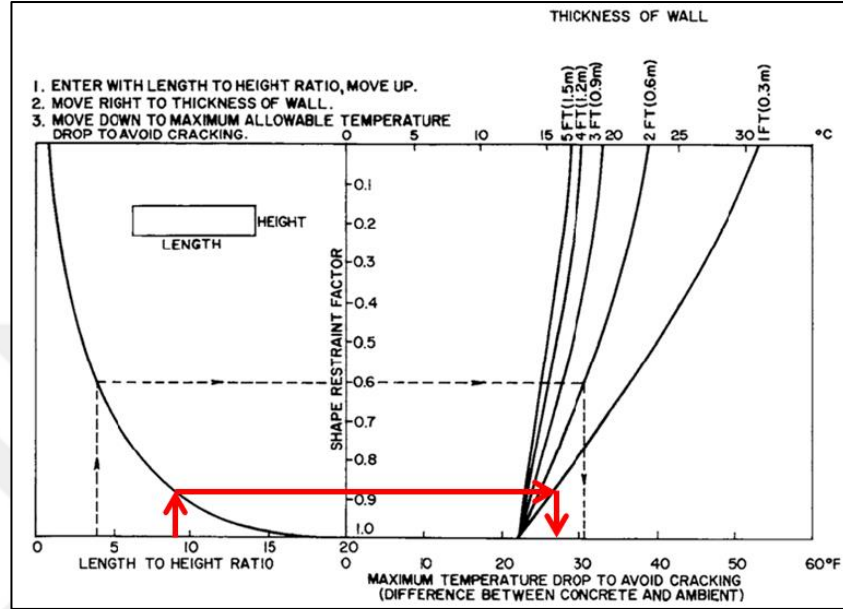
Çizelge 4.9. K3 kesitli kiriş numunelerinin 72 saat sonunda beton içi ve beton yüzeyi arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan beton çekme gerilmeleri.

Kiriş Numunesi	Δt (°C)	K_r	α (°C ⁻¹)	ϕ	f_{cj} (MPa)	E_{c3} (MPa)	σ_T (MPa)	f_{ct3} (MPa)
BS0-S3	-1,7	1	0,00001	0,62	21,3	28.982	0,30	1,6
BS1-S3	-1,3	1	0,00001	0,62	18,2	27.855	0,23	1,5

Çizelge 4.9 incelendiğinde, sıcaklık takibi yapılan kirişler içerisinde 72 saat sonunda beton yüzeyi ve beton içi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle hesaplanan en büyük çekme gerilmesi 0,30 MPa ile BS0-S3 kirişi için hesaplanmıştır. Bu kiriş betonu için hesaplanan eksenel çekme dayanımı ise 1,6 MPa’dır. İncelenen tüm kirişler için beton yüzeyi ve beton içi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle hesaplanan çekme gerilmeleri, eksenel çekme dayanımlarının oldukça altında kalmıştır. Bu nedenle, kalıp alınma anında sıcaklık takibi yapılan K3 kesitli kirişler içerisinde beton içi ve beton yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle çatlak oluşumunun meydana gelmemiş olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Betonun hidratasyon sürecindeki termal davranışında atmosfere açık alan/hacim (A/V) değerinin önemli bir parametre olduğu literatürde pek çok kaynakta ifade edilmektedir. Bu hususun altını özellikle çizen Kim (2010) çalışmasında kütle betonlarında hidratasyon sonucu açığa çıkan ısı enerjisi etkisiyle oluşan sıcaklık artışının beton üzerindeki etkilerini konu etmektedir. A/V oranı arttıkça, betonun döküm sonrası hidratasyon sürecinin dış ortam sıcaklığından etkilenme düzeyinin arttığı şematik gösterimlerle ifade etmektedir. A/V oranının düşük olduğu uygulamalar kütle betonları olurken, oranın nispeten yüksek olduğu uygulamaların kiriş ve döşeme imalatları olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu husus dikkate alındığında, beton duvar türü elemanların A/V oranındaki nispi yükseklik nedeniyle dış atmosferik koşullardan daha fazla etkilenebileceği çıkarımı yapılabilmektedir. Bu husustan hareketle, her ne kadar proje kapsamında test edilen elemanlar duvar ölçülerinde olmasalar da; Şekil 4.7’de sunulan ACI PRC-306 (2016) tarafından Mustard and Ghosh (1979) çalışmasından

alınılan abak (Kalıptan alınan ve koruması sonlandırılan beton duvarın temas ettiği soğuk hava koşullarında rüzgâr hızının 24 km/sa değerini geçmemesi durumunda kullanılabilir.) kullanılarak betonarme kiriş ölçülerindeki bir beton eleman için güvenli diferansiyel sıcaklığın tespiti yapılmıştır.



Şekil 4.7. Beton duvarlar için güvenli diferansiyel sıcaklığın grafiksel tespiti (Mustard and Ghosh 1979).

Şekil 4.7’de kırmızı çizgilerle gösterilen hat takip edilerek, betonarme kirişler için kalıp alınması ve koruma önlemlerinin sonlandırılması sonucunda atmosferle temas eden yüzeyle atmosferik sıcaklık arasında çatlak oluşumuna neden olmadan tolere edilebilecek sıcaklık farkı $\sim 27^{\circ}\text{F}$ ($-2,9^{\circ}\text{C}$) olarak belirlenmiştir. Daha açık bir ifadeyle, koruma önlemlerinin sonlandırılmasının ardından beton ve atmosfer arasında oluşacak sıcaklık farkının $-2,9^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmemesi halinde betonda çatlak oluşumu beklenmediği ifade edilebilmektedir. Bu değer belirlenirken, Şekil 4.7’de sunulan abakta kiriş uzunluğunun kesit yüksekliğine oranı 9 olarak girilmiş ve devamında kiriş genişliği 0,3 m olan eğri ile kesiştirilerek güvenli diferansiyel sıcaklık tayin edilmiştir.

0,3x0,5x4,5 m ölçülerinde betonarme bir kiriş için Şekil 4.7’de, esasen beton duvarlar için sunulan, abak kullanılarak tespit edilen güvenli diferansiyel sıcaklık $2,9^{\circ}\text{C}$ olmuştur. Çizelge 4.8’de 72 saat sonunda bekletilen kirişler için hesaplanan atmosfer ve beton arasında atmosferle ilk tam temas anındaki sıcaklık farkları genel olarak $25-30^{\circ}\text{C}$ arasında değişim göstermektedir. Bu durumda, tüm kirişlerin $2,9^{\circ}\text{C}$ ’lik sınır sıcaklık

farkının içinde bir diferansiyel sıcaklık farkına maruz kaldıkları ve bunun betonda herhangi bir çatlak oluşumuna yol açabileceği düşünülmemektedir. Bununla birlikte, betonarme kirişlerin hidratasyon sürecinin yavaşlaması ile birlikte atmosferik sıcaklıklara rejim ve sayısal değer olarak ayak uydurduğunu ifade etmek mümkündür ki; bu da diferansiyel sıcaklığın kısa süre içerisinde Çizelge 4.8'deki değerlerin oldukça altına ineceği anlamına gelmektedir. Sayısal veri, kalıp alındıktan sonra oluşan günlük sıcaklık farklarının yazın imal edilen betonarme kiriş betonlarında çatlak oluşumuna sebep olabileceğini işaret etse de; her deney öncesi gözle hassas bir şekilde yapılan incelemede hiçbir kiriş yüzeyinde çatlak, kılcal çatlak, vb. hasara rastlanmamıştır. Bu durumda Şekil 4.6'da sunulan abaktan elde edilen kritik sıcaklık farkı değerinin kiriş numuneler için oldukça konservatif kaldığı; ya da betonun yüzeye yakın bölgelerinde içyapısında mikro çatlaklar meydana gelmiş olsa bile bu çatlakların yüzeyde gözle teşhis edilemediği çıkarımı yapılabilmektedir.

4.2. Beton ve Çelik Malzeme Deney Sonuçları

Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan betonarme kiriş imalatlarında kullanılan beton ve çelik malzemeler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına yer verilmektedir. Beton malzeme üzerinde tahribatlı ve tahribatsız deneylerle dayanım belirleme çalışmaları yapılmıştır. Tahribatlı deneyler kapsamında 3, 7 ve 28. günde eksenel basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlaveten, her kiriş için deney günü ikişer adet eksenel basınç numunesi test edilerek deney günü dayanımları da elde edilmiştir. Tahribatsız deneyler kapsamında ise beton sertlik çekici deneyleri ve ultrasonik atımlı dalga geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Ultrasonik atımlı dalga geçiş hızı tayini deneyleri her grup beton için hem küp numuneler hem de kiriş üzerinde 3, 7 ve 28. günlerde gerçekleştirilmiştir. Beton sertlik çekici deneyleri ise tüm kirişler için 1, 2, 3, 7 ve 28. günlerde yapılmıştır.

4.2.1. Beton malzeme dayanım tayini çalışmaları

Tez çalışması kapsamında yazın laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda betonarme kiriş imalatlarında kullanılan beton malzemelerin kırım sonucu elde edilen

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

eksenel basınç dayanımı sayısal değerleri toplu halde Çizelge 4.10'da sunulmaktadır. Çizelge 4.10'da sunulan değerler silindir numune dayanımı değerleridir.

Çizelge 4.10. Kiriş imalatında kullanılan beton eksenel basınç dayanımı değerleri

Döküm Grubu	Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)			
	3. Gün	7. Gün	28. Gün	Kiriş Yükleme Deney Günü*
BS0	21,3	25,5	28,9	30,8
BS1	18,2	19,9	26,8	28,6

*:İlgili gruptaki tüm kirişlerin deney günü tayin edilen eksenel basınç dayanımlarının ortalaması.

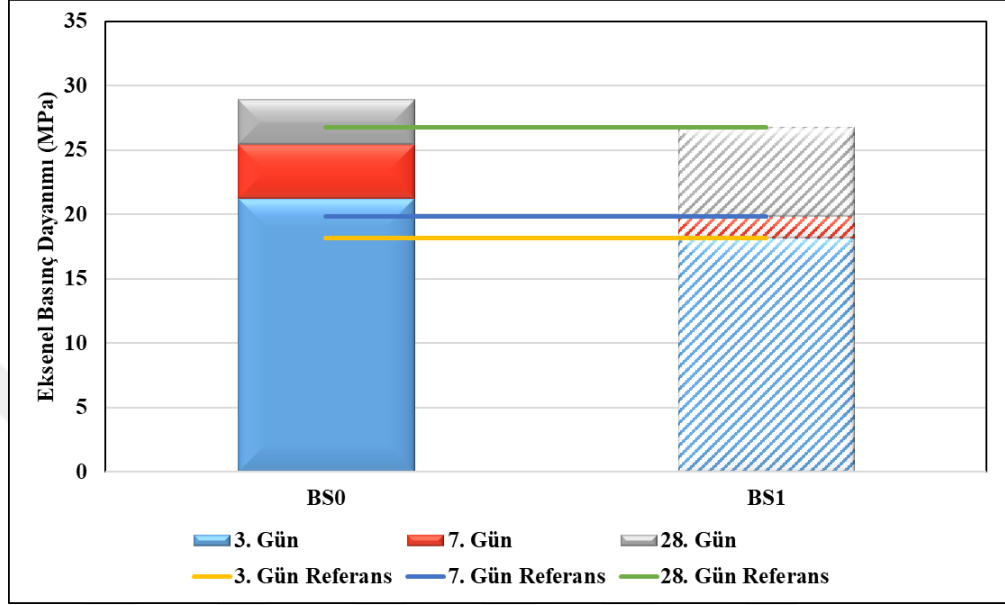
Çizelge 4.10'da 28 günlük eksenel basınç dayanımı değerleri incelendiğinde laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen betonların tamamının C30/37 sınıfı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, deney günü dayanımı olarak adlandırılan eksenel basınç dayanımı değerlerinin her grup için kaç günlük beton dayanımını temsil ettiğinin ifade edilmesi gereklidir. Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda beton dökümü yapılan tüm gruplarda K1, K2 ve K3 kesitli üç adet kiriş arka arkaya, *birkaç gün arayla*, yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Tüm kirişler dökümden net 28 gün geçtikten sonraki uygun tarihlerde deneye alınmışlardır. Kirişlerin imalat ve deney tarihleri toplu halde Çizelge 4.11'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.11. Betonarme kiriş imalat ve deney tarihleri

Numune Kodu	Beton Döküm Tarihi	Kiriş Deney Tarihi	Döküm ve Deney Tarihi Arasında Geçen Zaman (gün)
BS0-S1	29.6.2021	4.11.2021	128
BS0-S2	29.6.2021	9.11.2021	133
BS0-S3	29.6.2021	11.11.2021	135
BS1-S1	18.6.2022	2.8.2022	45
BS1-S2	18.6.2022	3.8.2022	46
BS1-S3	18.6.2022	5.8.2022	48

Her bir kiriş deneyi günü tahribatlı yöntemlerle beton numuneler üzerinde eksenel basınç dayanımı tayinleri yapılmıştır. Aynı beton karışımından imal edilen grup elemanı kiriş betonları için her bir deney günü elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri arasında anlamlı farklar hesaplanmadığından; hesaplanan ortalama eksenel basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.10'da deney günü eksenel basınç dayanımı değeri olarak grup bazında sunulmuştur. Her bir grubun beton imalatı sonrası deneye alındığı tarihe kadar geçen süre farklı olmuştur. Bu nedenle, beton eksenel basınç dayanımlarının

öncelikle 3, 7 ve 28 günlük değerler üzerinden tüm gruplar için birlikte değerlendirilmesinin yapılması uygundur. Tüm beton grupları için 3, 7 ve 28 günlük beton eksenel basınç dayanımları Çizelge 4.10'daki değerler kullanılarak hazırlanan grafik üzerinde Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Kiriş imalatında kullanılan betonların eksenel basınç dayanımı değerleri

Kiriş imalatlarında kullanılan betonların C30/37 sınıfı beton olması planlanmış ve buna uygun olarak beton karışım hesapları yapılmıştır. TS EN 206+A2 (2021) uyarınca beton sınıflama işleminde 28 günlük eksenel basınç dayanımları esas alındığından genel değerlendirme 28 günlük eksenel basınç dayanımları ele alınacaktır. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.8 birlikte incelendiğinde tüm beton gruplarının 28 gün sonunda ~27 MPa ve üstü eksenel basınç dayanımına ulaştıkları görülmektedir.

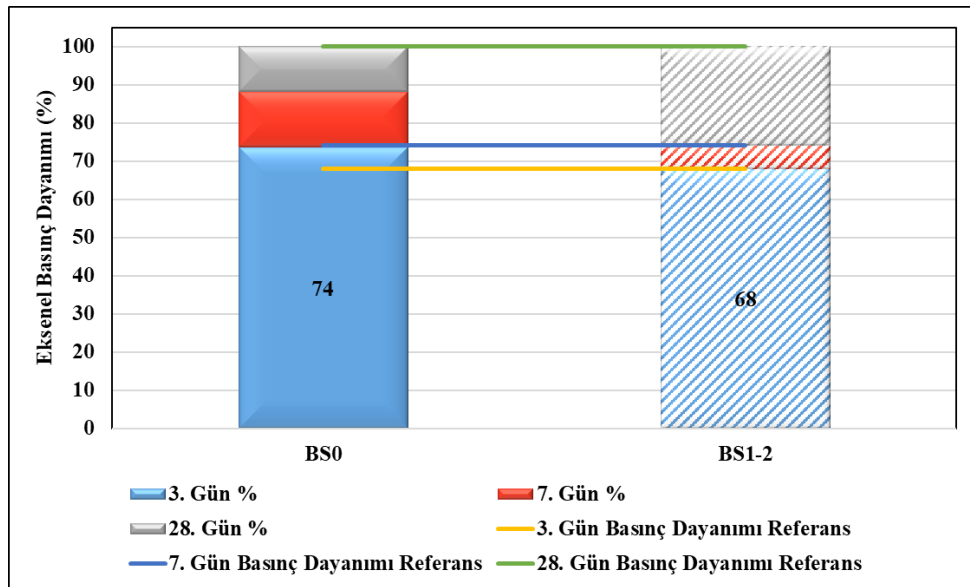
Yaz döneminde imal edilen betonlardan; aynı karışımdan imal edilip laboratuvar ortamında bekletilen BS0 grubu numunelerin 28,9 MPa; atmosferik ortamda bırakılan BS1 grubu numunelerin 28. gün sonunda 26,8 MPa eksenel basınç dayanımına ulaştıkları görülmektedir. Yaz grubu kiriş numunelerinin üretiminde kullanılan betonların 28 günlük eksenel basınç dayanımı değerleri itibarıyla C30/37 sınıfı beton oldukları görülmektedir.

Deney Günü Eksenel Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Çizelge 4.11’de her bir kirişin imalat ve deney tarihleri ile birlikte, imalat-deney arasında geçen süre gün olarak verilmiştir. Her bir alt döküm grubu için, kirişlerin döküm sonrası deneye alındıkları süre ortalama olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.12’de sunulmuştur. Benzer şekilde her bir alt grup için deney günü ortalama basınç dayanımları, 28 günlük eksenel basınç dayanımları ve deney günü eksenel basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük basınç dayanımı değerine oranları Çizelge 4.12’de verilmiştir. İlaveten, imalat sonrası kiriş deneyine kadar geçen ortalama süre dikkate alınarak Şekil 4.9’daki grafikten R tipi çimento için alınan dayanım kazanma oranları da sunulmuştur. Bununla birlikte, Çizelge 4.12’de sunulan ve Eurocode 2 (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014)’den alınan dayanım oranlarının katkısız betonlar için geçerli olduğunun altı çizilmelidir.

Çizelge 4.12. Numune gruplarının kiriş deneyi günü eksenel basınç dayanımları

Numune Grubu	Eksenel Basınç Numunesi Test Zamanı		İmalat Sonrası Kiriş Deneyine Kadar Geçen Ortalama Süre (Gün)	Kiriş Deney Günü Dayanımı/ 28 Günlük Dayanım	
	28. Gün	Kiriş Deneyi Günü		Deneysel	Eurocode 2 (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014)
BS0	28,9	30,8	132	1,07	1,11
BS1	26,8	28,6	31	1,07	1,02

**Şekil 4.9.** Kiriş imalatında kullanılan beton basınç dayanımı gelişimi (%)

Çizelge 4.12 incelendiğinde, laboratuvar ve atmosfer grubu betonlarının eksenel basınç dayanımı kazanma rejimlerinin genel olarak Eurocode 2 (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014)'de sunulan değerlerle uyumlu olduğunu ifade etmek mümkündür.

Laboratuvar ve atmosfere açık grup betonların dayanım kazanma hızları deneysel olarak sırasıyla (BS0, BS1) 1,07 ve 1,07 olup; Eurocode 2 (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014) uyarınca beklenen dayanım kazanma hızları ise 1,11 ve 1,02'dir. Sayısal değerler, laboratuvar ve atmosfer grubu betonların 28 gün sonrası eksenel basınç dayanımı kazanma hızlarının Eurocode 2 (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014)'te öngörülen değerlere oldukça yakın olduklarını göstermektedir.

Tahribatsız Yöntemlerle Beton Eksenel Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında tüm imalat grupları için tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla çalışmalar yürütülmüştür. 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. Her iki yöntemin uygulamaları 3, 7 ve 28. günlerde tahribatlı dayanım testlerinin yapıldığı saatlerde eş zamanlı olarak her grupta 3 kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Bununla birlikte, beton imalatından 1 ve 2 gün sonraki dayanımların kestirimi amacıyla, laboratuvar ve atmosfer grubu kirişlerin kalıpla çevrelenmeyen üst yüzeylerinden dikey vuruşla sertlik okumaları alınmıştır. Tahribatsız deneylerle elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri takip eden bölümde sunulmaktadır.

a) Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyleri ile Eksenel Basınç Dayanımı Tahminleri

Tüm beton grupları için kirişler üzerinden yapılan ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri, Raouf and Ali (1983) ve Turgut and Küçük (2006) çalışmalarında sunulan kalibrasyon bağıntıları kullanılarak eksenel basınç dayanımı değerine dönüştürülmüştür ve bu değerler sırasıyla Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te sunulmuştur. Her iki tabloda da 3, 7 ve 28. günde tahribatlı deneyle tayin edilen eksenel basınç dayanımı değerleri referans alınarak; ultrasonik atımlı dalga hızı testi sonucu elde edilen eksenel basınç

dayanımı değerleri için % farklar hesaplanmıştır. Bu şekilde, deneysel veriyi referans olarak hesaplanan fark değerlerinin, rölatif hata olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.13. Ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri üzerinden Raouf and Ali (1983) çalışmasında sunulan kalibrasyon bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı tahmin.

Kiriş Grubu	3 gün				7 gün				28 gün		
	Kırım	UPV	Fark (%)		Kırım	UPV	Fark (%)		Kırım	UPV	Fark (%)
BS0	21,3	21,0	-1		25,5	22,3	-12		28,9	25,7	-11
BS1	18,2	18,3	1		19,9	25,0	26		26,8	24,7	-8

Çizelge 4.14. Ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri üzerinden Turgut and Kucuk (2006) çalışmasında sunulan kalibrasyon bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı tahmin.

Kiriş Grubu	3 gün				7 gün				28 gün		
	Kırım	UPV	Fark (%)		Kırım	UPV	Fark (%)		Kırım	UPV	Fark (%)
BS0	21,3	22,3	5		25,5	24,0	-6		28,9	28,7	-1
BS1	18,2	19,7	8		19,9	28,0	41		26,8	26,7	0

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’ te laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen beton grupları için 3, 7 ve 28 günlük eksenel basınç dayanımı tahminleri incelendiğinde, Raouf and Ali (1983) kalibrasyon bağıntısının 3 günlük dayanım tahminlerinin son derece başarılı olduğu; ancak 7 ve 28 günlük eksenel basınç dayanımı tahminlerinde hata oranlarının artmakla birlikte, literatürde başarılı bulunan sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Turgut and Küçük (2006) kalibrasyonunun yaz grubu betonların 28 günlük eksenel basınç dayanımı tahminlerinin %0-%7 aralığında hata değerleriyle son derece başarılı olduğu görülmektedir. Turgut and Küçük (2006) kalibrasyonunun BS0 grubu için 3 günlük eksenel basınç dayanımı tahmini hatasının %27, BS1 grubunun 7 günlük eksenel basınç dayanımı tahmin hatasının %41 oluşu da dikkat çekicidir.

b) Sertlik Çekici Deneyleri ile Eksenel Basınç Dayanımı Tahminleri

Sertlik çekici okumaları üzerinden tüm beton grupları için yapılan eksenel basınç dayanımı tahminleri Çizelge 4.15’te sunulmaktadır.

Çizelge 4.15. Sertlik çekici okumaları üzerinden yapılan eksenel basınç dayanımı tahmin değerleri.

Kiriş Grubu	1 gün	2 gün	3 gün			7 gün			28 gün		
	Sertlik Çekici	Sertlik Çekici	Kırım	Sertlik Çekici	Fark (%)	Kırım	Sertlik Çekici	Fark (%)	Kırım	Sertlik Çekici	Fark (%)
BS0	18,7	21,3	21,3	27,7	30	25,5	31,3	23	28,9	32,0	11
BS1	18,7	21,3	18,2	18,7	3	19,9	15,7	-21	26,8	23,3	-13

Goudie (2006) çalışmasında ve benzer pek çok çalışmada da ifade edildiği üzere Schmidt çekici olarak bilinen alet ilk kez 1948 yılında beton yüzey sertliği değerlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. Tahribatsız beton muayene yöntemlerinden birisi olan sertlik çekici uygulaması, son derece pratik bir uygulama olmasıyla birlikte cihaz temininin yüksek maliyet gerektirmemesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında da; yazın imal edilen betonların eksenel basınç dayanımı tahminlerinde sertlik çekici uygulamasının kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmış ve kiriş numuneleri üzerinde yapılan ölçümler neticesinde Çizelge 4.15'te sunulan sonuçlara ulaşılmıştır. Çizelge 4.15'te sunulan sonuçlara genel olarak bakıldığında; sertlik çekici uygulaması ile laboratuvar ve atmosfer grubu betonları 28 günlük eksenel basınç dayanımı tahminlerinin oldukça başarılı olduğu, kırım sonuçlarına referansla hesaplanan %10-%13 arasındaki rölatif hata değerlerinin kabul edilebilir sınırlarda olduğu ifade edilebilmektedir. BS0 ve BS1 yaz grubu kirişler üzerinden alınan sertlik okumalarıyla belirlenen eksenel basınç dayanımı değerleri için hesaplanan rölatif hatanın 3 günden 28 güne doğru azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.15'te kiriş numunesi yüzeylerinden beton dökümünden 1 ve 2 gün sonra alınan sertlik okumaları üzerinden yapılan basınç dayanımı tahminleri de sunulmaktadır. Bu günler de tahribatlı dayanım testleri yapılmadığından; toplanan verinin 3, 7 ve 28 günlük tahmin başarımları üzerinden değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Ancak, kırım sonuçları için farklı gün dayanım tahminleri için hesaplanan rölatif hata oranlarının yüksek olması sertlik okumaları üzerinden yapılan 1 ve 2 günlük basınç dayanımı tahminlerinin yeterince güvenli bir aralıkta yer almadıkları sonucunu gündeme getirmiştir. Tüm günler için, sertlik okuması tahminlerinin kırım sonuçlarından daha düşük değer verdiği görülse de; hata oranlarının değişkenliği 1 ve 2 günlük dayanım tahminlerini sorgulanır kılmaktadır.

Tahribatsız yöntemlerle imal edilen betonların eksenel basınç dayanımı tahminlerindeki başarımın; ultrasonik atımlı dalga hızı ve yüzey sertliği değerleri üzerinden yapılan tahminlerdeki hata oranları bakımından bütüncül olarak değerlendirilebilmesi için Çizelge 4.16 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.16. Ultrasonik atımlı dalga hızı ve sertlik çekici uygulamaları ile yapılan beton eksenel basınç dayanımı tahminlerindeki rölatif hata oranları.

Kiriş Grubu	3. Gün - Rölatif Hata (%)			7. Gün - Rölatif Hata (%)			28. Gün - Rölatif Hata (%)		
	UPV-1*	UPV-2**	Sertlik Çekici	UPV-1	UPV-2	Sertlik Çekici	UPV-1	UPV-2	Sertlik Çekici
BS0	-1	5	30	-12	-6	23	-11	-1	11
BS1	1	8	3	26	41	-21	-8	0	-13

*: Raouf and Ali (1983) kalibrasyonu ile hesaplanan eksenel basınç dayanımıdır.

** : Turgut and Küçük (2006) kalibrasyonu ile hesaplanan eksenel basınç dayanımıdır.

Çizelge 4.16 incelendiğinde, imal edilen ve beton dökümünden 3 gün sonra koruma önlemleri kaldırılarak atmosferik hava koşullarında bekletilen kirişlerin 3, 7 ve 28 gün sonunda eksenel basınç dayanımı tahminlerin hata oranı en yüksek tahribatsız uygulamanın sertlik çekici uygulaması olduğu görülmektedir. 7 ve 28. günlerde Turgut and Küçük (2006) kalibrasyonu ile ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri üzerinden hesaplanan tahmini eksenel basınç dayanımı değerlerinin, diğer uygulamalara göre daha başarılı olduğunu ifade etmek mümkündür. 3 günlük dayanım tahminlerinde ise en başarılı tahribatsız yöntemin Raouf and Ali (1983) kalibrasyonu ile ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümü uygulaması olduğu görülmektedir.

Gelinen noktada, ultrasonik atımlı dalga hızı yönteminin kışın imal edilen betonların eksenel basınç dayanımı tahminlerinde sertlik çekici yöntemine nazaran daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. İlgili literatür, bu çıkarımı destekleyen çalışmalara Qasrawi (2000) ve Hobbs and Kebir (2007) çalışmaları örnek gösterilebilmektedir. Qasrawi (2000) çalışmasında hasarsız deney yöntemleri ile beton dayanımı tahminlerini özetlemiştir ve yaptığı çalışmada beton numunelere hem test çekici hem de ultrasonik ses hızı testleri uygulamıştır. Çalışma neticesinde, beton eksenel basınç dayanımının tahmininde ultrasonik atımlı dalga hızı yönteminin daha etkili olduğu sonucuna varmış olmakla birlikte UPV ve test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılmasının daha güvenilir olduğunu ifade etmiştir. Benzer bir araştırma sonucu Hobbs and Kebir (2007)'in çalışmalarında literatüre eklenmiştir. Söz konusu çalışmada, ultrasonik atımlı dalga hızı

yönteminin beton dayanımının belirlenmesinde daha etkili olduğu gözlenmiştir, fakat bu yöntemin tek başına kullanımı yerine UPV ve test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılarak elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu fikrine ulaşılmıştır.

Eğilmede Çekme Dayanım Testi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında imalatı yapılan tüm beton gruplarından alınan 10x10x40 cm ölçülerindeki eğilme numunelerinin 28 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.17’de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, laboratuvar ve atmosfer grubu betonların tamamının 28 gün sonunda eğilmede çekme dayanımı değerlerinin birbirine çok yakın olmakla birlikte; ortalama 3,6 MPa olduğu görülmektedir. Ersoy et al. (2003) kaynağında ve TS 500 (2000)’de betonun çekme dayanımının, deney türüne bağlı olarak, eksenel basınç dayanımının karekökü ile doğru orantılı olduğu ifade edilmektedir.

Çizelge 4.17. Beton gruplarının 28 günlük eğilmede çekme dayanımları

Kiriş Grubu	28 Günlük Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
		DeneySEL	Bağıntı 4.7	Fark (%)
BS0	28,9	3,7	3,4	-6
BS1	26,8	3,6	3,3	-9

Proje çalışmalarının temel hedeflerinden birisi, yürürlükte olan betonarme hesap mevzuatının ve bu mevzuatla ilgili olarak kabul gören uygulama ve literatürün, yapılacak betonarme imalat için geçerlilik düzeylerinin incelenmesidir. Bu bakımdan, Çizelge 4.17’de sunulan ve deneysel olarak hesaplanan laboratuvar ve atmosfer grubu betonların eğilmede çekme dayanımı değerlerinin, eksenel basınç dayanımı üzerinden hesaplanan değerleri ile karşılaştırılması gerekli görülmüştür. TS 500 (2000)’de betonun çekme dayanımı olarak sadece doğrudan çekme dayanımı kabul edilmiş ve bu değeri eksenel basınç dayanımı için hesaplanması amacıyla Denklem 4.4’deki formüle yer verilmiştir. Bu nedenle, eğilmede çekme dayanımı için Ersoy et al. (2003) kaynağında önerilen Denklem 4.5 kullanılarak tüm beton grupları için eğilmede çekme dayanımı hesaplanmıştır. ACI 318-19 (2022) benzer yükleme durumu için betonun eğilmede çekme

dayanımının eksenel basınç dayanımına bağlı olarak hesabında Denklem 4.5'te sunulan katsayıyı 0,62 olarak önermektedir. Ancak, bu çalışmada Denklem 4.5'te sunulan formül kullanılarak eğilmede çekme dayanımı hesapları yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.17'de sunulmuştur.

$$f_{ctfj} = 0,64\sqrt{f_{cj}} \quad (4.5)$$

Burada;

f_{ctfj} : j günlük beton kirişi numunesi ortasından iki noktadan yükleme ile elde edilen eğilmede çekme dayanımı, (MPa)

f_{cj} : j günlük betonun eksenel basınç dayanımıdır.

Çizelge 4.17'de sunulan yazın imal edilen laboratuvar ve atmosfer gruplarının imalatında Denklem 4.5 oldukça başarılı bir şekilde %3-%9 rölatif hata oranları ile eksenel basınç dayanımı kullanılarak eğilmede çekme dayanımı hesabının yapıldığı görülmektedir.

Yarmada Çekme Dayanım Testi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında laboratuvar ve atmosfer ortamında imalatı yapılan tüm beton gruplarından alınan ve kirişlerle aynı koşullarda muhafaza edilen silindirik beton numuneleri üzerinde yarmada çekme deneyi yapılmış ve sonuçlar toplu halde Çizelge 4.18'de sunulmuştur. Eğilmede çekme dayanımı verisi üzerinde yapılan irdeleme çalışması, yarmada çekme deneyi sonuçları üzerinde de yapılmış ve eksenel basınç dayanımı değerleri üzerinden yarmada çekme dayanımı değerlerinin hesaplanması için Ersoy et al. (2003) çalışmasında yer alan formül kullanılmıştır. Denklem 4.6'da sunulan doğru orantı çarpanı ACI 318-19 (2022)'da 0,56 olarak önermektedir. Ancak, bu çalışmada Denklem 4.6'da sunulan formül kullanılarak yarmada çekme dayanımı hesapları yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.18'de sunulmuştur. TS 500 (2000) mevzuatında betonun yarmada çekme dayanımı hesabına ilişkin bir açıklama ya da formül bulunmamaktadır.

$$f_{ctfj} = 0,50\sqrt{f_{cj}} \quad (4.6)$$

Burada;

f_{ctfj} : j günlük beton numunesinin eksenel basınç dayanımı üzerinden hesaplanan çekme dayanımı, (MPa)

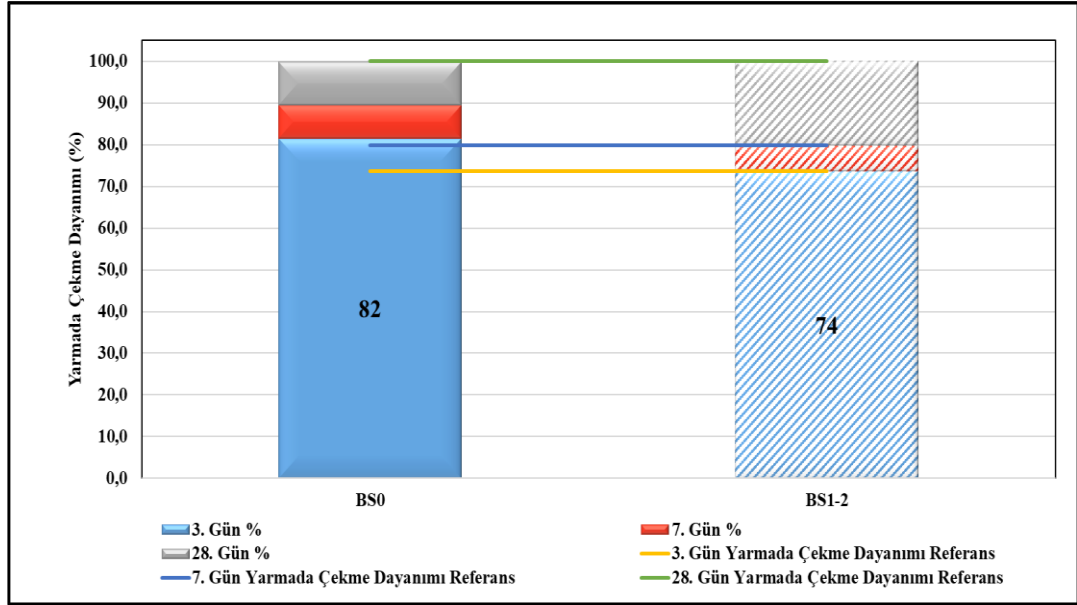
f_{cj} : j günlük betonun eksenel basınç dayanımıdır.

Çizelge 4.18. Beton gruplarının 3, 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları

Kiriş Grubu	3. gün			7. Gün			28. Gün		
	Kırım	Bağıntı 4.8	Fark (%)	Kırım	Bağıntı 4.8	Fark (%)	Kırım	Bağıntı 4.8	Fark (%)
BS0	2,5	2,3	-6	2,7	2,5	-6	3,0	2,7	-10
BS1	2,3	2,1	-7	2,5	2,2	-10	3,1	2,6	-17

Çizelge 4.18 incelendiğinde, Denklem 4.6 ile yaz grubu betonların 3 ve 7 günlük eksenel basınç dayanımları üzerinden yarmada çekme dayanımı hesaplarının deneysel veriye oldukça yakın sonuçlar verdiği; 28 günlük dayanımlar için deneysel veriye oranla rölatif hata artsa da (%10-%17) kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı düşünülmektedir.

Anımsanacağı üzere, tez çalışması kapsamında imal edilen betonların eksenel basınç dayanımı kazanma hızları laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imalata bağlı olarak incelenmiştir. Bu bölümde ise çalışılan beton gruplarının yarmada çekme dayanımları üzerinden, çekme dayanımı kazanma süreçleri üzerinde değerlendirme yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.10’da tüm beton gruplarının yarmada çekme dayanımlarının 28 günlük yarmada çekme dayanımına oranla dayanım kazanma rejimleri sunulmuştur.



Şekil 4.10. 28 günlük yarmada çekme dayanımına oranla tüm beton gruplarının çekme dayanımı kazanma oranları.

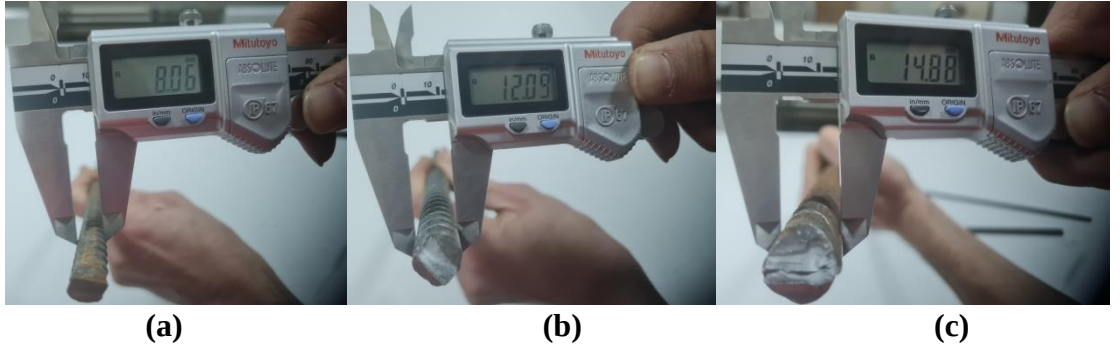
Şekil 4.10 incelendiğinde, kiriş deneylerinde ana referans grup olan BS1 grubu betonların 3 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımının %74' üne ulaştıkları görülmektedir. Yaz grubu imalatlardan BS0 grubunun 3 günde, 28 günlük yarmada çekme dayanımının %82' sine ulaştığı belirlenmiştir. Yaz imalatlarının 3 gün sonunda 28 günlük eksenel basınç dayanımını kazanma yüzdesi ortalama %67' dir. Benzer şekilde yaz grubu betonlarda 3 günde 28 günlük yarmada çekme dayanımının ortalama %75' ine ulaşılmıştır. Toparlanacak olursa, laboratuvar ve atmosfer açık grup betonlarda 3 günlük yarmada çekme dayanımı kazanma oranlarının, eksenel basınç dayanımı kazanma oranlarından yüksek olduğu görülmüştür.

4.2.2. Çelik malzeme dayanımı ve sınıfının tayini çalışması

Tez çalışması kapsamında yazın imal edilen betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır, mekanik davranış parametreleri üzerinden muadil olup olmadıkları üzerine değerlendirmeler yapılması hedeflenmiştir. Eğilme etkisi altındaki kesit davranışının incelenmesi durumunda boyuna donatı mekanik özelliklerinin kesitin dayanım ve davranışı üzerinde beton bileşenine nazaran daha etkili olduğu bilinmektedir. Ersoy et al. (2003) çalışmasında betonarme bir kesitin moment taşıma kapasitesinin boyuna donatı mekanik özellikleri doğru orantılı olduğu net bir şekilde ifade edilerek bu hususu açıklayıcı sayısal örnekler sunulmaktadır.

Aynı çalışmada çelik boyuna donatı akma dayanımında meydana gelecek %10 oranındaki azalmanın, moment taşıma kapasitesinde %9 oranında azalmaya yol açtığı örneklendirilmektedir. Benzer bir kıyaslama örnek bir betonarme kesit üzerinde beton basınç dayanımındaki değişim için yapılmıştır; çalışılan kesitte beton eksenel basınç dayanımının %60 oranında azalmasının moment taşıma kapasitesinde boyuna donatının S220 sınıfı olması durumunda %13, S420 olması durumunda ise %20 oranında azalma meydana geldiği ifade edilmektedir. Bu husus dikkate alınarak, proje kapsamında incelenen betonarme kirişlerin tamamı için aynı bağdan donatı kullanılmış ve TS 708 (2016) uyarınca yapılan kapsamlı incelemeler neticesinde çelik donatıların mekanik özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda farklı atmosferik koşullarda bekletilen her bir donatı çubuğu grubu için elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır.

Temin edilen Ø8, Ø12 ve Ø14 nervürlü donatı grupları için öncelikle elektronik göstergeli, hassas kumpas yardımıyla her bağ donatı için muhtelif çubuklardan çap ölçümleri yapılmış ve her grup için donatı çap ortalamasının satın alınırken beyan edilen donatı çapını sağladığı görülmüştür. Donatı çap ölçümlerine ilişkin görüntüler Şekil 4.11 (a), Şekil 4.11 (b) ve Şekil 4.11 (c)'de sunulmaktadır.



Şekil 4.11. Çelik donatı çubuklarının çap ölçümlerinden genel görüntüler, (a) Ø8 çelik donatı çubukları, (b) Ø12 çelik donatı çubukları, (c) Ø14 çelik donatı çubukları.

Çelik donatı çubuklarının nervür detayı ve donatı sınıfı işaretini imalatla kullanılan donatı çubuklarının nervür detayları Şekil 4.12'de sunulmaktadır.



Şekil 4.12. Ø8, Ø12 ve Ø14 donatı çubukları nervür detay görüntüleri

TS 708 (2016) nervürlü çelik çubukların yüzey geometrilerinin incelenmesini düzenleyen kuralları da içermektedir. Nervür geometrisi ile ilgili parametreler nervür yüksekliği, nervür aralığı, nervür eğimi ve bağıl nervür alanı olarak belirtilmektedir. Nervür geometrisinin incelenmesi ve nervür açılarının belirlenmesi oldukça hassas ölçümleri gerektirmektedir. Çalışmanın yapıldığı laboratuvar koşullarında bu teknik imkânların bulunmaması nedeniyle nervür açıları, vb. parametrelerin tamamına ilişkin ölçümlerin yapılması mümkün olmamıştır. Bununla birlikte, nervürler arası mesafenin ölçümü amacıyla yapılan çalışmaya ait görüntüler Şekil 4.13 (a), Şekil 4.13 (b) ve Şekil 4.13 (c)'de sunulmaktadır.



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.13. Çelik donatı çubuklarının nervür aralıklarının ölçüm çalışmalarından görüntüler, (a) Ø8 çelik donatı çubukları, (b) Ø12 çelik donatı çubukları, (c) Ø14 donatı çubukları.

TS 708 (2016)'da nervür aralığının donatı anma çapının 0,4-1,2 katı arasında olabileceği ifade edilmektedir. Donatı anma çapı, nervürlü donatı ile aynı uzunluk ve kütledeki düz beton çelik çubuğuna eşit çapa sahip değer olarak nitelendirilmektedir. Tüm donatı çubukları için yapılan çap ölçümlerinde anma çapının Ø8 için ortalama 8,06 mm, Ø12 için 12,09 mm ve Ø14 için 14,03 mm olduğu belirlenmiştir. Çizelge 4.19'da çalışmada kullanılan çelik donatılar için TS 708 (2016) uyarınca hesaplanan nervür

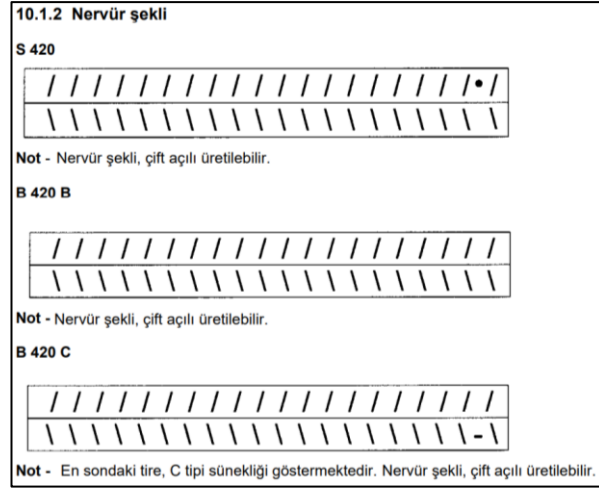
aralığı sınırları ile çalışma kapsamında ölçülen ortalama nervür aralıkları birlikte sunulmaktadır. Bununla birlikte, dijital göstergeli hassas kumpas ile yapılan nervür aralığı ölçümlerinden elde edilen ortalama değerler de Çizelge 4.19’da sunulmaktadır.

Çizelge 4.19. TS 708 (2016) uyarınca nervür aralığı sınır ve ölçüm değerleri

Donatı	Ortalama Çap d (mm)	Nervür Aralığı (mm)			Deneysel Ölçüm/Üst Sınır (%)
		Alt sınır	Üst Sınır	Deneysel Ölçüm	
Ø8	8,06	3,22	9,67	8,40	87
Ø12	12,09	4,84	14,51	11,65	80
Ø14	14,03	5,61	16,84	15,52	92

Çizelge 4.19’da sunulan değerler incelendiğinde Ø8, Ø12 ve Ø14 çaplı çubuklar üzerinde yapılan nervür aralığı ölçüm sonuçlarının TS 708 (2016) standardının öngördüğü sınır değerler arasında olduğu ve tamamının üst sınır değere yakın değerlerde çıktığı görülmektedir. Ø8 çaplı çubuklar için ölçülen ortalama nervür aralığının anma çapı üzerinden TS 708 (2016) uyarınca hesaplanan üst sınır nervür aralığı değerinin %87’ sine tekabül ettiği görülmektedir. Aynı oran, Ø12 ve Ø14 çaplı çubuklar için sırasıyla %80 ve %92 olarak belirlenmiştir. İncelenen donatı çubukları arasında anma çapına oranla en geniş aralıklı nervür imalatının Ø14 çubuklarda yapılmış olduğu görülmektedir.

TS 708 (2016) standardı betonarme için donatı çeliklerinin sağlaması gereken özellikleri ve kalite kontrol çalışmalarını düzenleyen ulusal mevzuattır. TS 708 (2016), çelik donatı çubuklarının mekanik özelliklerinin yanı sıra 10.1.2 başlığı altında nervür geometrilerini ve çelik sınıfını ifade eden işaretlere de, Şekil 4.14’te gösterildiği şekilde, yer vermektedir.



Şekil 4.14. TS708 (2016) uyarınca nervür geometrileri

Şekil 4.12 ve Şekil 4.14 birlikte incelendiğinde, çelik çubuklar üzerindeki imalat işaretlerinden hareketle Ø14 çelik donatının B 420C, Ø12 ve Ø8 çelik donatılarının S420 sınıfında imal edildiği anlaşılmaktadır. Temin edilen donatıların beyan edilen çelik sınıfında olup olmadıklarının kontrolü için, TS 708 (2016) uyarınca aynı bağdan fakat farklı boylardan çıkarılmış 3 adet çelik çubuk numunenin eksenel çekme deneyine tabi tutulması gerekmektedir. 3 adet deney sonucunun yetersiz ya da tartışmalı sonuç sunması halinde deney numunesi sayısının 10' a çıkarılarak değerlendirme yapılması şart koşulmaktadır. TS 708 (2016) 7.2 başlığı altında donatı çubuklarının sağlanması gereken mekanik özelliklere Çizelge 3 başlığı altında yer verilmektedir. Söz konusu çelik donatı sınıflandırma tablosu Şekil 4.15'te sunulmaktadır.

Çizelge 3 - Mekanik özellikler

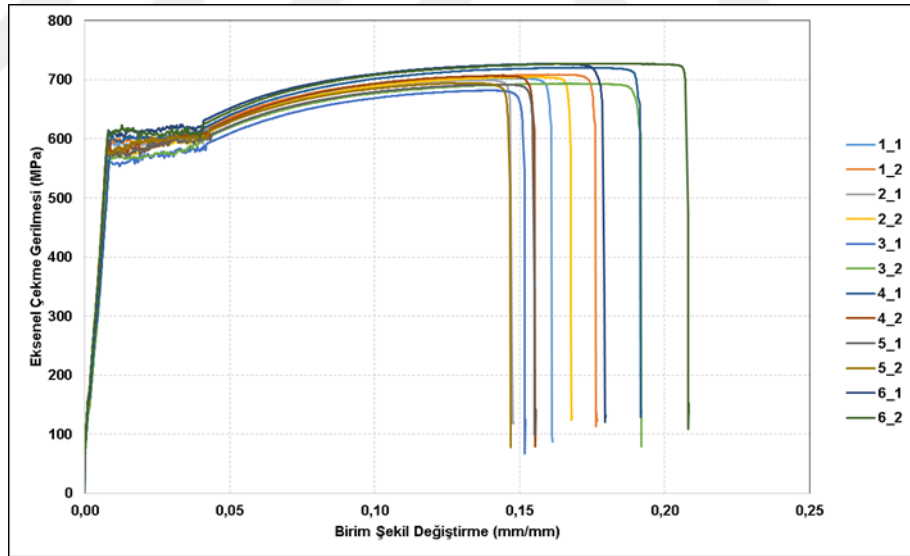
Tip	Düz yüzeyli	Nervürlü					Profilli ^a
Sınıf	S 220	S 420	B 420B	B 420C	B 500B	B 500C	B500A
Akma dayanımı (en az) R_e (N/mm ²)	220	420	420	420	500	500	500
Çekme dayanımı (en az) R_m (N/mm ²)	340	500	-	-	-	-	550
Çekme dayanımı/akma dayanımı oranı R_m/R_e	1,20 (en az)	1,15 (en az)	1,08 (en az)	$\geq 1,15$ < 1,35	1,08 (en az)	$\geq 1,15$ < 1,35	-
Deneysel akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranı $R_{e\,act}/R_{e\,nom}$ (max)	-	1,30	-	1,30	-	1,30	-
Kopma uzaması (en az) A_5 (%)	18	10	12	12	12	12	5
En büyük yükte toplam uzama (en az) A_{gt} (%)	-	-	5	7,5	5	7,5	2,5
Bükme açısı (°)	180		-				
Bükme açısı/geri (ters) bükme açısı ^b (°)	-		90/20				
^a Soğuk mekanik işlem uygulanarak da imal edilebilir.							
^b Çizelge 4'ün ^b dip notu.							

Şekil 4.15. TS 708 (2016) uyarınca çelik donatı sınıfları ve sağlanması gereken mekanik özellikler.

Çelik çekme deneylerinden alınan sonuçlar Şekil 4.15'te sunulan mekanik özellikler üzerinden değerlendirilerek çelik donatı sınıflarının deneysel olarak tayini yapılmıştır. Takip eden bölümde çelik çekme deneylerinden elde edilen bulgular her bir donatı çapı için ayrı ayrı sunulmaktadır. Eksenel çekme deneyi sonucunda üretilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinde çok az sayıda da olsa prematüre deney sonucu olduğu görülecektir. Sayısal hesaplamalarda bu deneyler işlem dışı bırakılmıştır.

Ø8 Nervürlü Donatı Çubuğu Eksenel Çekme Deneyi Sonuçları

Ø8 nervürlü çelik çubuklar betonarme kiriş imalatında enine donatı (etriye) yapımında kullanılmıştır. “MATERYAL ve YÖNTEM” bölümünde açıklandığı şekilde, çelik çubuklar kış aylarında tedarik edildiğinden laboratuvar koşullarına uyum sağlayıncaya kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve mümkün olan en kısa süre içerisinde eksenel çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Ø8 çelik çubuklar için elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.16’da sunulmaktadır.



Şekil 4.16. Ø8 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

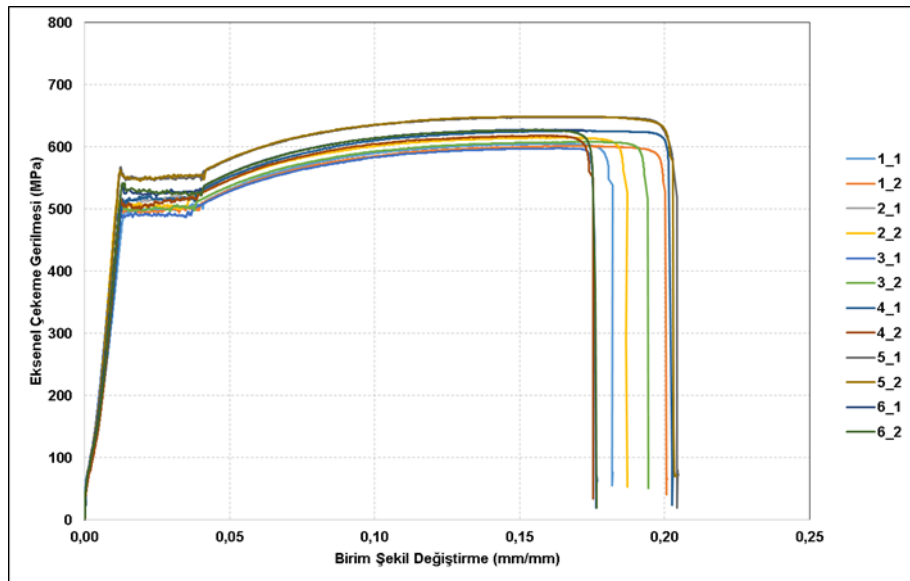
Ø8 çelik çubuk eksenel çekme deneyleri sonucunda elde edilen akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri toplu halde Çizelge 4.20’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.20. Ø8 nervürlü çelik çubuklara ait eksenel çekme deneyi sonuçları

Numune	Dayanım (MPa)			Kopma Uzaması (%)	Maksimum Yükteki Uzama (%)	Çekme Dayanımı / Akma Dayanımı	Deneyisel Akma Dayanımı / Karakteristik Akma Dayanımı
	Karakteristik Akma	Deneyisel Akma	Deneyisel Çekme				
Ø8-1-1	420	600,1	703,0	16,1	14,1	1,17	1,43
Ø8-1-2	420	593,9	708,9	17,7	16,2	1,19	1,41
Ø8-2-1	420	579,7	699,6	14,8	13,1	1,21	1,38
Ø8-2-2	420	584,3	704,8	16,8	14,2	1,21	1,39
Ø8-3-1	420	562,6	682,1	15,2	14,1	1,21	1,34
Ø8-3-2	420	561,2	693,6	19,2	16,3	1,24	1,34
Ø8-4-1	420	610,3	720,7	19,2	17,2	1,18	1,45
Ø8-4-2	420	598,6	706,8	15,6	14,4	1,18	1,43
Ø8-5-1	420	578,5	692,0	15,5	14,6	1,20	1,38
Ø8-5-2	420	585,6	694,5	14,7	13,2	1,19	1,39
Ø8-6-1	420	614,2	727,2	18,0	16,6	1,18	1,46
Ø8-6-2	420	613,6	727,5	20,8	17,3	1,19	1,46
Minimum:		561,2	682,1	14,7	13,1	1,17	1,34
Maksimum:		614,2	727,5	20,8	17,3	1,24	1,46
Ortalama:		590,2	705,1	17,0	15,1	1,20	1,41
Standart Sapma:		17,3	13,6	1,9	1,5	0,02	0,04
Değişim Katsayısı (%):		2,9	1,9	11,3	9,6	1,4	2,9

Ø12 Nervürlü Donatı Çubuğu Eksenel Çekme Deneyi Sonuçları

Ø12 nervürlü çelik çubuklar betonarme kiriş imalatında K1 ve K2 kesitli kirişler için montaj donatısı olarak 2' şer adet kullanılmıştır. Ø12 çelik çubuklar için elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.17'de sunulmaktadır.



Şekil 4.17. Ø12 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

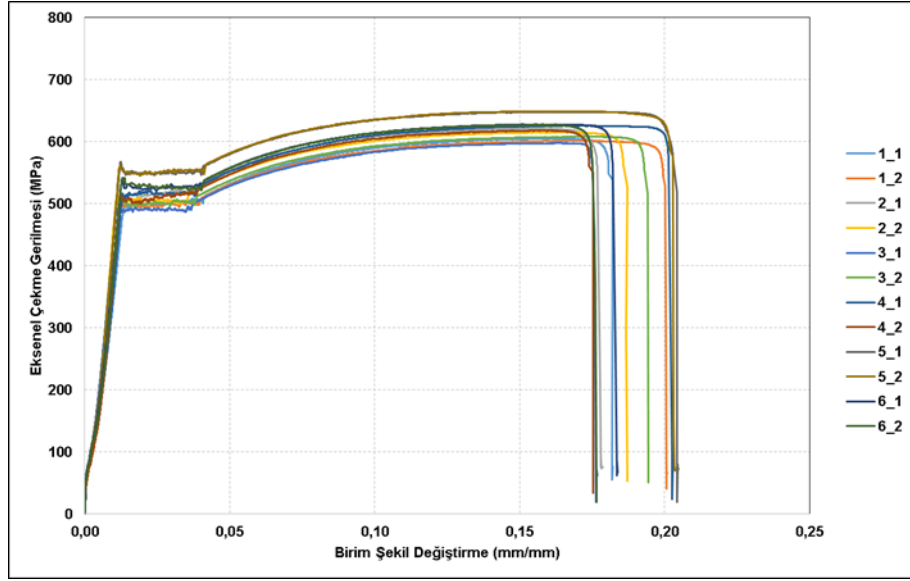
Ø12 çelik çubuk aksenal çekme deneyleri sonucunda elde edilen akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri toplu halde Çizelge 4.21’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.21. Ø12 nervürlü çelik çubuklara ait aksenal çekme deneyi sonuçları

Numune	Dayanım (MPa)			Kopma Uzaması (%)	Maksimum Yükteki Uzama (%)	Çekme Dayanımı / Akma Dayanımı	Deneyisel Akma Dayanımı / Karakteristik Akma Dayanımı
	Karakteristik Akma	Deneyisel Akma	Deneyisel Çekme				
Ø12-1-1	420	497,7	605,1	18,2	13,1	1,22	1,19
Ø12-1-2	420	502,4	601,5	20,1	12,9	1,20	1,20
Ø12-2-1	420	517,4	621,6	17,9	13,2	1,20	1,23
Ø12-2-2	420	514,3	615,3	18,7	13,1	1,20	1,22
Ø12-3-1	420	491,6	597,9	17,7	13,3	1,22	1,17
Ø12-3-2	420	504,3	608,3	19,4	14,1	1,21	1,20
Ø12-4-1	420	516,2	626,1	20,3	13,5	1,21	1,23
Ø12-4-2	420	516,5	618,2	17,5	13,4	1,20	1,23
Ø12-5-1	420	567,0	648,2	20,5	13,4	1,14	1,35
Ø12-5-2	420	563,1	649,0	20,4	13,6	1,15	1,34
Ø12-6-1	420	536,3	628,0	18,4	12,8	1,17	1,28
Ø12-6-2	420	541,8	627,2	17,6	13,6	1,16	1,29
Minimum:		491,6	597,9	17,5	12,8	1,14	1,17
Maksimum:		567,0	649,0	20,5	14,1	1,22	1,35
Ortalama:		522,4	620,5	18,9	13,3	1,19	1,24
Standart Sapma:		23,6	15,8	1,1	0,3	0,02	0,06
Değişim Katsayısı (%):		4,5	2,6	5,9	2,5	2,1	4,5

Ø14 Nervürlü Donatı Çubuğu Aksenal Çekme Deneyi Sonuçları

Ø14 nervürlü çelik çubuklar betonarme kiriş imalatında tüm kirişler için çekme donatısı, ayrıca K3 kesitli kirişlerde basınç donatısında da kullanılmıştır. Tamamı denge altı kesit olacak şekilde tasarlanan ve imal edilen betonarme kiriş numunelerinde eğilme etkisi altındaki davranış üzerinde çekme donatısı mekanik özellikleri son derece önemli ve belirleyicidir. “MATERYAL ve YÖNTEM” bölümünde açıklandığı şekilde; Ø14 çelik çubuklar için elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.18’de sunulmaktadır.



Şekil 4.18. Ø14 nervürlü çelik çubukların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Ø14 çelik çubuk eksenel çekme deneyleri sonucunda elde edilen akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri toplu halde Çizelge 4.22’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.22. Ø14 nervürlü çelik çubuklara ait eksenel çekme deneyi sonuçları

Numune	Dayanım (MPa)			Kopma Uzaması (%)	Maksimum Yükteki Uzama (%)	Çekme Dayanımı / Akma Dayanımı	Deneysel Akma Dayanımı / Karakteristik Akma Dayanımı
	Karakteristik Akma	Deneysel Akma	Deneysel Çekme				
Ø14-1-1	420	497,2	605,1	18,2	16,1	1,22	1,18
Ø14-1-2	420	497,9	601,5	20,1	17,3	1,21	1,19
Ø14-2-1	420	515,9	621,6	17,9	15,4	1,20	1,23
Ø14-2-2	420	513,0	615,3	18,7	16,2	1,20	1,22
Ø14-3-1	420	492,4	597,9	17,7	16,0	1,21	1,17
Ø14-3-2	420	501,0	608,3	19,4	17,2	1,21	1,19
Ø14-4-1	420	511,6	626,1	20,3	17,8	1,22	1,22
Ø14-4-2	420	505,9	618,2	17,5	16,3	1,22	1,20
Ø14-5-1	420	567,0	648,2	20,5	16,7	1,14	1,35
Ø14-5-2	420	548,1	649,0	20,4	17,3	1,18	1,31
Ø14-6-1	420	532,8	628,0	18,4	16,1	1,18	1,27
Ø14-6-2	420	533,2	627,2	17,6	15,6	1,18	1,27
Minimum:		492,4	597,9	17,5	15,4	1,14	1,17
Maksimum:		567,0	649,0	20,5	17,8	1,22	1,35
Ortalama:		518,0	620,5	18,9	16,5	1,20	1,23
Standart Sapma:		21,9	15,8	1,1	0,7	0,02	0,05
Değişim Katsayısı (%):		4,2	2,5	5,8	4,2	1,67	4,07

Ø8, Ø12 ve Ø14 nervürlü donatı çubuklarının fiziksel inceleme ve eksenel çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar incelenerek imalat işaretleri ile beyan edilmiş olan donatı sınıflarının doğrulama işlemleri yapılmıştır. Bu aşamada Şekil 4.15’te sunulan

nervür geometrileri ile Şekil 4.15'te sunulan çelik donatı mekanik özellikleri birlikte değerlendirilmiştir.

Çelik çubuklar üzerindeki imalat işaretlerinden hareketle Ø14 çelik donatının B 420C, Ø12 ve Ø8 çelik donatıların S420 sınıfında imal edildiği anlaşılmaktadır. TS 708 (2016) uyarınca çelik donatı sınıfı tayininde kullanılacak ve deneysel olarak elde edilen mekanik davranış parametreleri minimum akma dayanımı, minimum çekme dayanımı, çekme dayanımı/akma dayanımı oranının minimum değeri, deneysel akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranının maksimum değeri, minimum kopma uzaması ve en büyük yükteki % uzamanın maksimum değeridir. Tüm donatı grupları için belirtilen parametreler hesaplanmış ve her bir donatı grubu için (yukarıda) tablolar halinde sunulmuştur.

TS 708 (2016) standardı incelendiğinde nervürlü donatı imalatında çelik çubuk üzerine yapılan işaretlemeler dikkate alındığında Ø14 nervürlü donatı B S420C sınıfına ait olduğu. Ø12 ve Ø8 nervürlü donatıların ise S420 sınıfına ait olduğu gözlenmiştir. Ayrıca TS 708 (2016) uyarınca nervürlü donatı çubuklarının sağlaması gereken mekanik özellikleri incelendiğinde Ø14 nervürlü donatı B S420C sınıfına ait olduğu. Ø12 nervürlü donatının S420 ve Ø8 nervürlü donatıların ise B S420B sınıfına ait olduğu sonucuna varılmıştır. Ø8 nervürlü donatının imalat işareti ile S420 çeliği olduğunun beyan edilmesine rağmen. TS 708 (2016) uyarınca nervürlü donatı çubuklarının sağlaması gereken mekanik özellikleri B S420B sınıfına dahil olduğu sonucuna varılmıştır.

TS 708 (2016) ek olarak, TBDY (2018) donatı çeliklerinin sınıflandırılmalarıyla ilgili özet bir tabloya yer vermiş S420 ve B420C sınıfı donatı çeliklerinin her ikisi içinde minimum akma dayanımının 420 MPa kopma uzamasının %8 ve çekme dayanımı/akma dayanımı oranının 1,15-1,35 değerleri arasında olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu sınır değerler üzerinden yapılan değerlendirmede de TS 708 (2016) üzerinden yapılan sınıflandırmaların geçerli olduğu sonucuna varılmıştır.

Saha uygulamasında şantiyeye getirilen çelik donatılar kullanılmadan önce bağımsız bir laboratuvar da çekme deneyleri gerçekleştirilerek ilgili standart ve yönetmeliklere uygunluklarının tespit edilmesi şarttır. Tez çalışması kapsamında da bu

yöntem takip edilmiş ve S240 sınıfı çelik donatı olduğu netleştirildikten sonra imalata alınmıştır.

Çelik donatılar üzerinde yapılan mekanik incelemeler sonucunda tüm donatı sınıfları için laboratuvar ortamında bekletilen numune sonuçlarının teorik hesaplarda kullanılmasına karar verilmiş ve bu değerler toplu halde Çizelge 4.23'te sunulmuştur.

Çizelge 4.23. Teorik hesaplarda kullanılmasına karar verilen çelik donatı mekanik özellikleri.

	Ø8			Ø12			Ø14		
	Dayanım (MPa)		K.U.* (%)	Dayanım (MPa)		K.U. (%)	Dayanım (MPa)		K.U. (%)
	Akma	Çekme		Akma	Çekme		Akma	Çekme	
Minimum:	561	682	15	492	598	18	492	598	18
Maksimum:	614	728	21	567	649	21	567	649	21
Ortalama:	590	705	17	522	621	19	518	621	19
Standart Sapma:	17,3	13,6	1,9	23,6	15,8	1,1	21,9	15,8	1,1
Değişim Katsayısı (%):	2,9	1,9	11,3	4,5	2,6	5,9	4,2	2,5	5,8

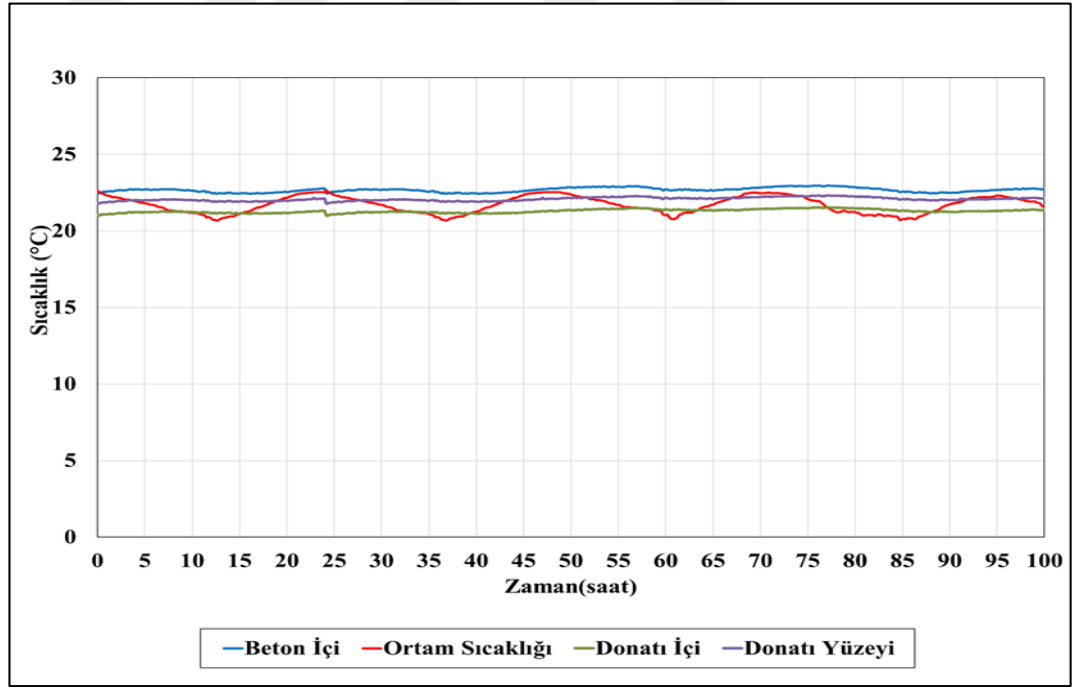
*K.U.: Kopma Uzaması.

4.3. Betonarme Kiriş Numunelerinin Termal Genleşme Katsayılarının Belirlenmesi Üzerine DeneySEL Çalışma Sonuçları

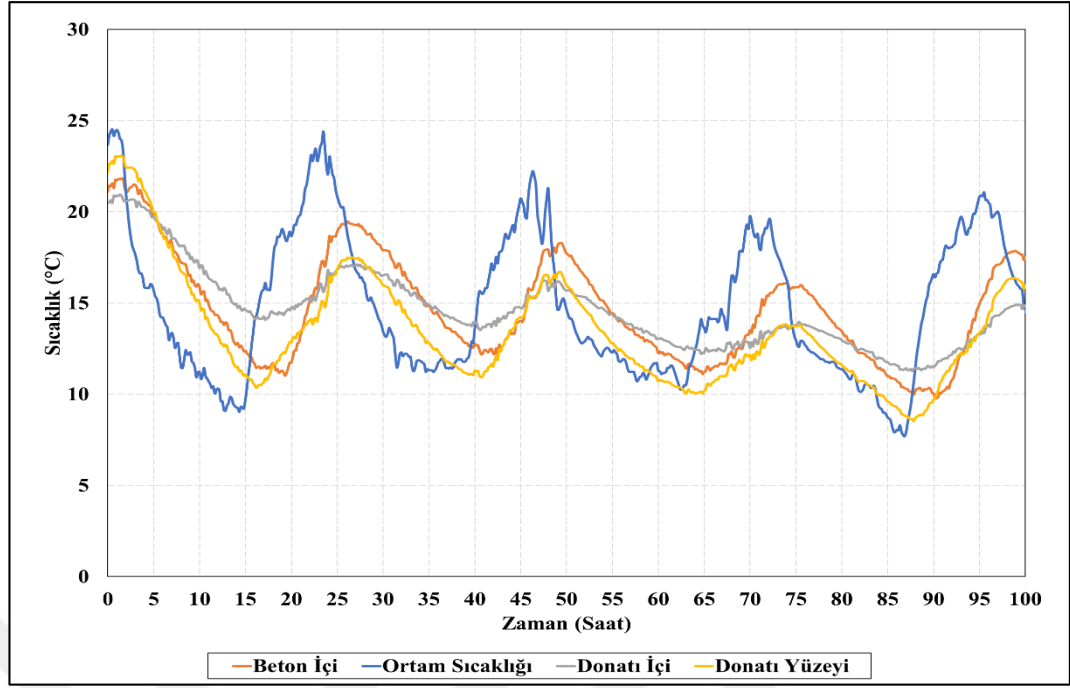
Bu tez çalışmasının temel amacı sabit sıcaklığa sahip laboratuvar koşullarında betonarme yapı elemanlarının malzeme mekanik özelliklerinin belirlenerek atmosfere açık alanda (coğrafi noktalara göre yaz ayları da dahil gece-gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde dahil) şantiye imalatının yapılması olmuştur. Bu kapsamda Erzurum ilinde yaz aylarında gece-gündüz sıcaklık farkının yüksek olması ve tez çalışması için gerekli şartların proje ile sağlanmış olması bu konuda çalışma imkânı sunmuştur. İmalatı yapılan betonarme kiriş numunelerinde termal etkilerin incelenmesi ve irdelenebilmesi amacıyla termal genleşme katsayısı ulusal bir norm olan ve betonarme bir yapının tasarım aşamasında gerekli mevzuatları içeren TS 500 (2000) standartında beton mekanik özellikleri içerisinde ortalama $\alpha=1 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ olarak belirtilmiştir. Johnson and Parsons (1944), yaptıkları çalışmada 137 farklı özellikte ki agrega ile hazırladıkları beton numuneleri üzerinde -20°C ile $+60^{\circ}\text{C}$ arasında termal genleşme etkilerini

incelemişlerdir ve deneyler sonucu termal genleşme katsayılarının $0,98 \times 10^{-6}$ - $13,8 \times 10^{-6}$ $1/^{\circ}\text{C}$ aralığında kaldığını belirtmişlerdir.

Kiriş imalatı üzerinden ortalama 28 gün geçtikten sonra mekanik deneylerin yapılması planlanmış olsa da; teknik sorunlar nedeniyle bu deneyler için bir süre beklenmek zorunda kalınmıştır. Bu süre zarfında, K3 kesitli kirişlere bağlı olan K tipi termokupl sıcaklık takibi ve potansiyometrik cetvel yardımıyla kiriş uç kısımlarından deformasyon ölçümü alınmıştır. Çalışma başlangıcında planlanmamış olan bu çalışma özellikle dış ortamda bekletilen betonarme kirişlerin termal genleşme katsayısının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yapılan sıcaklık takibi grafikleri sırasıyla laboratuvar ve atmosferik hava koşullarında bekletilen kirişler için Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sunulmaktadır.



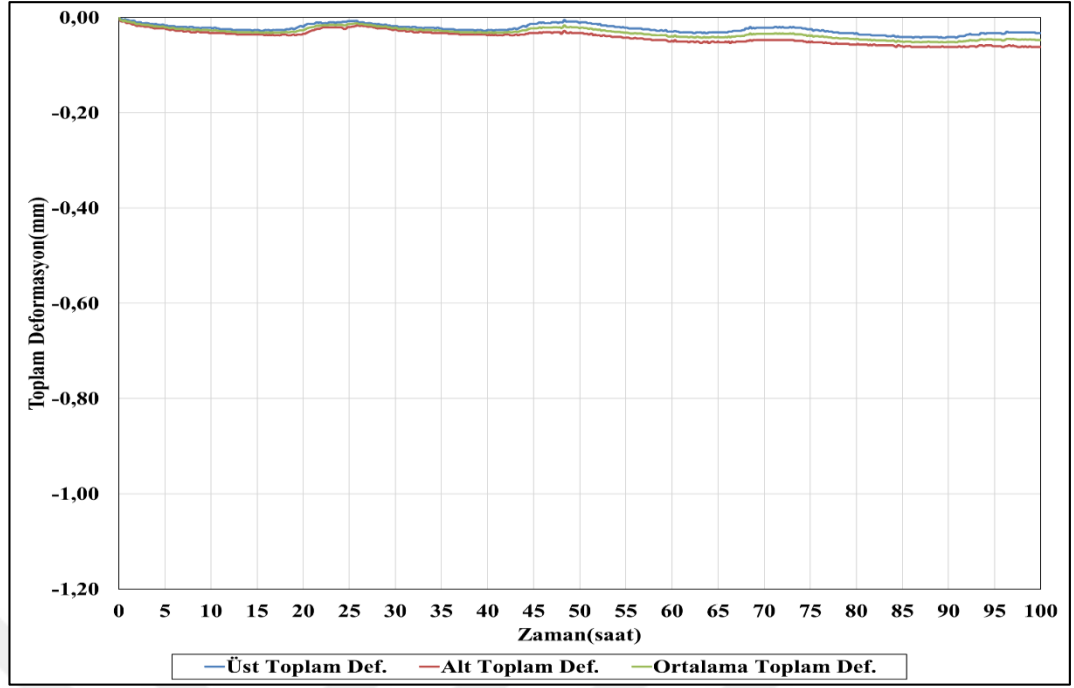
Şekil 4.19. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-zaman grafikleri.



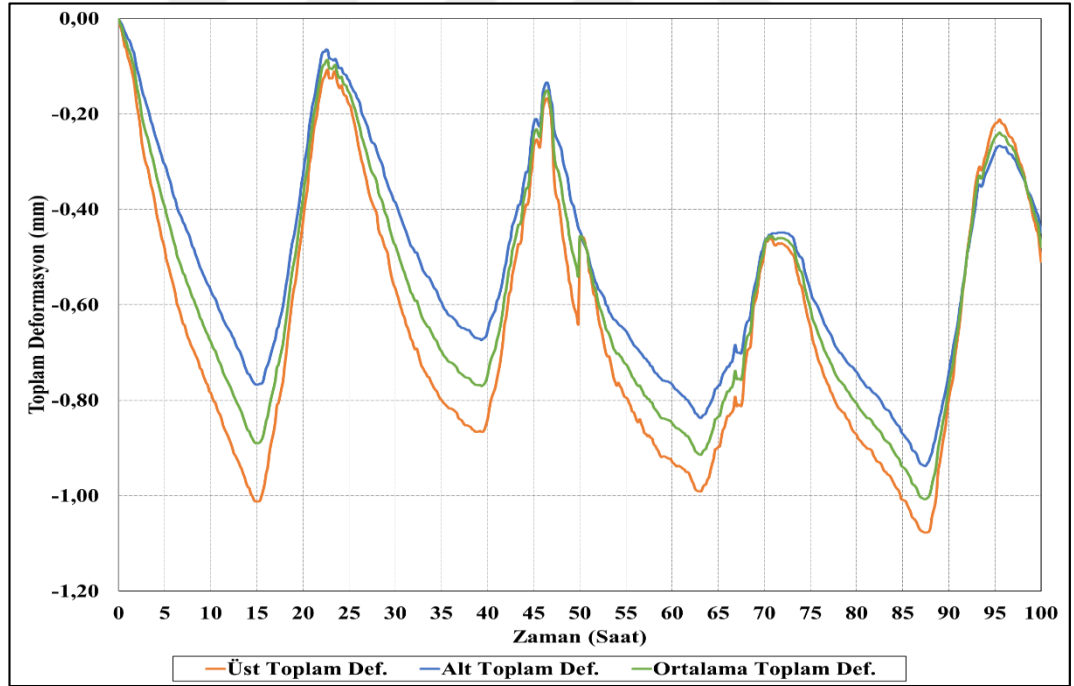
Şekil 4.20. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-zaman grafikleri.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 beraber incelendiğinde, laboratuvar koşullarında imalatı gerçekleştirilen ve deney gününe kadar bulunduğu ortamda bekletilen betonarme kiriş numuneleri sabit sıcaklık koşullarında kaldığı gün boyunca sıcaklık farkının en fazla 1,22 °C olduğu, atmosfere açık koşullarda ise beklenildiği üzere gece-gündüz sıcaklık farkının olduğu, bu farkın en yüksek 13,94 °C ve en düşük sıcaklık farkının ise 8,29 °C olduğu belirlenmiştir.

Sıcaklık kayıtlarıyla eş zamanlı olarak potansiyometrik cetvel yardımıyla deformasyon ölçümleri alınmıştır. Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinden alınan deformasyon veri kullanılarak çizdirilen deformasyon-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de sunulmaktadır.



Şekil 4.21. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon-zaman grafikleri.

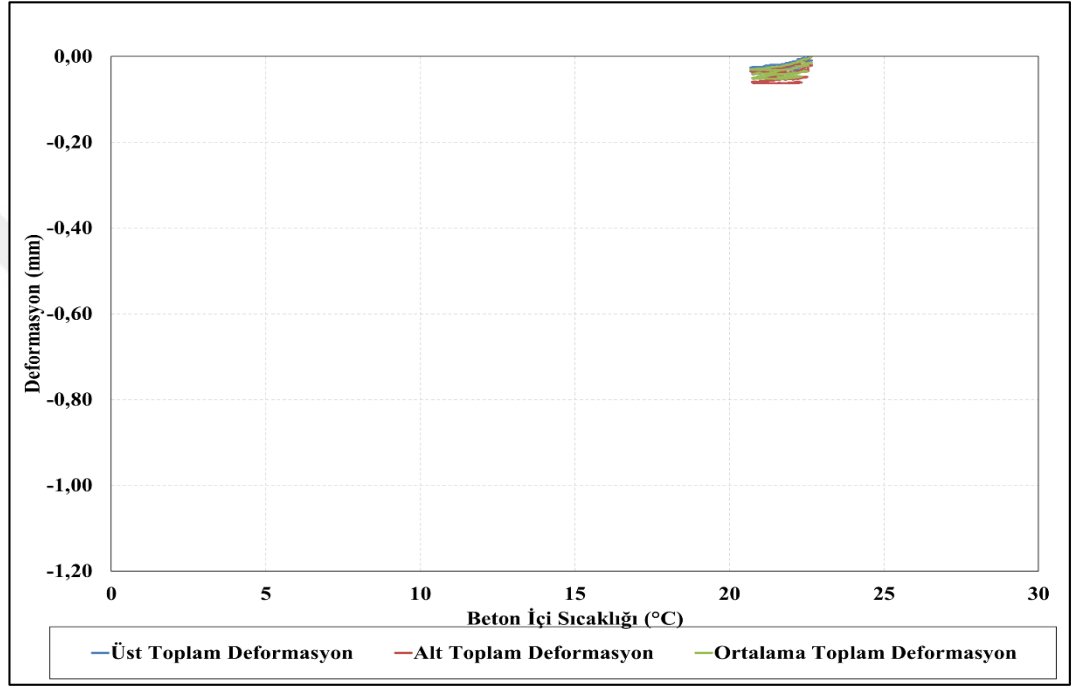


Şekil 4.22. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon-zaman grafikleri.

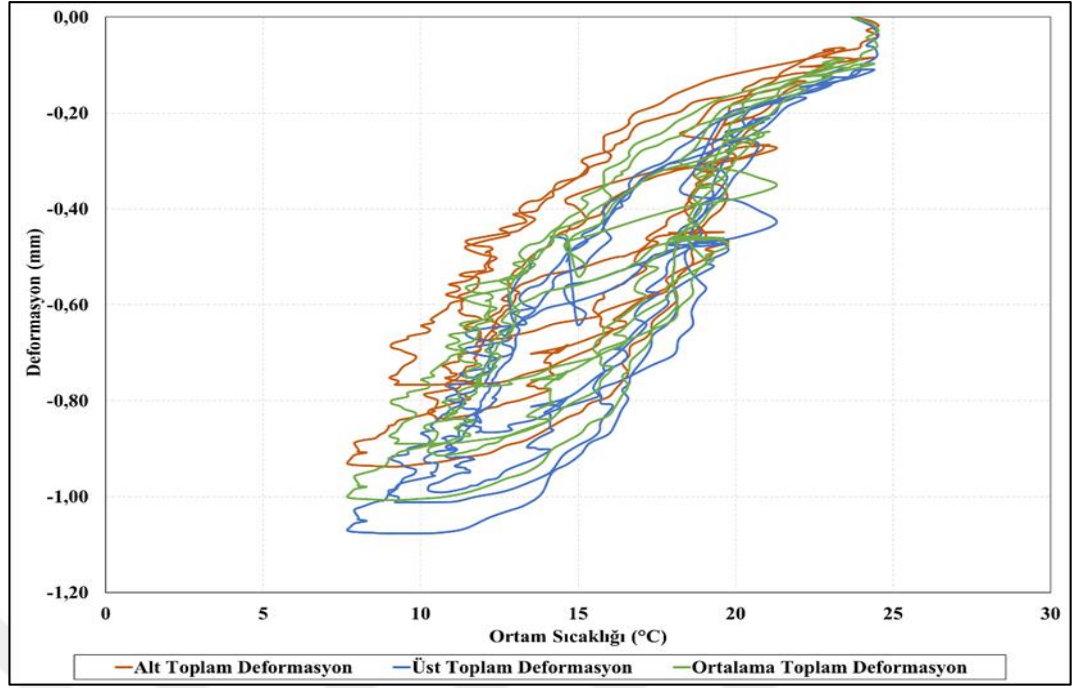
Şekil 4.21 incelendiğinde maksimum deformasyonun 0,06 mm olarak ölçüldüğü, esasen deformasyon ölçülmediği ifade edilebilir. Şekil 4.22 incelendiğinde ise kiriş deformasyonunun maksimum 1,07 mm, minimum 0,07 mm olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumda, laboratuvar ortamında beklendiği şekilde sıcaklık farkı

oluşmadığından anlamlı bir deformasyon ölçümü alınamamıştır. Ölçülen deformasyonlar son derece küçük değerler olmuştur.

Sıcaklık ve deformasyon ölçümleri arasındaki ilişkinin anlaşılması için laboratuvar ve atmosfere açık ortamda yapılan betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-deformasyon grafikleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te sırasıyla çizdirilmiştir.



Şekil 4.23. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-deformasyon grafikleri.



Şekil 4.24. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sıcaklık-deformasyon grafikleri.

Şekil 4.23, laboratuvar ortamında bekletilen kiriş numunesi için ölçülen veriyi temsil etmektedir. Görüldüğü üzere anlamlı bir sıcaklık farkı oluşmadığından (sabit sıcaklık) ölçülen kiriş boyuna deformasyonları da neredeyse sıfır mertebesinde olmuştur.

Şekil 4.24’ te atmosferik hava koşullarında bekletilen kirişe ait sıcaklık-deformasyon grafikleri incelendiğinde sıcaklık düşüşüyle kısalmaya, sıcaklık artışıyla uzama ölçüldüğü görülmektedir. Ayrıca atmosfer açık koşullarda sıcaklık farkının yüksek olması kiriş numunelerinin kendi sıcaklığını koruyamadıkları, Şekil 4.20 ile beraber incelendiğinde laboratuvar koşullarında bekletilen kiriş numunelerinin ise ortam sıcaklığının neredeyse aynı olduğundan ufak sıcaklık düşüşleri de dahil beton hidratasyon sürecinin devam ettiğini gösterir şekilde kendi sıcaklığını koruduğu anlaşılmaktadır.

Sıcaklık ve deformasyon ölçümleri kullanılarak betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla, sıcaklığa bağlı boy değişimleri Denklem 4.7 ve Denklem 4.8 kullanılarak genleşme katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda betonarme kiriş numunelerinin uç kısımlarının üst ve alt kısımlarından alınan deformasyon ölçümlerinin ortalamaları alınarak yapılmıştır.

$$\epsilon_T = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (4.7)$$

$$\epsilon_T = \alpha \times \Delta T \quad (4.8)$$

Burada;

ϵ_T : Birim şekil değiştirme

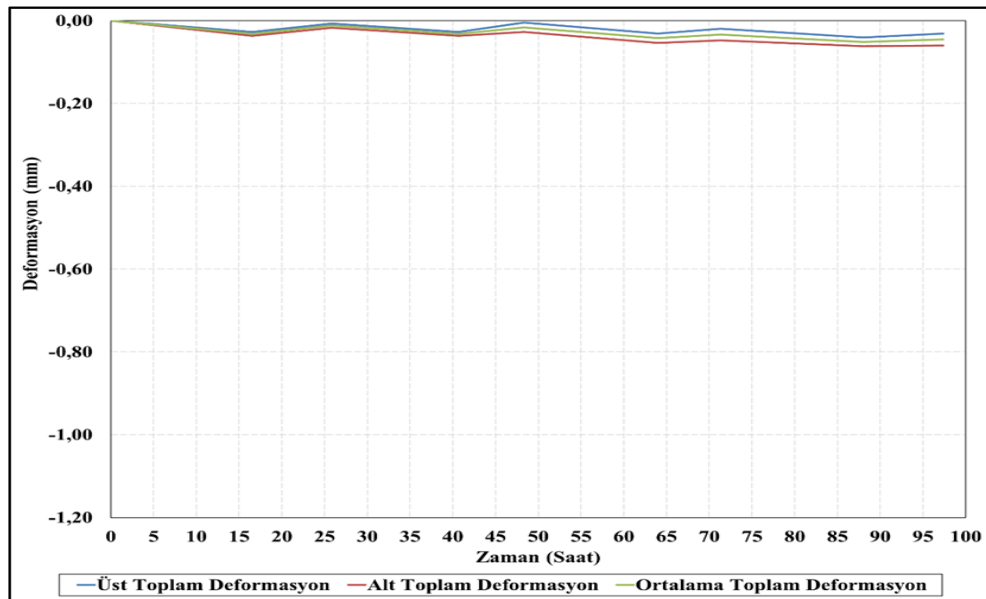
ΔL : Kiriş numunesindeki boy değişimi

L_i : Kiriş numunesinin ilk boyu

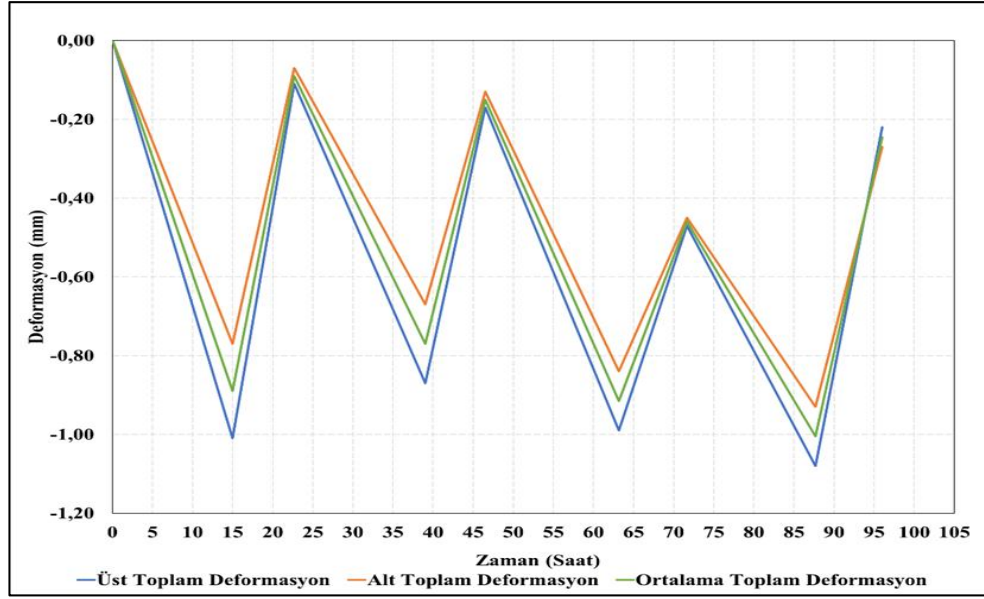
ΔT : Sıcaklık değişimi

α : Termal genleşme katsayısıdır.

Termal genleşme katsayısı hesaplamaları yapılırken ortalama toplam deformasyon-zaman grafiğinde pik noktalar seçilmiş ve bu noktalarda zaman, sıcaklık, üst toplam deformasyon, alt toplam deformasyon, ortalama toplam deformasyon değerleri tüm veri seti içerisinde alınmış ve sadece pik değerlerin olduğu daha basit şekilde anlaşılabilir olması amacıyla laboratuvar ve atmosfere açık koşullar için çizdirilen deformasyon-zaman grafikleri sırası ile Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.25. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon pik noktalarından elde edilen deformasyon-zaman grafikleri.



Şekil 4.26. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin deformasyon pik noktalarından elde edilen deformasyon-zaman grafikleri.

Deformasyon-zaman grafiklerinde pik noktalardan elde edilen veriler ile Denklem 4.7 ve Denklem 4.8 kullanılarak genleşme katsayıları her pik aralığı için hesaplatılarak bu değerlerin ortalaması değerlendirilmiştir. Laboratuvar ve atmosfere açık koşullar için yapılan hesaplamalara ait sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25'te sunulmuştur. Çizelge üzerinde açık mavi renk dolgu ile soğuma aşamasını, turuncu renk dolgu ile ısınma aşamasını belirtmektedir.

Çizelge 4.24. Laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayıları.

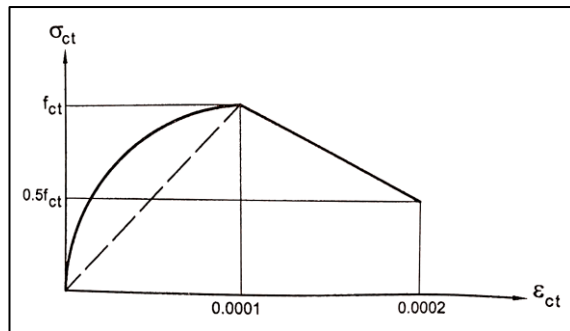
Zaman (Saat)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Toplam Deformasyon (mm)	ΔT (°C)	ΔL (mm)	L_i (mm)	ϵ_T (mm/mm)	α (1/°C)
0,00	22,66	0,00	-	-	4.500,00	-	-
16,50	21,44	-0,03	-1,22	-0,03	4.499,97	-0,0000071	5,8E-06
25,83	22,20	-0,01	0,76	0,02	4.499,99	0,0000044	5,8E-06
40,67	21,44	-0,03	-0,76	-0,02	4.499,97	-0,0000044	5,8E-06
48,33	22,54	-0,02	1,10	0,02	4.499,98	0,0000035	3,2E-06
64,00	21,56	-0,04	-0,98	-0,03	4.499,96	-0,0000058	5,9E-06
71,33	22,48	-0,03	0,92	0,01	4.499,97	0,0000020	2,2E-06
88,00	21,23	-0,05	-1,25	-0,02	4.499,95	-0,0000040	3,2E-06
97,33	22,08	-0,05	0,85	0,01	4.499,95	0,0000013	1,5E-06
Ortalama							4,2E-06

Çizelge 4.25. Atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayıları.

Zaman (Saat)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Toplam Deformasyon (mm)	ΔT (°C)	ΔL (mm)	L_i (mm)	ϵ_T (mm/mm)	α (1/°C)
0,00	23,67	0,00	-	-	4.500,00	-	-
15,00	9,69	-0,89	-13,98	-0,89	4.499,11	-0,00020	1,4E-05
22,67	23,45	-0,09	13,76	0,80	4.499,91	0,00018	1,3E-05
39,00	11,80	-0,77	-11,65	-0,68	4.499,23	-0,00015	1,3E-05
46,50	21,93	-0,15	10,13	0,62	4.499,85	0,00014	1,4E-05
63,17	10,82	-0,92	-11,11	-0,77	4.499,09	-0,00017	1,5E-05
71,67	19,11	-0,46	8,29	0,46	4.499,54	0,00010	1,2E-05
87,67	9,96	-1,01	-9,15	-0,55	4.499,00	-0,00012	1,3E-05
96,00	20,49	-0,25	10,53	0,76	4.499,76	0,00017	1,6E-05
Ortalama							1,4E-05

Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25 beraber incelendiğinde laboratuvar ortamında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin termal genleşme katsayısı $4,2 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kiriş numunelerinin ise $1,4 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Her iki grup betonarme kiriş numunesinin de hem TS 500 (2000) hem de Johnson and Parsons (1944) çalışmasının vermiş olduğu termal genleşme katsayısı aralığında kaldığı belirlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı deformasyon ölçümlerinden termal genleşme katsayılarının hesabı yapılırken hesaplanan birim şekil değiştirme miktarları Şekil 4.27’de Ersoy ve Özcebe (2017) kaynağında beton çekme davranışı için idealize edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde çekme etkisi altında f_{ct} karşılık gelen birim uzama ϵ_{ct} değeri ile kıyaslanmak suretiyle betonarme kiriş numunelerinde termal etkiler nedeniyle kılcal çatlakların oluşup oluşmadığı irdelenmiştir.

**Şekil 4.27.** Betonda için çekme σ - ϵ modeli (Ersoy ve Özcebe 2017)

Şekil 4.27' de verilen beton çekme etkisi altındaki davranış grafiği ile Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26 beraber incelendiğinde beton çekme etkisinde f_{ct} ulaştığı andaki $\epsilon_{ct}=0,0001$ değerinde olduğu; laboratuvar koşullarında imal edilen kiriş numunesinde hesaplanan termal birim uzama değerlerinin bu değerin altında kaldığı ve numunelerde herhangi bir kılcal çatlğa rastlanmayacağı varsayımı yapılamaktadır.

Ancak atmosferik hava koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinde hesaplanan termal şekil değiştirme değerlerinin 0,0001 değerinin üstünde olduğu hatta bazı pik noktalarda $\epsilon_{cu}=0,0002$ değerine oldukça yakın değerler ulaştığı belirlenmiş ve kiriş numunesinde iç yapısında kılcal çatlaklar oluşma ihtimalinin olduğu sonucu değerlendirilmiştir.

4.4. Kiriş Yükleme Deneyi Sonuçları

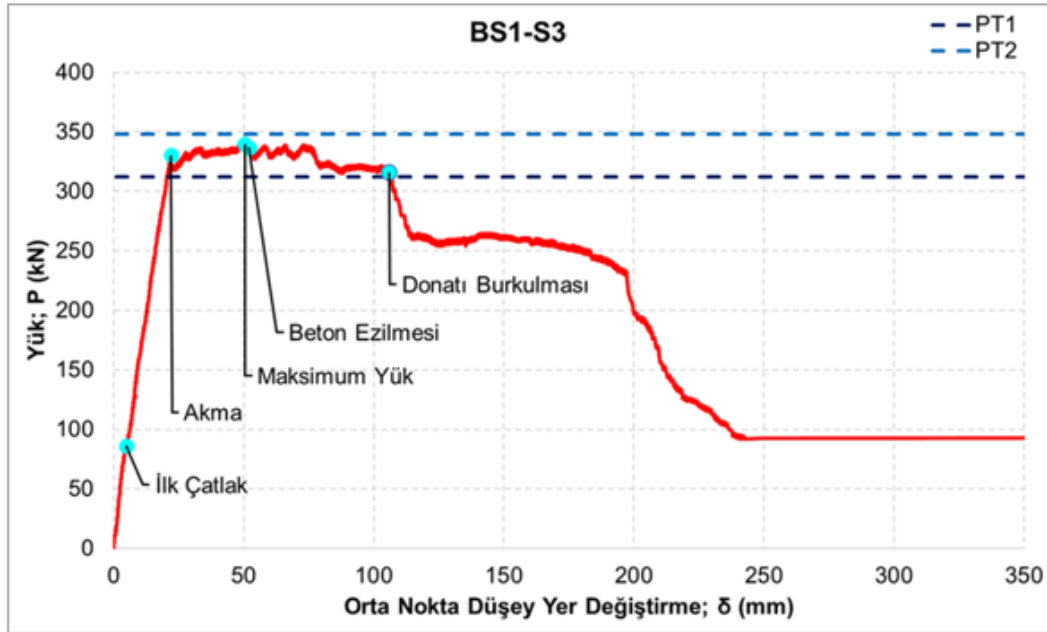
Tez çalışması kapsamında yazın laboratuvar ve atmosfere açık ortamlarda imalatı gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kiriş numunelerinin dört noktalı eğilme deneyleri sonucunda;

1. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafiklerinin oluşturulması
2. Moment-Eğrilik grafiklerinin çıkarılması
3. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafikleri üzerinden başlangıç rijitliklerinin hesaplanması
4. Yük-Orta nokta yer değiştirme grafiği üzerinden (normalizasyon işlemi yapılarak) süneklik ve enerji sönümleme miktarlarının hesaplanması
5. Moment-Eğrilik grafikleri üzerinden süneklik (maksimum eğrilik değeri/akma eğriliği) değerlerinin hesaplanması

amacıyla çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

4.4.1. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri

Tez çalışması kapsamında toplam 6 adet tam ölçekli betonarme kiriş numuneleri üzerinde 4 noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney süresince alınan notlar ve görsel materyal, yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği çatlak deseni çizimleri ile birlikte rapor haline getirilmiş ve her bir deney için kapsamlı raporlama çalışması yapılmıştır. Oldukça geniş hacimli bir metin olan bu çalışmaya, rapor bütünlüğünün bozulmaması amacıyla, EK-2 bölümünde ayrıca yer verilmiştir. Deney hikâyeleri olarak isimlendirilen bu raporda her bir kiriş için yük-orta düşey yer değiştirme grafiği üzerinde deneysel gözlemler işaretlenmiştir. Bu çalışmanın bir örneği Şekil 4.29’da sunulmaktadır. İlk olarak Şekil 4.28’de örnek olarak sunulan grafik üzerinde deneysel çalışma öncesi karakteristik malzeme dayanımları üzerinden TS 500 (2000)’de detayları sunulan “Taşıma Gücü Yöntemi” kullanılarak moment taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan moment taşıma kapasiteleri ve kirişin yükleme durumu dikkate alınarak, hesaplanan moment taşıma kapasitesine karşılık gelen düşey noktasal yük değeri hesaplanarak PT1 çizgisi ile gösterilmiştir. Ayrıca, her deney öncesi deneysel olarak belirlenen eksenel basınç dayanımı ile çekme donatısı mekanik özellikleri kullanılarak ikinci bir teorik yük kapasitesi hesaplanmış ve PT2 çizgisi ile gösterilmiştir.



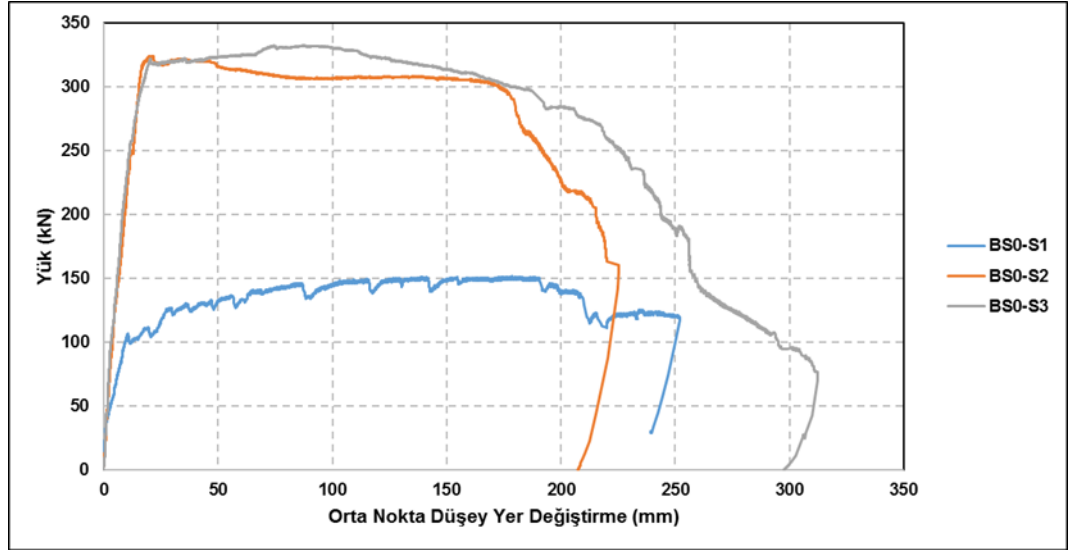
Şekil 4.28. BS1-S3 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

Tez çalışmasını destekleyen proje öneri metinde K1, K2 ve K3 kesitli betonarme kiriş numunelerinin tamamı TS 500 (2000) ve TBDY (2018)'e uygun olarak C30-S420 malzeme çifti için denge altı kesit olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney günü imalatla kullanılan malzemelerden örnek alınan beton numuneler üzerinde eksenel basınç deneyleri ve boyuna donatılardan ise eksenel çekme deneyleri ile malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu yöntem ile bütün betonarme kiriş numuneler için beton-çelik malzeme çifti için dengeli donatı oranı hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde deneye tabi tutulan betonarme kiriş numunelerinin denge altı kiriş oldukları belirlenmiş; deneysel davranış ve göçme mekanizmaları da tüm kirişlerde önce boyuna donatının aktığı sonrasında basınç bölgesindeki betonun ezildiği çekme göçmesi olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Proje öneri metni hazırlanırken yapılan teorik kapasite hesaplarında; K1, K2 ve K3 kesitli kiriş için Taşıma Gücü Yöntemi uyarınca karakteristik malzeme dayanımları kullanılarak el hesabıyla belirlenen akma yükleri sırasıyla 107,5 kN, 304,7 kN ve 312,5 kN olmuştur. Her deney verisi öncelikle bu değerler üzerinden incelenmiştir. Her kiriş için kapsamlı hesaplama ve değerlendirme EK-2 raporunda sunulmaktadır.

BS0 Grubu Betonarme Kiriş Numuneleri Yük-Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme Grafikleri

K1, K2 ve K3 kesitli olmak üzere 3 adet, laboratuvar ve atmosfere açık koşullar olacak şekilde 2 set imalat yapılmıştır. Laboratuvar (BS0) ve atmosfere açık (BS1) şartlarında imalatı yapılan betonarme kiriş numuneleri beton dökümleri gerçekleştirildikten sonra döküm koşullarında 28 gün boyunca bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında sabit sıcaklıkta imalatı yapılan BS0 grubu kiriş numunelerine ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri toplu halde Şekil 4.29'da sunulmaktadır.

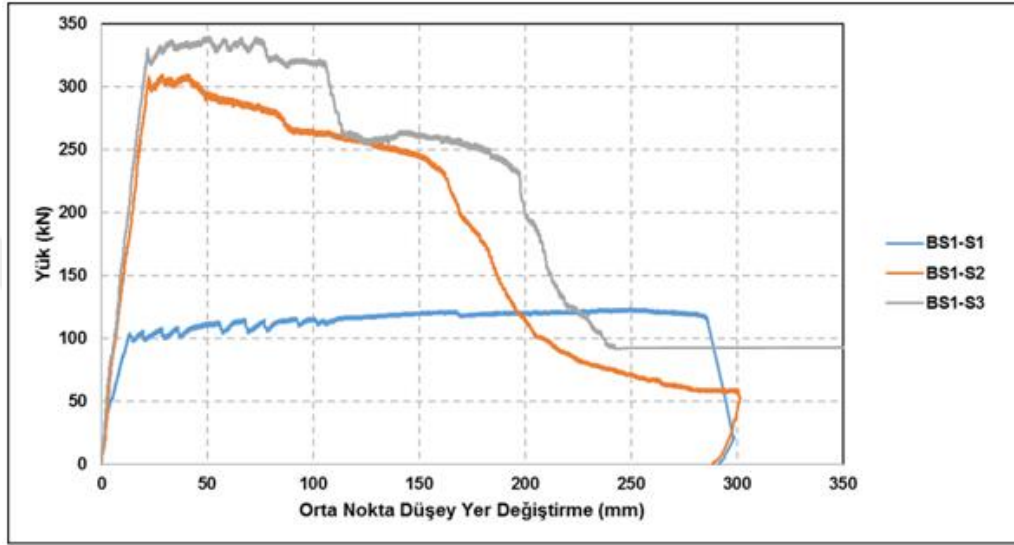


Şekil 4.29. BS0 grubu kirişlere ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.29 incelendiğinde, tüm kiriş numunelerin hesaplanan teorik akma yüküne uygun yük değerlerinde aktıkları ve bu bakımdan dolayı deneylerin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır. K2 ve K3 kesitli kiriş numunelerin çekme donatıları aynı olup, aralarında farkın basınç bölgesinde çelik donatı miktarıdır. Ersoy et al. (2003) ve benzer birçok çalışmada basınç bölgesindeki donatının kesitin moment taşıma kapasitesinden fazla kesitin sünekliğine katkı sağladığı ifade edilmektedir. Bu konu üzerine tüm kiriş numuneleri için yapılan süneklik hesaplamaları ile irdelenmiştir ve “ARAŞTIRMA TARTIŞMALARI ve BULGULAR” başlığı içinde takip eden bölümlerde ayrıca ele alınacaktır. Bu konuda üzerinde durulacak olursa Şekil 4.29’da sunulan grafik incelendiğinde K2 ve K3 kesitli kiriş numunelerinin deneylerinde, K3 kesitli (4Ø14 basınç donatısı) kirişin çekme donatısı aktıktan sonra yükte ani bir düşüşün olmadığı, bununla birlikte K2 kesitli kirişe göre daha sünek bir davranış sergilemiş olmasıdır. K2 ve K3 kesitli kiriş numuneleri beraber incelendiğinde; akma anındaki yüklerinin hemen hemen aynı olduğu, ancak basınç donatısı bulunan K3 kesitli kiriş numunesi akma noktasından sonra moment taşıma kapasitesinde bir miktar artış olduğu görülmektedir.

BS1 Grubu Betonarme Kiriş Numuneleri Yük-Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme Grafikleri

Tez çalışmasını destekleyen projenin kış imalatlarına referans olacak yaz döküm atmosfere açık koşullardaki imalatların deney sonu elde edilen yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri Şekil 4.30'da sunulmaktadır.

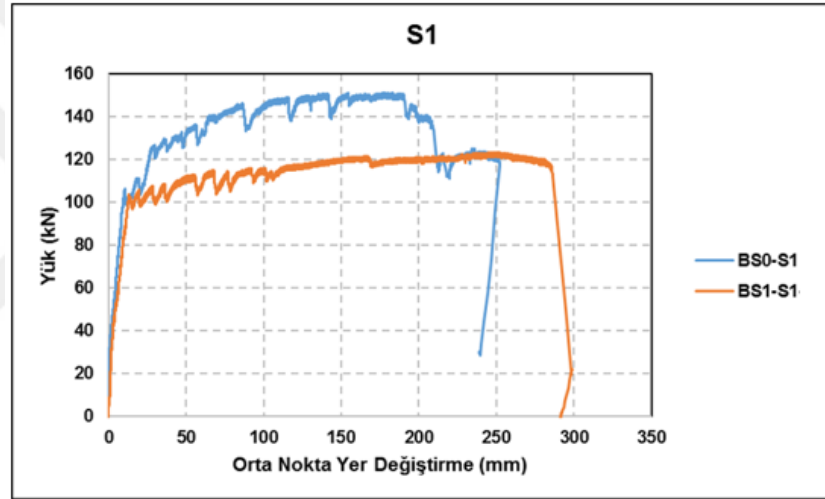


Şekil 4.30. BS1 grubu kirişlere ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri

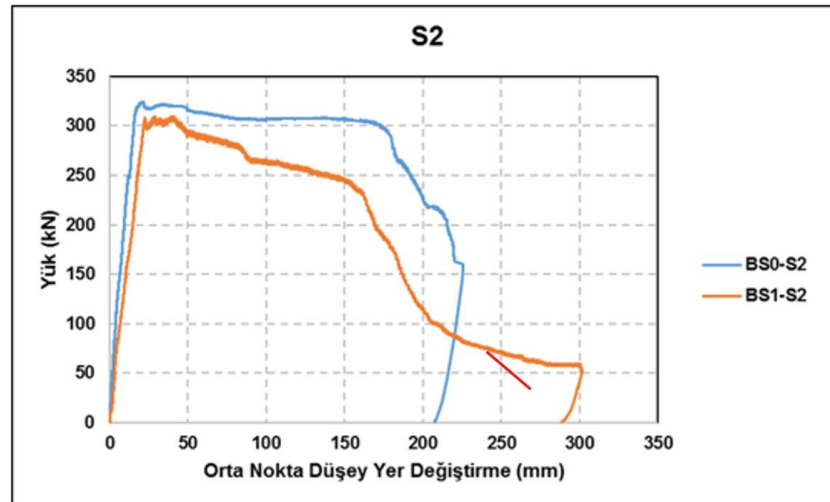
Şekil 4.30 incelendiğinde, tüm kiriş numuneleri için hesaplanan teorik akma yükleriyle uyumlu değerlerde aktıkları ve sonrasında her kesit için beklenen davranışları gösterdikleri görülmektedir. K3 kesitli kiriş numunesi, K2 kesitli kiriş numunesine göre akma ve sonrasında bir miktar daha yüksek yük değerlerini taşıdıkları görülmektedir. Kiriş numunelerinin eğilme davranışında kullanılan boyuna donatıların önemli olduğu, ayrıca önceki bölümlerde verilen çelik donatı deneyleri göz önünde tutulduğunda, Ø14 boyuna donatı akma dayanımı 0,04 değişim katsayısıyla 492-567 MPa aralığında değer almıştır; ortalama donatı akma dayanımı ise 518 MPa olarak tayin edilmiş olması dikkate alındığında kirişlerin yük taşıma kapasiteleri numune içerisine denk gelen boyuna donatı çubuğu dayanımındaki değişikliği nedeni ile farklılık olabileceği düşünülmektedir. Bu durumdan, BS1 grubu kiriş numunelerinin yük taşıma kapasiteleri ve betonarme davranış bakımında beklenen sonuçları verdiği ve ana referans deney numuneleri olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

BS0 ve BS1 Grubu Betonarme Kiriş Numuneleri Yük-Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme Grafikleri

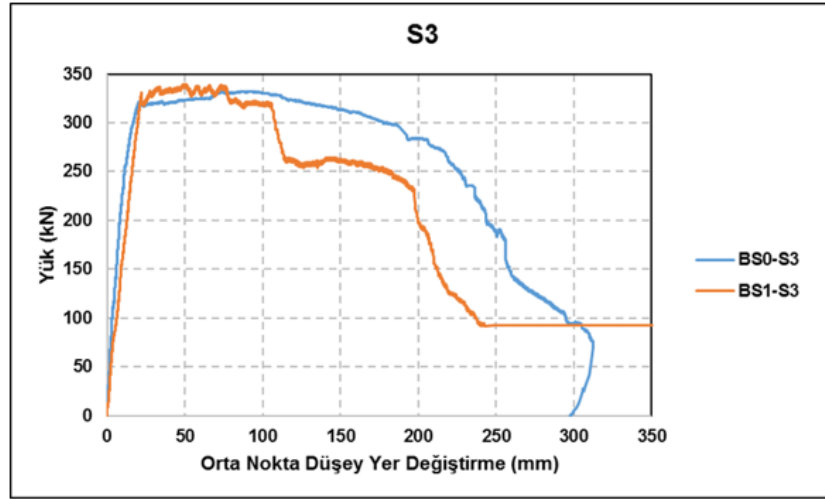
Tez çalışması kapsamında sabit ortam sıcaklığı ile değişken atmosferik sıcaklığa maruz bırakılan betonarme kiriş davranışının karşılaştırmalı olarak irdelenmesi amacıyla; birinci grup (BS0) sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında, ikinci grup gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek olduğu atmosfer açık şartlarda (BS1) imalatı yapılmış ve döküm şartlarında yeterli dayanımı alması beklenmiştir. Bu grupta ele alınan K1, K2 ve K3 kesitli kiriş numuneleri yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te sunulmaktadır.



Şekil 4.31. K1 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.32. K2 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.33. K3 kesitli BS0 ve BS1 yaz grubu kirişlerin yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri.

Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te sunulan grafikler incelendiğinde, sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında bekletilen yaz grubu kirişlerin atmosferik koşullarda bekletilen yaz grubu kirişlere nazaran akma noktasına kadar daha rijit davrandıkları görülmektedir. Ayrıca, özellikle K2 ve K3 kesitli kirişlerde akma yükünden sonra her iki grafiğin de devam ettiği noktaların tamamına kadar olan bölgelerde; BS0 grubu kirişlerin taradıkları alanın (enerji sönümleme kapasitesi) BS1 grubu kirişlere oranla daha fazla olduğu görülmektedir.

K1 kesitli BS0-S1 ve BS1-S1 kiriş davranışları Şekil 4.31 üzerinden incelendiğinde, her iki kirişin akma yükünün aynı olduğu ancak akma sonrası BS0-S1 kirişinin ~145 kN mertebesinde maksimum yüke çıktığı görülürken BS1-S1 kirişinin ~120 kN mertebesinde kaldığı görülmektedir ki; bu deney de çekme donatısı kopana kadar deney devam etmiştir. Donatının kopmuş olduğu grafik sonundaki sert ve dikey iniş rejiminden anlaşılabilmektedir. BS0-S1 kirişinin BS1-S1 kirişine referansla %21 oranında fazla maksimum yüke ulaşmış olmasının sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamına bağlanması mümkün değildir. BS0-S1 kirişinin çekme donatısı da deney sonunda kopmuştur. Bu durum çelik donatının çekme dayanımına kadar zorlandığı anlamına gelmektedir. Malzeme özelliklerinin takdim edildiği bölüm anımsanacak olursa, Ø14 boyuna donatının çekme dayanımının 598-649 MPa aralığında değer aldığı görülecektir. BS0-S1 kirişine yüksek dayanımlı çekme donatılarının tekabül etmiş olması nedeniyle maksimum yük taşıma değerinde artış olabileceği düşünülmektedir. Esasen bu durum, diğer tüm kiriş

grupları için de dikkate alınması gereken bir durumdur. Bununla birlikte, BS0-S1 kirişi deneyinde hatalı yük ölçümü ihtimali de dikkate alınmalıdır.

Yukarıda çok sayıda grafik eşliğinde, kiriş yükleme deneylerinden elde edilen yük-orta nokta düşey yer değiştirme davranışları sunulmuştur. EK-2’de sunulan kiriş hikâyelerinde ise her bir deneyin detaylı anlatımı yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde, her bir grup içerisinde, yük kapasitelerinde son derece az farklar olmakla birlikte davranışın benzer olduğu görülmektedir. Ancak, sadece bu durum üzerinden çalışmanın değerlendirilmesi hatalı olacaktır.

Tez çalışması kapsamında sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarında imalatı yapılan betonarme kiriş numunelerinin mekanik davranışlarının atmosferik koşullarda imalatı yapılan betonarme kiriş numunelerine kıyasla incelenmesi amaç edinilmiştir. Bu nedenle, deneysel veri üzerinden incelenmesi mümkün olan performans parametrelerinin sayısal değerleri üzerinde çalışma yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, moment taşıma kapasitesi, çatlama momenti, etkin kesit rijitliği çarpanı, kesit ve eleman süneklikleri, eleman rijitlikleri ve enerji sönmömleri gibi parametreler değerlendirilmiştir. Öncelikle moment taşıma kapasiteleri üzerinden değerlendirilmesi gerekli görülmüştür.

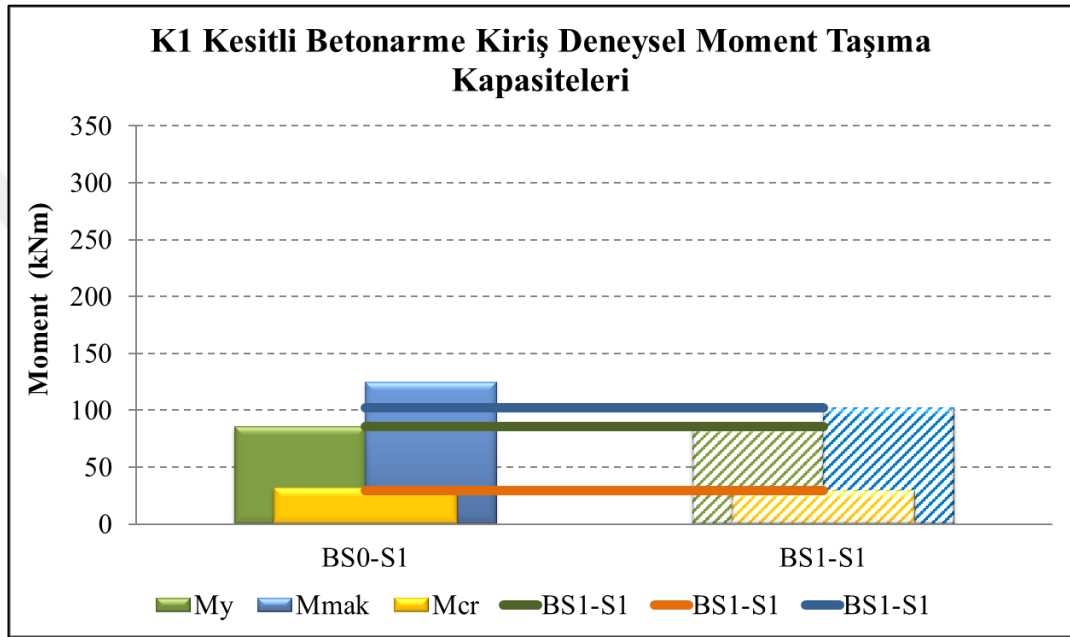
Çizelge 4.26’de K1 kesitli kirişlerin çatlama momenti, akma momenti ve maksimum moment taşıma kapasiteleri toplu halde, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çizelge 4.26 ve benzeri diğer tablolarda M_{cr} ; çatlama momenti, M_y ; akma momenti ve M_{maks} : maksimum taşıma momenti değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca, bu tablolarda sunulan eksenel basınç dayanımı değerleri ilgili numune ile aynı günde tahribatlı deney sonucu elde edilmiş eksenel basınç dayanımı değerleridir.

Çizelge 4.26. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Momenti (kN.m)			Oran		
		M_{cr}	M_y	M_{maks}	M_{cr}/M_y	M_{cr}/M_{crref}	M_y / M_{yref}
BS0-S1	32	31,4	85,1	124,9	0,25	1,1	1,0
BS1-S1	29	29,7	85,7	101,9	0,29	1,0	1,0

Ülkemizde TS 500 (2000) uyarınca Taşıma Gücü Yöntemi ilkeleri çerçevesinde yapılan betonarme tasarım ve analizde çelik malzemenin elasto-plastik davrandığının

kabul ediliyor olması teorik hesaplarda akma momenti değeri nın sınır değeri olarak değerlendirilmesini esas kılmaktadır. Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imalatı gerçekleştirilen iki grubun akma değeri nlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu ifade edilmesi mümkündür. Bu, tüm kiriş numunelerinin aynı bağ donatıdan imal edildiği ve moment taşıma kapasitesini boyuna donatı mekanik özelliklerinin büyük ölçüde belirlediği için beklenen bir davranıştır. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi şekil 4.34'te sunulmuştur.



şekil 4.34. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.

Çizelge 4.27'de K2 kesitli kirişlerin çatlama momenti, akma momenti ve maksimum moment taşıma kapasiteleri toplu halde, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

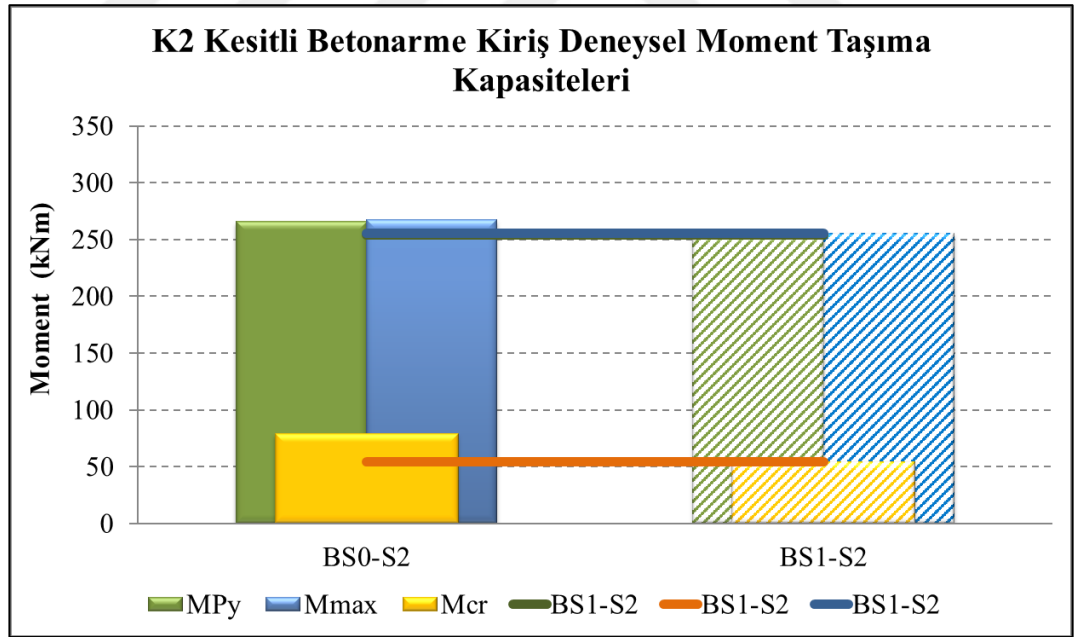
Çizelge 4.27. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Momenti (kN.m)			Oran		
		M_{cr}	M_y	M_{maks}	M_{cr}/M_y	M_{cr}/M_{crref}	M_y / M_{yref}
BS0-S2	32	79,0	265,5	267,5	0,30	1,4	1,0
BS1-S2	29	54,5	254,1	255,6	0,21	1,0	1,0

Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imalatı gerçekleştirilen iki grubun akma değeri nlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu ifade edilmesi mümkündür. Bu, tüm kiriş numunelerinin aynı bağ donatıdan imal edildiği için ve moment taşıma kapasitesini

boyuna donatı mekanik özelliklerinin büyük ölçüde belirlediği için beklenen bir davranıştır. Çizelge 4.27 ve benzeri diğer tablolarda kiriş çatlama momenti değerinin, yaz grubu referans numune değerine oranı sunulmuştur. Ancak, bu oranın hatalı yorumlanması mümkündür. Zira, çatlama momenti beton çekme dayanımı ile o da betonun eksenel basınç dayanımı ile ilgilidir. İncelenen betonarme kirişlerin eksenel basınç dayanımındaki farklılıkların akma momenti taşıma kapasiteleri üzerinde çok etkili olmadığı açıktır. Fakat çatlama momentlerinde durum farklıdır. Boyuna donatısı aynı olmakla birlikte; farklı basınç dayanımına sahip kirişlerin çatlama momentlerinin referans yaz grubu kiriş çatlama momentine kıyasla (ilave bir normalizasyon yapılmadan) incelenmesi hatalı yorumlara yol açabileceğinden; her kirişin çatlama momentinin akma momentine oranı da hesaplanmıştır ve tablolarda sunulmuştur. Çatlama momenti parametresi ilerleyen bölümlerde ele alınmaktadır.

K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi de Şekil 4.35'te sunulmaktadır.



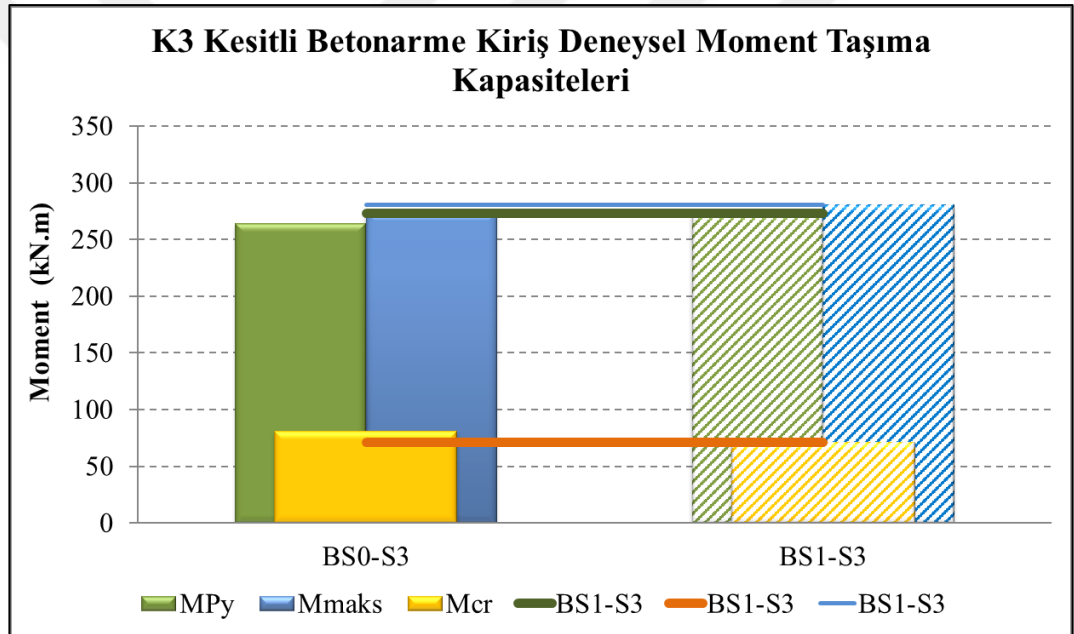
Şekil 4.35. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.

Çizelge 4.28'de K3 kesitli kirişlerin çatlama momenti, akma momenti ve maksimum moment taşıma kapasiteleri toplu halde, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.28. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasiteleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Momenti (kN.m)			Oran		
		M_{cr}	M_y	M_{maks}	M_{cr}/M_y	M_{cr}/M_{crref}	M_y / M_{yref}
BS0-S3	30	81,5	263,4	274,0	0,30	1,1	1,0
BS1-S3	29	71,1	272,6	280,1	0,25	1,0	1,0

K1 ve K2 kesitli kiriş gruplarında da görüldüğü ve beklendiği üzere; K3 kesitli yazın imal edilen betonarme kirişlerin akma momenti taşıma kapasitelerinin hemen hemen eşit olduğunun ifade edilmesi mümkündür. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi de Şekil 4.36’da sunulmaktadır.

**Şekil 4.36.** K3 kesitli betonarme kirişlerin deneysel moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırmalı grafik gösterimi.

Çatlama momenti ve akma momentinin sunulduğu Çizelge 4.26, Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28 incelendiğinde, akma momentlerinin birbirine yakın olduğu ancak ilk çatlak değerleri incelendiğinde atmosfere açık koşullarda daha erken yüklerde geldiği dikkat çekmektedir. Bu durumu birçok parametrenin etkilediği aşıkardır. Ancak bu tez çalışması içerisinde yapılan sıcaklık-deformasyon ölçümleri göz önünde tutulduğunda gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek oluşu atmosfere açık şartlarda muhafaza edilen betonarme kiriş numunelerinin, sabit sıcaklıkta laboratuvar koşullarında muhafaza edilen betonarme kiriş

numunelerine göre termal etkileşimle yorulma yaşamış olması ve bu nedenle erken çatlama olduğu düşünülmektedir.

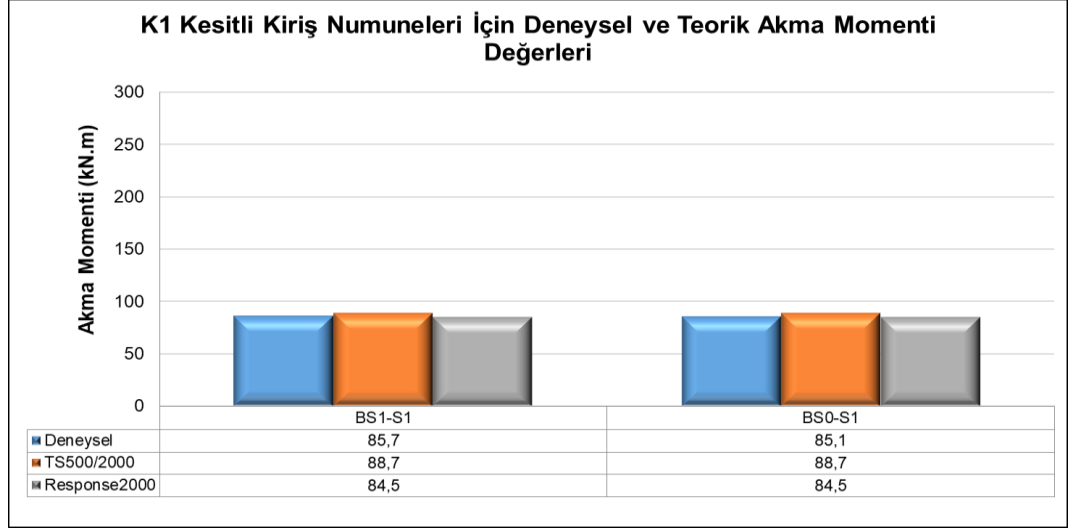
Sabit sıcaklık altında laboratuvar koşullarında ve değişken sıcaklık altında atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin her bir farklı kesit grubu içinde birbirine hemen hemen eşit olması nedeniyle hesap değerlerinin de benzer bir kıyaslama rejimi sunması beklenir. Bu yaklaşımla, imal edilen bütün betonarme kiriş kesitlerinin moment taşıma kapasiteleri TS 500 (2000) uyarınca Taşıma Gücü Yöntemi kabuller dâhilinde hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar klasik el hesabıyla ve Response2000 (2000) kesit analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda deneysel tasarım başlangıcında tercih edilen C30/37 – S420 malzeme çiftinin karakteristik dayanım değerleri kullanılmıştır.

K1 kesitli betonarme kirişler için teorik ve deneysel moment taşıma kapasiteleri (akma momentleri) ile teorik değerlerin deneysel değere oranla rölatif % hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.29’da sunulmuştur.

Çizelge 4.29. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik moment taşıma kapasiteleri.

Numune	Deneysel (kN.m)	El Hesabı		Response2000 (2000)	
		Değer (kN.m)	Fark (%)	Değer (kN.m)	Fark (%)
BS0-S1	85,1	88,7	4,2	84,5	-0,7
BS1-S1	85,7	88,7	3,5	84,5	-1,4

Görsel bir kıyaslama yapılabilmesi amacıyla K1 kesitli kirişlerin deneysel ve Taşıma Gücü Yöntemi uyarınca hesaplanmış teorik moment taşıma kapasiteleri sütun grafiği olarak Şekil 4.37’de sunulmuştur.



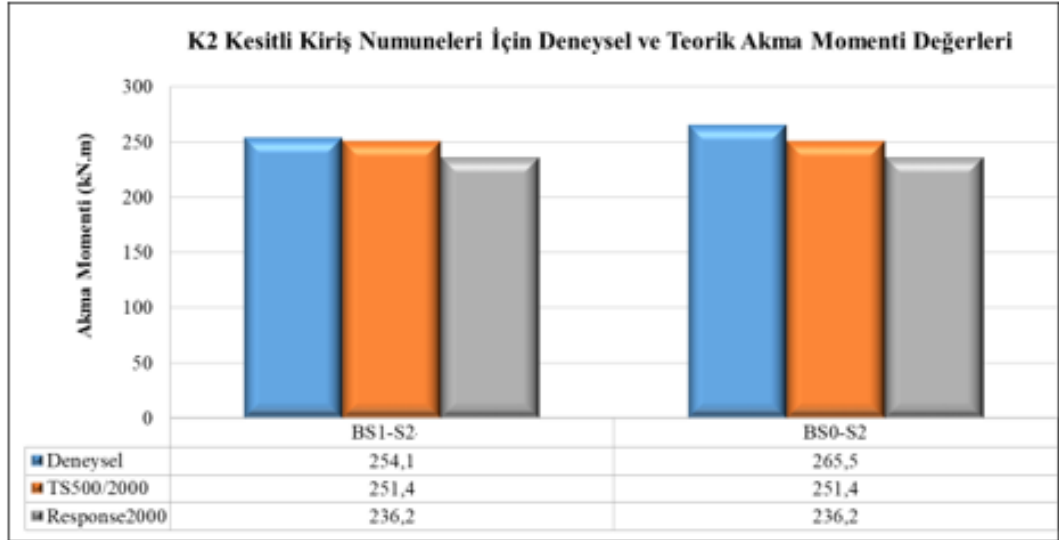
Şekil 4.37. K1 kesitli betonarme kirişlerin deneySEL ve teorik moment taşıma kapasiteleri

K2 kesitli betonarme kirişler için teorik ve deneySEL moment taşıma kapasiteleri (burada akma momentleridir) ile teorik değerlerin deneySEL değere oranla rölatif % hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.30’da sunulmuştur.

Çizelge 4.30. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneySEL ve teorik moment taşıma kapasiteleri.

Numune	DeneySEL (kN.m)	El Hesabı		Response2000 (2000)	
		Değer (kN.m)	Fark (%)	Değer (kN.m)	Fark (%)
BS0-S2	265,5	251,4	-5,3	236,2	-11,0
BS1-S2	254,1	251,4	-1,1	236,2	-7,0

Görsel bir kıyaslama yapılabilmesi amacıyla K2 kesitli kirişlerin deneySEL ve Taşıma Gücü Yöntemi uyarınca hesaplanmış teorik moment taşıma kapasiteleri sütun grafiği olarak Şekil 4.38’de sunulmuştur.



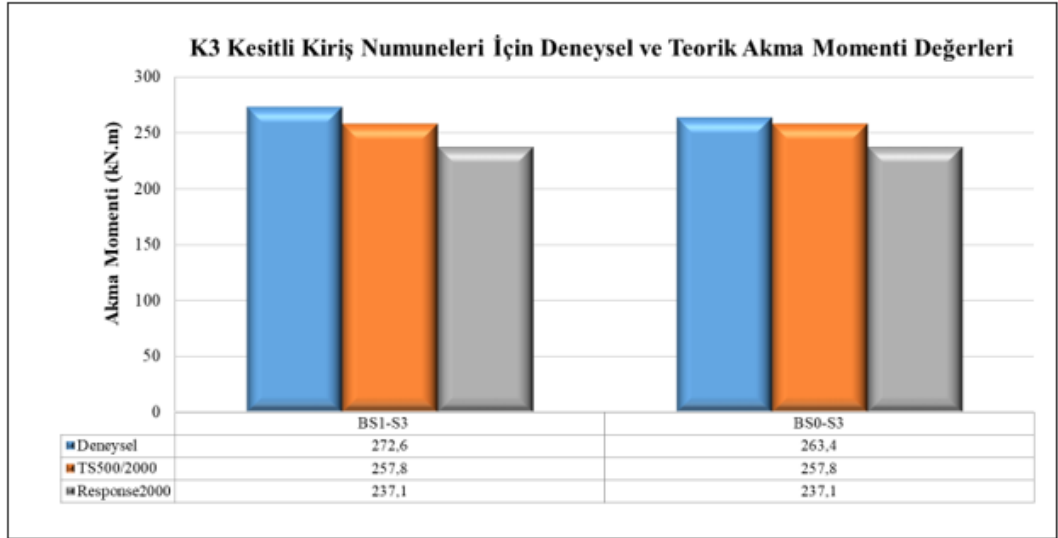
Şekil 4.38. K2 kesitli betonarme kirişlerin deneySEL ve teorik moment taşıma kapasiteleri

K3 kesitli betonarme kirişler için teorik ve deneySEL moment taşıma kapasiteleri (burada akma momentleridir) ile teorik değerlerin deneySEL değere oranla rölatif % hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.31’de sunulmuştur.

Çizelge 4.31. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneySEL ve teorik moment taşıma kapasiteleri.

Numune	DeneySEL (kN.m)	El Hesabı		Response2000 (2000)	
		Değer (kN.m)	Fark (%)	Değer (kN.m)	Fark (%)
BS0-S3	263,4	257,8	-2,1	237,1	-10,0
BS1-S3	272,6	257,8	-5,4	237,1	-13,0

Görsel bir kıyaslama yapılabilmesi amacıyla K3 kesitli kirişlerin deneySEL ve Taşıma Gücü Yöntemi uyarınca hesaplanmış teorik moment taşıma kapasiteleri sütun grafiği olarak Şekil 4.39’da sunulmuştur.



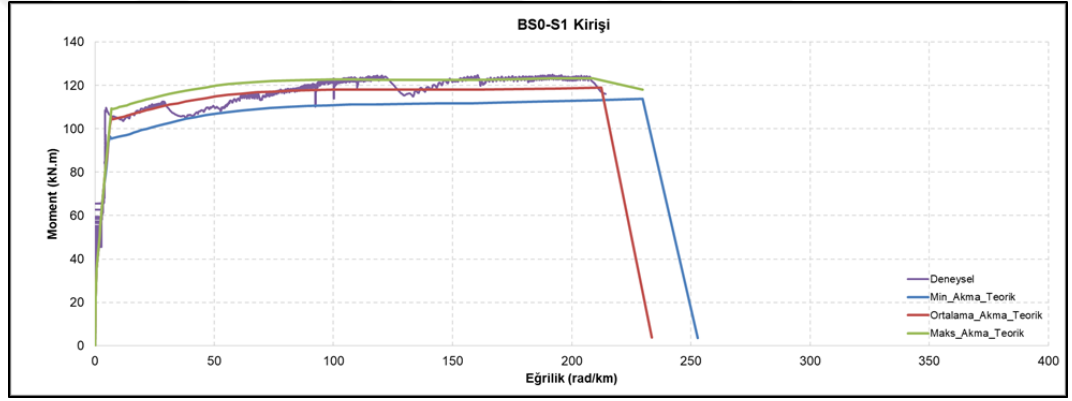
Şekil 4.39. K3 kesitli betonarme kirişlerin deneySEL ve teorik moment taşıma kapasiteleri

Çizelge 4.29, Çizelge 4.30 ve Çizelge 4.31 birlikte değerlendirildiğinde; tasarım aşamasında tasarım dayanımları kullanılarak donatı hesapları yapılacağından; hesaplanan hata oranlarının güvenli sınırlar içerisinde kaldığının ifade edilmesi mümkündür. Ancak, eğilme etkisi altındaki betonarme kesit tasarımında kullanılan yegâne tasarım parametresi moment taşıma kapasitesi değildir. Atmosfer ortamında imalatı yapılacak betonarme taşıyıcılı bir sistem için, projelendirme aşamasında kullanılacak diğer tasarım parametrelerinin varlığı da göz ardı edilmemelidir. Araştırma süresince elde edilen veri üzerinden özellikle deformasyon hesaplarında kullanılan parametrelerden hangisi ya da hangilerinin irdelenebileceği üzerinde durulmuştur ve etkin kesit rijitliği çarpanı parametresi üzerinde çalışma yapılmıştır ve deneySEL moment-eğrilik ilişkilerinin takdim edildiği alt bölümde sunulmuştur. Birbirleriyle ilişkili olmaları nedeniyle, etkin kesit rijitliği çarpanı ile birlikte çatlama momenti parametresi de incelenmiştir.

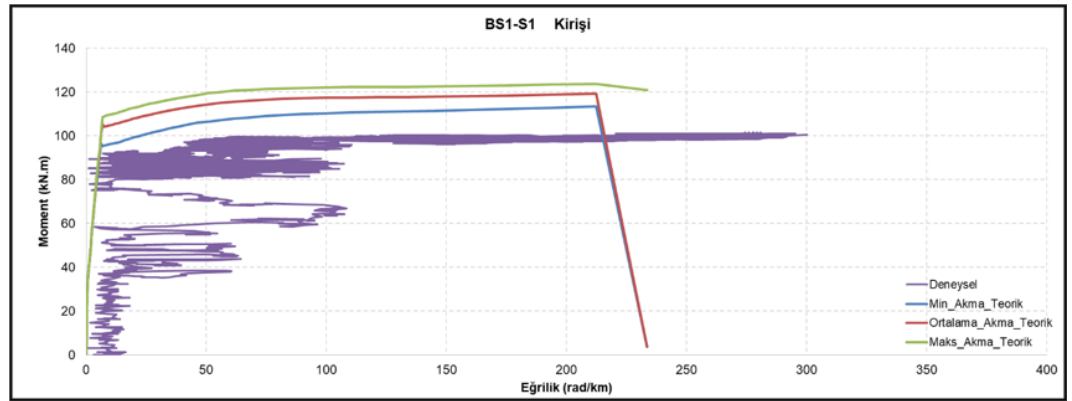
4.4.2. Moment-eğrilik grafikleri ve etkin kesit rijitliği çarpanı

İmalatı gerçekleştirilen ve dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulan betonarme kiriş numunelerinin deney süresince moment-eğrilik ilişkilerinin çıkarılması amacıyla kiriş numunelerinin sabit maksimum moment bölgesinde kiriş uzunluğunun tam orta noktasında ~150 mm sağ ve sol tarafına belirlenen noktalar arasında toplamda ~300 mm ölçüm boyunda deformasyon ölçümü alınmıştır. Tez çalışması kapsamında 6 adet kiriş numunesi incelenmiştir. Ancak bazı kiriş testlerinde sensör bağlantı noktası üzerinden

çatlak gelişimi, vb. nedenlerden dolayı yüzeyden ayrılması durumu olmuş ve moment-eğrilik ilişkileri deney sonuna kadar takip edilememiştir. Bu durumlar dikkate alınarak moment-eğrilik ilişkileri çıkarılmaya çalışılmıştır. Deneyisel moment-eğrilik ilişkileri nümerik olarak Response2000 (2000) yazılımı kullanılarak hesaplanan moment-eğriliklerle birlikte üst üste çizdirilmiştir. Response2000 (2000) yazılımında yapılan model üzerinde deney günü tayin edilen malzeme dayanımları ile çelik donatı mekanik özellikleri ve sınıfının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışma doğrultusunda deneyisel olarak belirlenen minimum, maksimum ve ortalama, akma ve çekme dayanım değerleri ile üç sınır grafik üretilerek deneyisel veri ile üst üste çizdirilmiştir. Bu şekilde BS0-S1 ve BS1-S1 grubu kirişleri için üretilen moment-eğrilik grafikleri Şekil 4.40 (a) ve Şekil 4.40 (b)'de birlikte sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.40. Deneyisel ve teorik moment-eğrilik grafikleri, (a): BS0-S1 kiriş numunesine ait grafik, (b): BS1-S1 kiriş numunesine ait grafik.

Şekil 4.40 (a) ve Şekil 4.40 (b)'de moment-eğrilik grafikleri sunulan BS0-S1 kirişinin K1 kesitli kiriş grubunun laboratuvar ortam koşullarında (~ 24 °C sabit sıcaklıklı

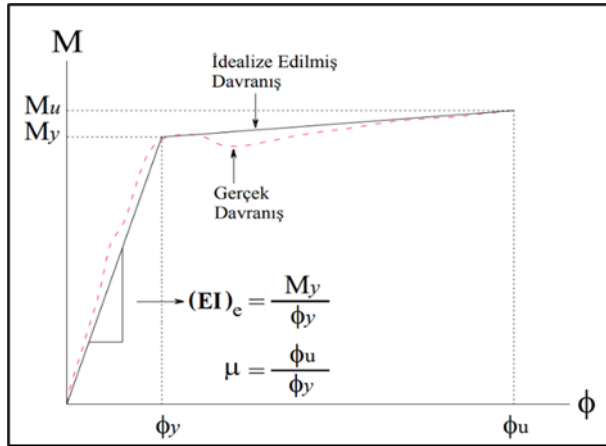
ortamda bekletilmiş) üst sınır elemanı, BS1-S1 kirişinin ise ölçümlerinde sensör verisinde düzensizlik olsa da çıkarılan moment-eğrilik grafiğinde maksimum moment değeri göz önüne alındığında atmosfer ortam koşullarında (gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek olduğu dış ortamda bekletilmiş) alt sınır elemanı olduğu ifade edilmelidir. Toplamda 6 adet betonarme kiriş için, Şekil 4.40'ta sunulduğu şekliyle üretilen moment-eğrilik ilişkileri akıştaki bütünlüğün korunması amacıyla toplu halde EK-3 içerisinde sunulmuştur.

Deneyssel olarak elde edilen moment-eğrilik grafiklerinin sözel olarak tartışılmasından ziyade; atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kirişlerin kesit davranışları bakımından sundukları önemli verinin sayısal olarak ele alınmasında yarar görülmektedir. Öyle ki; K1, K2 ve K3 kesitli kirişler, *laboratuvar ya da atmosfere açık koşullarda imal edilmiş olmalarından bağımsız olarak*, kendi içlerinde hemen hemen aynı değerde akma momenti kapasitesine ulaşmışlardır. Bu tespit; atmosfere açık koşullarda imalatı yapılan kirişlerin eğilme etkisi altındaki “dayanım” bakımından laboratuvar koşullarındaki kiriş numunelerine muadil olduklarını gösterir. Ancak, betonarme ilkeleri bakımından dayanımın tek başına ele alınması hatalı bir yaklaşımdır. Ersoy et al. (2003) kaynağına da referansla, esas olan davranıştır. Bu bakımdan, aynı akma momenti taşıma kapasitesi gösteren kirişlerin bu moment etkisi altında ulaştıkları eğrilik değeri son derece kıymetli bir veridir ki; kullanıcıyı etkin kesit rijitliğine ve oradan da etkin kesit rijitliği çarpanına götürür. Etkin kesit rijitliği çarpanının laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilen betonarme kirişlerin davranış bakımından incelenmesi amacıyla kullanımı öncesi kısaca tanımlanmasında yarar görülmektedir.

Etkin kesit rijitliği ve etkin kesit rijitliği çarpanı kavramlarının açıklamasına geçilmeden; eğilme rijitliğinin (EI) kısaca açıklanması uygun olacaktır. Burada E; beton elastik modülü, I ise kesitin (*donatı ihmal edilerek hesaplanan*) atalet momentidir. Eğilme rijitliği (EI) yapısal elemanın eğilme etkisi altındaki şekil değiştirmeye karşı direnci olarak tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle, eğilme etkisi altındaki bir elemanın birim eğriliğe ulaşması için uygulanması gereken eğilme momenti değerini ifade eder. Bu nedenle, eğilme rijitliği eğilmeye maruz yapı elemanlarının elastik bölgedeki deformasyon hesaplarında kullanılan bir parametredir. Ancak, yük etkisi altında betonarme kesitte çatlama meydana geldikten sonra eğilme rijitliğinde, *yani kesitin*

eğilme etkisi altındaki deformasyona karşı gösterdiği dirençte, azalma meydana gelecektir ve bu andan itibaren etkin kesit rijitliklerinin (EI_e) geçerli ve ilgili hesaplarda kullanılmasının gerekli olduğu; gerek TS 500 (2000)' de ve gerekse TBDY (2018)' de ifade edilmektedir. Etkin kesit rijitliğinin, kesitin çatlamasından (ya da daha teknik bir deyişle M_{cr} değerindeki momente maruz kalmasından) sonra başlangıçtaki eğilme rijitliğine (EI) oranla azalma meydana gelmiş kesit rijitliği değeri olarak tanımlanması mümkündür. Betonarme taşıyıcı sistemlerde daha gerçekçi bir yaklaşımla deformasyon hesaplarının yapılabilmesi için kesitin çatlama momenti ile birlikte etkin kesit rijitliği parametresinin belirlenmesi gereklidir.

Etkin kesit rijitliğinin (EI_e) belirlenmesinde *en gerçekçi* uygulamalardan birisi, betonarme kesitin kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik ilişkisinin kullanılmasıdır. Kesitin moment-eğrilik grafiği üzerinde akma momentine (M_y) karşılık gelen akma eğriligi (ϕ_y) oranı ile etkin kesit rijitliği, Şekil 4.43'te gösterildiği şekilde, belirlenir. Bu durumda, yapısal sistemi oluşturan ve eğilme etkisi altında zorlanacak olan tüm kesitler için kesit analizi yapılarak etkin kesit rijitliğinin hesaplanması gerekecektir. Bu yöntemin pratikte zorlayıcı olduğu açıktır. Bu nedenle, yapısal modelleme ve analizde esas alınan teknik mevzuat daha pratik bir yöntem sunmaktadır.



Şekil 4.41. Moment-eğrilik ilişkisi üzerinden etkin kesit rijitliğinin (EI_e) belirlenmesi

TBDY (2018) uyarınca *doğrusal elastik modellenen* betonarme elemanların/sistemlerin deprem yüklerini içeren kombinasyonları için yapılacak olan sehim hesaplarında etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılmasını şart koşturma ve yapısal taşıyıcı elemanlar için değerler sunmaktadır. Bu yöntemle, etkin kesit rijitliği (EI_e);

çatlamamış kesitin eğilme rijitliği (EI)'nin doğrusal bir fonksiyonu olarak, etkin kesit rijitliği çarpanı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Etkin kesit rijitliği çarpanı yapısal elamanın maruz kalacağı zorlamaya bağlı olarak belirlenmektedir. Örneğin, bu proje kapsamında incelenen eğilme etkisi altındaki betonarme kirişler için TBDY (2018)'de etkin kesit rijitliği çarpanı 0,35 olarak sunulmaktadır.

TBDY (2018) uyarınca *yığılı plastik davranışa göre modellenen* betonarme elemanların deprem yüklerini içeren kombinasyonları için yapılacak olan sehim hesaplarında etkin kesit rijitliği değerlerinin kullanılması şart koşulmuştur ve etkin kesit rijitliklerinin hesabında kesitlerin akma momenti, akma dönmesi, etkin akma eğriliği, *çatlama momenti* gibi parametrelerin kullanıldığı formüllere yer verilmiştir.

Yine TS 500 (2000)'de kalıcı ve hareketli yükler altında betonarme eğilme elemanlarının ani sehimleri, açıklığı boyunca hiçbir kesitinde çatlamayan elemanlarda ($M_{maks} \leq M_{cr}$) tüm kesit eylemsizlik momenti (I) kullanılarak, çatlayan elemanlarda ($M_{maks} > M_{cr}$) ise, etkili eylemsizlik momenti (I_e) kullanılarak ve mesnet koşulları göz önünde bulundurularak yapı mekaniği ilkelerine göre hesaplanması gerektiği ifade edilmektedir. Kesit için etkili atalet momenti hesabında kullanılacak denklem ise kesitin çatlama momentinin (M_{cr}) bir fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve çatlama momentinin Denklem 4.9 uyarınca hesaplanması şart koşulmaktadır.

$$M_{cr} = 2,5 \times \frac{f_{ctd} l_c}{y} \quad (4.9)$$

Burada;

M_{cr} : Kesitin çatlama momenti (kN.m)

f_{ctd} : Beton tasarım eksenel çekme dayanımı

I_c : Tüm kesit atalet momenti

y : En dış çekme lifinin tarafsız eksenenden uzaklığıdır.

TS 500 (2000)'e benzer bir yaklaşımla ACI 318-19 (2022), etkin kesit rijitliği hesabında kullanılacak etkili atalet momenti hesabını, kesitin çatlama momentinin bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır ve eğilme etkisindeki betonarme kesitin çatlama momentinin Denklem 4.10 uyarınca hesaplanabileceğini ifade etmiştir.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (4.10)$$

Burada;

M_{cr} : Kesitin çatlama momenti (kN.m)

f_r : Betonun yırtılma dayanımı (modulus of rupture)

I_g : Çatlamamış kesitin çelik donatı ihmal edilerek hesaplanan atalet momenti

y_t : En dış çekme yüzeyinin kesit ağırlık merkezinden uzaklığıdır.

ACI 318-19 (2022) uyarınca kesit çatlama momenti hesabında kullanılacak betonun yırtılma dayanımı (modulus of rupture) Denklem 4.11 ile hesaplanmaktadır.

$$f_r = 0,623\lambda\sqrt{f_c} \quad (4.11)$$

Burada;

f_r : Betonun yırtılma dayanımı (modulus of rupture), (MPa)

λ : Beton birim ağırlık çarpanı (normal ağırlıklı beton için 1.0 alınır)

f_c : Betonun silindirik numune eksenel basınç dayanımı, (MPa)'dır.

Yukarıda sunulan açıklamalara ek olarak; etkin kesit rijitliği hesabında kullanılacak *çatlama momentinin* kesit akma momenti üzerinden hesaplanmasını amaçlayan ya da tam tersi bir yaklaşımla kesit akma momentini yukarıda sunulan pratik bağıntılarla hesaplanan çatlama momenti üzerinden hesaplanmasını konu edinen çalışma ve yaklaşımlar da bulunmaktadır. Esasen bu çalışmalar, daha pratik bir şekilde kesit

moment-eğrilik ilişkilerinin çıkarılabilmesi amacıyla yapılmaktadırlar. Kaklauskas and Sokolov (2021), çalışması bu bakımdan kapsamlı bir örnek çalışma sunmaktadır. Söz konusu çalışmada; literatürdeki deneysel çalışmalara referansla yapılan hesaplamalarda, incelenen kesitlerin büyük çoğunluğunda kesitin $3M_{cr}$ değerinde bir momente ulaştığında tamamen çatlamış kesite dönüştüğü sonucuna varıldığı ifade edilmektedir. Kesitteki donatı miktarının artmasıyla bu değerin artacağı ifade edilirken; hafif donatılı (çekme donatısı oranı %0,5’ ten az) kesitlerde (*çatlamış kesit için*) $2/3M_{cr}$ oranına kadar kabuller yapıldığı ifade edilmektedir. Sunulan açıklamalar ışığında, eğilme etkisine maruz betonarme bir kesitin etkin kesit rijitliği hesaplarında çatlama momenti (M_{cr}) değerinin önemli bir parametre olduğu da görülmektedir.

Betonun çekmeye karşı dayanımının düşük olması nedeniyle, çekme etkisindeki elemanların çekme bölgelerinde, bu gerilmelerinin karşılanması amacıyla, çekme dayanımı yüksek “*betonarme çeliği*” olarak adlandırılan “*donatı*” yerleştirilir. Böylece betonarme kesitler oluşur. Ancak, bir elemanın betonarme olabilmesi için donatı ile betonun arasındaki aderansın (yapışmanın) tam olması gerekir. Diğer bir deyişle, betonarme bir elemanda, donatı ile beton birlikte uzamalı veya kısalmalıdır. Kabaca bir yaklaşım olmakla birlikte, tez çalışması kapsamında incelenen kirişlerin çatlama momenti değerlerinin beton-çelik arasındaki tutunmanın değerlendirilmesi amacıyla kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında test edilen bütün kirişlerde, deney esnasında yüzeyde ilk çatlak oluştuğu andaki eğilme momenti (M_{cr}) belirlenmiştir. Bu işlem; sadece yüzeyde ilk çatlak belirlediği andaki yükün deney notu olarak kaydedilmesiyle değil deney bitiminde çizdirilen yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinde başlangıç eğiminin değiştiği noktanın kontrolü ile de teyit edilmiştir. TS 500 (2000) ve ACI 318-19 (2022) tarafından sunulan bağıntılar, kesit çatlama momenti hesabında çekme bölgesindeki donatıyı ihmal etmektedirler. Bu durumda, deneysel olarak belirlenen çatlama momentlerinin, *eğer tam tutunma olmuşsa*, Denklem 4.10 ve Denklem 4.11 uyarınca hesaplanan çatlama momenti değerlerinden yüksek olması beklenebilir.

Yukarıda sıralanan hususların tez çalışması kapsamında incelenen betonarme kirişler için değerlendirilmesi amacıyla öncelikle çatlama momentleri ele alınacaktır.

Devamında ise, deneysel moment-eğrilik ilişkileri kullanılarak hesaplanan etkin kesit rijitlikleri ve etkin kesit rijitliği çarpanları üzerine bir değerlendirme yapılacaktır.

Çizelge 4.32’de K1 kesitli kirişler, Çizelge 4.33’te K2 kesitli kirişler ve Çizelge 4.34’te K3 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.32. K1 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Deneysel		Teorik M_{cr} (kN.m)	
		M_{cr}/M_y	M_{cr} (kN.m)	Bağıntı 4.9 TS500(2000)	Bağıntı 4.10 ACI318-19(2022)
BS0-S1	32	0,25	31,4	41,2	44,1
BS1-S1	34	0,33	39,6	42,5	45,4

Çizelge 4.32 incelendiğinde, K1 kesitli kirişlerin deneysel çatlama momenti değerlerinin, TS 500 (2000) uyarınca teorik olarak hesaplanan değerlerden düşük olduğu görülmektedir. Aynı rejim, ACI 318-19 (2022) uyarınca yapılan hesaplamalarda tüm kirişler için de geçerlidir.

Çizelge 4.33. K2 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Deneysel		Teorik M_{cr} (kN.m)	
		M_{cr}/M_y	M_{cr} (kN.m)	Bağıntı 4.9 TS500(2000)	Bağıntı 4.10 ACI318-19(2022)
BS0-S2	32	0,30	79,0	41,2	44,1
BS1-S2	29	0,21	54,5	39,3	41,9

Çizelge 4.33 incelendiğinde K2 kesitli kirişlerin, deneysel çatlama momenti değerlerinin teorik olarak hesaplanan değerlerden yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.34. K3 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentleri

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Deneysel		Teorik M_{cr} (kN.m)	
		M_{cr}/M_y	M_{cr} (kN.m)	Bağıntı 4.9 TS500(2000)	Bağıntı 4.10 ACI318-19(2022)
BS0-S3	30	0,30	81,5	39,9	42,7
BS1-S3	29	0,25	71,1	39,3	41,9

K3 kesitli kirişlerin deneysel ve teorik çatlama momentlerinin sunulduğu Çizelge 4.34 incelendiğinde K2 kesitli kirişlerde olduğu gibi deneysel çatlama momenti değerleri teorik hesaplanan değerlerden yüksek olduğu görülmektedir.

Burada, Denklem 4.12’de TS 500 (2000) ve Denklem 4.14’te ACI 318-19 (2022)’dan alıntılanarak sunulan teorik çatlama momenti hesaplama bağıntılarında sadece beton malzemenin dikkate alındığının altı çizilmelidir. Bu bağıntılarda çekme donatısız ve katkısına ilişkin herhangi bir parametre bulunmamaktadır. K2 ve K3 kesitli kirişlerde 9Ø14 çekme donatısı bulunmakta; Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34 birlikte incelendiğinde çekme donatısı miktarı arttıkça deneysel ve teorik çatlama momenti değerleri arasındaki farkın açıldığı görülmektedir. Teorik çatlama momenti değerlerinin hesaplamada kullanılan, Denklem 4.12 ve Denklem 4.13’ün çekme donatısız miktarı arttıkça deneysel verinin altında sonuçlar sunduğu görülmektedir.

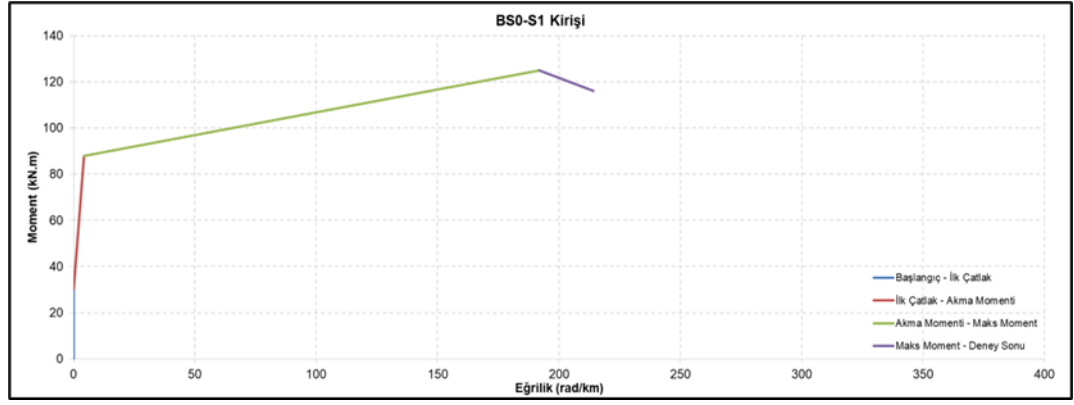
Çizelge 4.35’te tüm kirişler için çatlama momenti/akma momenti oranları toplu halde sunulmaktadır.

Çizelge 4.35. Tüm kirişler için M_{cr}/M_y oranları

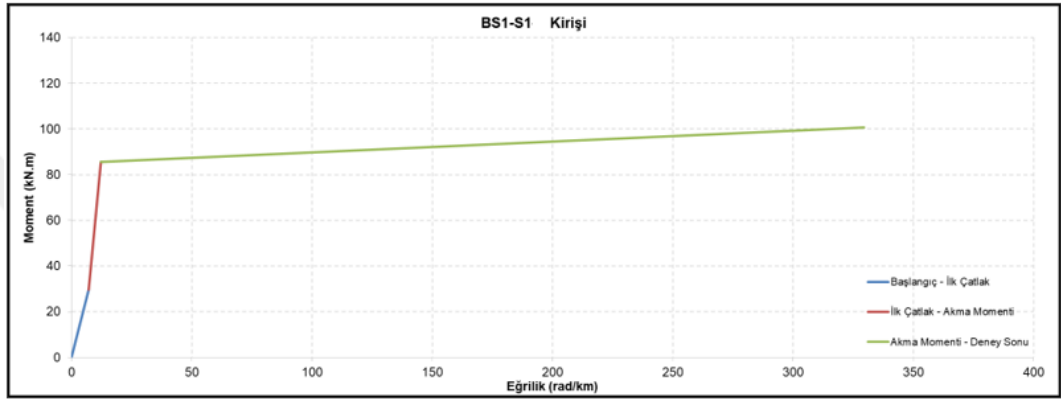
Kiriş Grubu	K1	K2	K3
	M_{cr}/M_y	M_{cr}/M_y	M_{cr}/M_y
BS0	0,25	0,30	0,30
BS1	0,33	0,29	0,32

Uygulamada çatlama momentinin akma momentinin 0,3-0,35 katı kabulünün yaygın olduğunu ifade etmek mümkündür. Çizelge 4.35 incelendiğinde yaz aylarında laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imalatı gerçekleştirilmiş betonarme kiriş numunelerinin bu aralıkta kaldığı görülmektedir.

Araştırma kapsamında incelenen betonarme kirişlerin deneysel moment-eğrilik ilişkileri ilk çatlak, akma, maksimum moment, maksimum düşey yer değiştirme (deney sonu) noktaları dikkate alınarak, Şekil 4.42’ye referansla, idealize moment-eğrilik grafikleri oluşturulmuştur. BS0-S1 ve BS1-S1 kirişlerine ait örnek grafikler Şekil 4.42 (a) ve Şekil 4.42 (b)’de ve tüm idealize moment eğrilik grafikleri EK-4’te sunulmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.42. Betonarme kiriş numunelerinin deneysel çalışma sonucu çizdirilen moment-eğrilik grafikleri, (a) BS0-S1 kiriş numunesine, (b) BS1-S1 kiriş numunesine ait moment-eğrilik grafikleri.

Şekil 4.42’de sunulan grafiğin hazırlanmasında kullanılan veri ile öncelikle etkin kesit rijitliği çarpanı değerleri ve sonrasında da eğrilik değerleri üzerinden kesit sünekliği oranları hesaplanmıştır. Bu amaçla öncelikle TS 500 (2000) uyarınca Denklem 4.5 kullanılarak hesaplanan beton elastik modülü ve kesit atalet momenti kullanılarak başlangıç eğilme rijitliği hesaplanmıştır. Deneysel moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen akma momenti ve akma eğriliği oranından etkin kesit rijitliği hesaplanmıştır. Etkin kesit rijitliğinin başlangıç eğilme rijitliğine bölünmesi ile de etkin kesit rijitliği çarpanı hesaplanmıştır. Çizelge 4.36, Çizelge 4.37 ve Çizelge 4.38’de sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitli kirişler için hesaplanan etkin kesit rijitliği çarpanları sunulmaktadır.

Çizelge 4.36. K1 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları

Numune	Etkin Kesit Rijitliği (EI_e)	Eğilme Rijitliği (EI)	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı
BS0-S1	33.062	101.202	0,33
BS1-S1	5.473	98.443	0,06

Çizelge 4.37 incelendiğinde, atmosferik koşullarda bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,06, laboratuvar koşullarında bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,33 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.37. K2 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları

Numune	Etkin Kesit Rijitliği (EI _e)	Eğilme Rijitliği (EI)	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı
BS0-S2	32.136	101.202	0,32
BS1-S2	10.689	98.443	0,11

Çizelge 4.38 incelendiğinde, atmosferik koşullarda bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,11, laboratuvar koşullarında bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,32 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.38. K3 kesitli kirişler için etkin kesit rijitliği çarpanları

Numune	Etkin Kesit Rijitliği (EI _e)	Eğilme Rijitliği (EI)	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı
BS0-S3	30.148	99.378	0,30
BS1-S3	8.020	98.443	0,08

Çizelge 4.39 incelendiğinde, atmosferik koşullarda bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,08, laboratuvar koşullarında bekletilen betonarme kiriş numunelerinin etkin kesit rijitliği çarpanı 0,30 olarak hesaplanmıştır.

Atmosfere açık koşullarda imalatı yapılan ve deneye tabi tutulan kiriş numunelerinin deneysel moment-eğriliklerinin hata olabileceği düşünüldüğünden sabit sıcaklıklı laboratuvar koşulları ile atmosfere açık koşulların karşılaştırılması mümkün olmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında incelenen *doğrusal elastik modellenen* eğilme etkisi altındaki betonarme kirişler için TBDY (2018)'de etkin kesit rijitliği çarpanı 0,35 olarak sunulmaktadır. Çizelge 4.37, Çizelge 4.38 ve Çizelge 4.39 beraber incelendiğinde laboratuvar koşullarında imal edilip bekletilen K1, K2 ve K3 kesitli betonarme kiriş numunelerinin sırasıyla 0,33, 0,30 ve 0,32 etkin kesit rijitliği çarpanı değerleri ile 0,35 değerine oldukça yakın oldukları görülmektedir.

4.4.3. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden başlangıç rijitliğinin hesaplanması

Deneye tabi tutulan tüm kirişler için yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden başlangıç rijitliği değerleri hesaplanmıştır. Bu esasen, başlangıçla ilk çatlağın oluştuğu nokta arasındaki doğrusal bölgenin eğimidir. Çizelge 4.39, Çizelge 4.40 ve Çizelge 4.41’de sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.39. K1 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Referans Numune Rijitliğine Oranı
BS0-S1	31,2	1,1
BS1-S1	28,3	1,0

Çizelge 4.40. K2 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Referans Numune Rijitliğine Oranı
BS0-S2	34,6	1,1
BS1-S2	32,7	1,0

Çizelge 4.41. K3 kesitli kirişler için hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri

Numune	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Referans Numune Rijitliğine Oranı
BS0-S3	32,3	1,2
BS1-S3	26,9	1,0

Çizelge 4.39, Çizelge 4.40 ve Çizelge 4.41 beraber incelendiğinde referans olarak seçilen atmosfere açık koşullardaki betonarme kirişlerin sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarındaki imalatlarla hemen hemen aynı olduğu, ancak sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarındaki imalatların ~%10 daha rijit olduğunun ve termal etkilerden fazla etkilenmemiş olmasıyla atmosfere açık koşullardaki imatlardan daha az yorulduklarını ifade etmek mümkündür.

4.4.4. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden enerji sönümleme kapasitelerinin hesaplanması

Tez çalışması kapsamında deneye tabi tüm kirişler için yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri üzerinden enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu

kapsamda, tüm kiriş numuneleri üzerinden başlangıçtan itibaren maksimum yük noktası belirlendikten sonra ulaştıkları maksimum yük değerinin %85'ine denk gelen ilk nokta belirlenmiştir. Başlangıç ile maksimum yükün %85'ini gördüğü noktalar arasında kalan alan hesaplanmış ve enerji sönümleme miktarı olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.42, Çizelge 4.43 ve Çizelge 4.44'te sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.42. K1 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri

Numune	Enerji Sönümleme Kapasitesi	Eleman Enerji Sönümleme Kapasitesinin Referans Kiriş Oranı
BS0-S1	37.563	1,1
BS1-S1	34.759	1,0

Çizelge 4.43. K2 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri

Numune	Enerji Sönümleme Kapasitesi	Eleman Enerji Sönümleme Kapasitesinin Referans Kiriş Oranı
BS0-S2	61.305	2,2
BS1-S2	28.492	1,0

Çizelge 4.44. K3 kesitli kirişler için hesaplanan enerji sönümleme kapasitesi değerleri

Numune	Enerji Sönümleme Kapasitesi	Eleman Enerji Sönümleme Kapasitesinin Referans Kiriş Oranı
BS0-S3	66.362	1,8
BS1-S3	36.815	1,0

Çizelge 4.42, Çizelge 4.43 ve Çizelge 4.44 beraber incelendiğinde sabit sıcaklıklı K1 kesitli betonarme kiriş numunelerinin ~%10, K2 ve K3 kesitli kiriş numunelerinde ise ~%80-120 oranında daha fazla enerji sönümleme kapasitelerine ulaştıkları görülmektedir. Her iki imalatında aynı özelliklere sahip beton karışımı ve çelik donatı kullanımı göz önüne alındığında atmosfere açık koşullarda imalatı yapılan BS1 grubunun gece-gündüz sıcaklık farkının kiriş numuneleri üzerindeki termal etkilerin bir sonucu olarak değerlendirilebilmektedir. Betonarme bir yapı elemanın kompozit bir yapı elemanı olduğu ve birçok parametrenin bu durum üzerinde etkisi olduğu bilinmekle beraber tez çalışması kapsamında sabit ve değişken sıcaklık şartlarının kiriş numunelerinin incelenmesi üzerinde durulduğundan bu etkinin daha çok termal etkilerden meydana geldiği düşünülmektedir.

4.4.5. Yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafiği üzerinden süneklik oranlarının hesaplanması

Tez çalışması kapsamında deneye tabi tutulan kirişlerde süneklik oranının hesabı için sönmölen enerji kapasitesinde izlenen yolun aynısı izlenerek maksimum yük belirlenmiştir, maksimum yükün %85' ine düştü nokta belirlenmiştir. Süneklik oranının belirlenmesi amacıyla maksimum yükün %85 düştüğü noktanın düşey yer değiştirmesinin akma noktasındaki düşey yer değiştirmesine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. K1, K2 ve K3 kesitli kiriş numuneleri için hesaplanan tüm süneklik oranları sırasıyla Çizelge 4.45, Çizelge 4.46 ve Çizelge 4.47'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.45. K1 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Eleman Süneklik Oranı	Eleman Sünekliğinin Referans Kiriş Sünekliğine Oranı
BS0-S1	22,99	1,1
BS1-S1	21,74	1,0

Çizelge 4.46. K2 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Eleman Süneklik Oranı	Eleman Sünekliğinin Referans Kiriş Sünekliğine Oranı
BS0-S2	9,64	2,4
BS1-S2	4,02	1,0

Çizelge 4.47. K3 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Eleman Süneklik Oranı	Eleman Sünekliğinin Referans Kiriş Sünekliğine Oranı
BS0-S3	9,33	1,9
BS1-S3	5,00	1,0

Çizelge 4.45, Çizelge 4.46 ve Çizelge 4.47 birlikte değerlendirildiğinde, BS0 grubu kirişlerin eleman süneklik oranı değerlerinin BS1 grubu kirişlere oranla yüksek olduğu görülmüştür. BS0-S1, BS0-S2 ve BS0-S3 kirişlerinin aynı kesitli BS1 grubu kirişin sırasıyla 1,1, 2,4 ve 1,9 katı eleman sünekliği gösterdikleri belirlenmiştir. Bu farkın atmosfere açık koşullarda imalatı gerçekleştirilen kiriş numunelerinin deney zamanına kadar bulundukları ortamın termal etkilerinden yorulmuş olmalarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

4.4.6. Moment-eğrilik grafikleri üzerinden süneklik değerlerinin hesaplanması

Tez çalışması için proje öneri metninde belirtildiği üzere, kiriş elemanların deneysel moment-eğrilik verisi üzerinden maksimum eğrilik /akma eğriliği değerinin bir kesit sünekliği parametresi olarak hesaplanması amacıyla çalışma yapılmıştır. Ancak, deney süresince özellikle akma yüküne ulaşıldıktan sonra maksimum moment bölgesindeki hasarın artmasıyla birlikte yatay deformasyon ölçen sensörlerde yüzeyden ayrışmanın meydana geldiği kesitler olmuştur. Ancak, yatay deformasyon ölçümü yapan sensörler ayrıldıktan sonra yüklemenin devam ettiği deneylerde maksimum yükteki eğrilik değerlerinin alınması mümkün olmamıştır. Bu durumda; eldeki deneysel moment-eğrilik ilişkilerinden hesaplanabildiği kadarıyla maksimum yükteki eğrilik/akma eğriliği değeri hesaplanarak tablolar halinde sunulmuştur. Çizelge 4.48, Çizelge 4.49 ve Çizelge 4.50’de sırasıyla K1, K2 ve K3 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.48. K1 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Kesit Süneklik Oranı	Kesit Süneklik Oranının Referans Kirişe Oranı
BS0-S1	35,0	1,0
BS1-S1	-	-

Çizelge 4.49. K2 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Kesit Süneklik Oranı	Kesit Süneklik Oranının Referans Kirişe Oranı
BS0-S2	1,1	1,7
BS1-S2	0,7	1,0

Çizelge 4.50. K3 kesitli kirişler için hesaplanan süneklik oranı değerleri

Numune	Kesit Süneklik Oranı	Kesit Süneklik Oranının Referans Kirişe Oranı
BS0-S3	7,3	3,5
BS1-S3	2,1	1,0

Çizelge 4.48 incelendiğinde atmosfere açık koşullarda imalat edilmiş K1 kesitli BS1-S1 kiriş numunesinden deney sırasında veri okunamadığından sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarında imalatı gerçekleştirilen numune ile kıyaslanamamıştır.

Çizelge 4.49 ve Çizelge 4.50 birlikte incelendiğinde, K2 kesitli kiriş numunelerinin akma ve maksimum momentleri genel olarak birbirine yakın olduğu

görülmüştür. BS1 kiriş numuneleri olan atmosfere açık koşullardaki imalatlara nazaran sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarındaki numunelerinin daha sünek bir davranış göstermiştir. Ayrıca K2 kesitli numunelerde akma ve maksimum momentlerinin birbirine çok yakın olduğu için kesit süneklik oranları birbirine yakın gözükse de K3 kesitli kiriş numuneleri incelendiğinde sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarında imal edilen kiriş numunelerinin gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek olduğu atmosferi koşullarında imal edilen kirişlere oranla 3,5 kat daha yüksek kesit sünekliğine sahip olduğu görülmektedir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması **TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından 219M403** kodlu “*Soğuk Havalarda (Kışın) Dökülmüş Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi*” başlıklı proje çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Araştırma kapsamında yaz aylarında laboratuvar ortamında ve atmosfere açık alanda (normal hava koşullarında) aynı beton karışımından imal edilen toplam 6 adet 4,5 m açıklığında tam ölçekli betonarme kirişin eğilme etkisi altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel gayesi beton dökümü sonrasında betonarme kirişlerin maruz kalacağı ortam sıcaklıklarının özellikle mekanik davranış üzerindeki etkilerinin irdelenmesidir.

Çalışma neticesinde aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

- C30/37 sınıfı beton imal etme amacıyla oluşturulan reçete ile imal edilen betonların 28 günlük silindirik eksenel basınç dayanımları 30 MPa ve üstü değerler almıştır.
- Yazın imal edilen betonarme kirişlerin tahribatsız yöntemlerle beton eksenel basınç dayanımlarının tahmininde ultrasonik atımlı dalga hızı deneyleri ile sertlik çekici deneyleri en fazla %13'lük bir sapma ile beton basınç dayanımı kestirimleri yapılmıştır.
- Yazın betonarme imalatı sürekli beton içi ve ortam sıcaklığı takibi durumunda olgunluk indeksi değerleri üzerinden eksenel basınç dayanımı tahmininin yapılabilirliği üzerine yapılan çalışmada; yaz koşullarındaki imalat için olgunluk indeksi-dayanım bağıntılarının türetilmesi konusunda çalışmalar yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

- Yazın imalatı yapılan kiriş numuneleri üzerinde olgunluk indeksi parametrelerinin (sıcaklık-zaman faktörü ve eşdeğer yaş) hesabının yapılması amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Eşdeğer yaş indeksinin hesaplanmasında kullanılan parametre sayısının çokluğu ve deneysel olarak belirlenmesinin gerekliliği nedeniyle, eşdeğer yaş hesapları güvenilir bir şekilde yapılamamıştır.
- Yazın imal edilen ve tez kapsamında incelenen betonarme kirişlerin kesit ve imalat koşullarından bağımsız olarak eğilme momenti taşıma kapasitelerinde, beklendiği üzere, anlamlı farklar oluşmadığı, bu bakımdan laboratuvar ve atmosfere açık koşullarındaki imalatların muadil oldukları ifade edilebilmektedir.
- Sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarındaki imalatların değişken sıcaklıklı atmosfere açık koşullara göre tüm kiriş kesitleri için ~%10-20 daha rijit davranış sergilediği belirlenmiştir.
- Yaz aylarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin sabit sıcaklıklı laboratuvar koşullarının değişken sıcaklıklı atmosfere açık koşullara göre K1 kesitli betonarme kiriş numunelerinin ~%10, K2 ve K3 kesitli kiriş numunelerinde ise ~%80-120 oranında daha fazla enerji sönümleme kapasitelerine ulaştıkları görülmektedir.
- Süneklik oranı üzerinden yapılan değerlendirme neticesinde, yaz aylarında laboratuvar koşullarında imal edilen betonarme kiriş numunelerinin atmosfere açık koşullarda imal edilmiş numunelere oranla K1, K2 ve K3 kesitli kiriş numunelerinde sırasıyla 1,1, 2,4 ve 1,9 kat daha sünek davranış gösterdikleri belirlenmiştir.
- Kesit sünekliği değerleri üzerinden yapılan değerlendirme sonucunda, genel olarak sabit sıcaklıklı laboratuvar ortamında imal edilen ve bekletilen kirişlerin daha üstün performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Örneğin, K3 kesitli kiriş numuneleri incelendiğinde sabit

sıcaklıklı laboratuvar koşullarında imal edilen kiriş numunesinin gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek olduğu atmosferik hava koşullarına maruz bırakılan kirişe oranla 3,5 kat daha iyi bir kesit sünekliğine sahip olduğu görülmektedir.

- Laboratuvar ve atmosfere açık koşullarda imal edilmiş betonarme kiriş numuneleri üzerinde termal etkilerin incelenmesi amacıyla yapılan çalışma sıcaklık ve deformasyon ölçümleri alınmıştır. Deney gününe kadar döküm koşullarında muhafaza edilen betonarme kiriş numunelerinde alınan sıcaklık-deformasyon ölçümlerinden termal genleşme katsayıları hesaplanmış ve her iki grubunda yapılan literatür araştırmalarında belirlenen değer aralığında kaldığı belirlenmiştir.
- Betonun çekme etkisinde birim şekil değiştirme değeri olan $\epsilon_{ct}=0,0001$ değeri baz alındığında, laboratuvar koşullarında imal edilen kiriş numunelerinde termal etkilerle meydana gelen birim uzama değerlerinin bu değerin altında kaldığı ve numunelerde herhangi bir kılcal çatlığa rastlanmayacağı varsayımına ulaşılabilmektedir. Ancak atmosferik hava koşullarında imal edilen betonarme kiriş numuneleri için hesaplanan termal birim uzama değerlerinin bu değerin üstünde olduğu hatta bazı pik noktalarda $\epsilon_{cu}=0,0002$ değerine oldukça yakın değerler ulaştığı belirlenmiş ve kiriş numunesinde içyapısında kılcal çatlaklar oluşma ihtimalinin olduğu düşünülmektedir.
- Çalışma neticesinde sunulan sonuç, değerlendirme ve önerilerin sadece eğilme etkisi altındaki betonarme kirişler üzerinde yapılan çalışmalar için geçerli olduğu dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- ACI 318-19. 2022. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022), American Concrete Institute, USA.
- ACI PRC-306. 2016. Guide to Cold Weather Concreting, American Concrete Institute, USA.
- Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://argevetasarim.com/surtunme-ve-surtunme-katsayilari/>, Erişim Tarihi: 18.07.2022 adresinden alındı.
- Anonim, 2020a. Web Sitesi: <https://www.betonvecimento.com/beton-2/beton-ve-celik-2>, Erişim Tarihi: 12.06.2023
- Anonim, 2020b. Web Sitesi: <https://www.insaport.com/makale/yuksel-kaya/binalarda-dusey-yuk-analizi-neden-yapilir/>. Erişim Tarihi: 13.06.2023.
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: <https://www.kutmen.com/beton-olgunlugu>, Erişim Tarihi: 13.07.2022.
- Arslan, M. 1991. Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan elik levhalarla güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 89, Ankara.
- ASTM C94/C94M-22a. 2022. Standart Specification for Ready--Mixed Concrete, ASTMA International, USA.
- Attia, M. M., El-Latief, A. A. ve Eita, M. A. 2023. Performance of RC beams with novelty GFRP under the bending load: An experimental and FE study. Case Studies in Construction Materials, 18.
- AUTOCAD. 2022. Computer Aided Desing Program, Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- Baradan, B. ve Aydın, S. 2013. Betonun durabilitesi (dayanıklılık, kalıcılık). Hazır Beton Dergisi, 54-68.
- Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M. ve Catalan, A. 2009. An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction model. Composite Structures, 91, 286-295.
- Bergström, S. G. 1953. Curing temperature, age and strength of concrete, Magazine of Concrete Research, 5(14), 61-66.
- Chen, L. ve Su, R. L. 2020. Effect of high rebar temperature during casting on corrosion in carbonated concrete. Construction and Building Materials, 249, 118718.

- Chen, X., Liu, X., Feng, Y., Huang, X., Li, L., Ge, Y. ve Tian, B. 2023. Microstructures and properties of concrete surface under different exposure conditions in complex natural environments of high-altitude regions. *Journal of Building Engineering*, 72.
- Cui, T., Zhang, T., Wang, J., Chen, J., Wang, W., Wang, H., Wang, H. ve Yang, D. 2023. Optimization and regulation of pavement concrete properties in plateau environment with large daily temperature difference: From Mixture desing to field application. *Construction and Building Metarials*, 378.
- Duran, A. 2008. Betonarme Donatısında Aderans ve Yorulma. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, 76, Kırıkkale.
- El-Nemr, A., Ahmed, E. A. ve Benmokrane, B. 2013. Flexural behavior and serviceability of normal-and high- strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinfoced polymer bars. *American Concrete Institute (ACI) Structural Journal*, 110(6), 1077-1088.
- Elaty, M. A., Ghazy, M. F. ve Ghannam M. F. 2017. Influence of Maturity for Concrete Containing Different Cement Types on Mechanical and Durability Properties. *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering (ICASGE'17)*, 1-15.
- Ersoy, U., Özcebe, G. ve Tankut, T. 2003. Reinforced Concrete. Middle East Technical University Press, 680, Ankara.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. 2017. Betonarme. Evrim Yayınevi ve Bilgisayar SAN. TİC. LTD.ŞTİ., 816, İstanbul.
- Esen, B., Gündoğan, A., Yaman, S., Tekeli Kabaş, H. ve Demir, F. 2022. Betonarme kirişlerin davranışlarını etkileyen parametrelerin deneysel incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(3), 1043-1060.
- Eurocode 2. (BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014). Desing of Concrete Structures, Part1-1: General Rules for Buildings, British Standards Institution, London.
- Falliano, D., Domenico, D. D., Ricciardi, G. ve Gugliandolo, E. 2019. Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density. *Construction and Building Materials*, 198, 479-493.
- Gedik, B. 2020. Soğukta dökülen betonarme elemanlarda çekme etkisi altındaki bağ kuvvetikayma ilişkisinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 219, Erzurum.
- Gemi, L. ve Köroğlu, M. A. 2018. Çekme bölgesi lifli beton olan cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatılı etriyesiz kirişlerin eğilme etkisi altındaki

davranışı ve hasar analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 654-667.

Godínez-Domínguez , E. A., Tena-Colunga, A., Velazquez-Gutierrez, I. ve Silvestre-Pascacio, R. E. 2021. Parametric study of the bending stiffness of RC cracked building beams. Engineering Structures, 243.

Goudie, A. S. 2006. The schmidt hammer in geomorphological research december 2006. Progress in Physical Geography, 30(6), 703-718.

Günaydın, O., Güçlüer, K. ve Arın, A. 2018. Mineral katkılı betonlardabasıncılı buhar kürü etkisinin araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi (KSÜ) Mühendilik Bilimleri Dergisi, 21(1), 92-99.

Hobbs, B. ve Kebir, M. T. 2007. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. Forensic Science International, 167, 167-172.

İlhan, M. 2018. Kuruma Büzülme Engelleyici Katkı ve Lif Kullanımının Çimentolu Sistemlerin Taze Hal, Mekanik ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, Bursa.

Johnson, W. H. ve Parsons, W.H. 1944. Thermal Expansion of Concrete Aggregate Materials. Part of Journal of the National Bureau of Standart, 32, 101-126.

Jaafar, E. K. 2017. Experimental study on anchorage bond in high strength reinforced concrete beams. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 8(1), 63-71.

Kaklauskas, G. ve Sokolov, G. 2021. A peculiar value of M to M_{cr} ratio: reconsidering assumptions of curvature analysis of reinforced concrete beams. Applications in Engineering Science, 7, 100053.

Karahan, S. 2008. Betonarme kirişlerin çelik levha ile güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Ankara.

Kassem, C., Farghaly, A. S. ve Benmokrane, B. 2011. Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP bars. Journal of Composites for Construction, 15(5), 682-695.

Kim, G. S. 2010. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Iowa State University, Master of Science Thesis, Major: Civil Engineering (Geotechnical Engineering), 114, Ames, ABD.

Kütük Sert, T. ve Kara, C. 2018. Farklı kür koşullarının kolemanit ikameli betnların dayanımına etkisi. Journal of Investigations on Engineering and Technology, 1(2), 19-23.

- Kwak, H. G. ve Kim, S. P. 2002. Nonlinear analysis of RC beams based on moment-curvature relation. *Computers and Structures*, 80, 615-628.
- Liu, S., Gu, X. L., Huang, Q. H. ve Zhang, W. P. 2010. Experimental study on the bending behavior of reinforced concrete beams under super-low temperature. *Earth and Space*, 3537-3544.
- Liu, Y., Fu, S., Gau, J. ve Yang, Y. 2020. Prediction for temperature evolution and compressive strength of non-mass concrete with thermal insulation curing in cold weather. *Journal of Building Engineering*, 32, 101737.
- Liu, Y., Tian, W., Wang, M., Qi, B. ve Wang, W. 2020. Rapid strength formation of on-site carbon fiber reinforced high-performance concrete cured by ohmic heating. *Construction and Building Materials*, 244.
- Mathew, G. ve Joseph, B. 2018. Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 15, 311-317.
- Montejo, L. A., Sloan, J. E., Kowalsky, M. J. ve Hassan, T. 2008. Cyclic response of reinforced concrete members at low temperatures. *Journal of Cold Regions Engineering*, 22(3), 79-102.
- Mustard, J. N. ve Ghosh, R. S. 1979. Minimum protection and thermal stresses in winter concreting. *Concrete International*, 1(1), 96-101.
- Özcan, F. 2017. Farklı dayanım sınıflarına ait betonların basınç dayanımlarına değişen kür şartlarının etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi (OHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 115-121.
- 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 Anabilim Dalı, 58, Afyonkarahisar.
- Qasrawi, H. Y. 2020. Concrete strength by combined non-destructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 739-746.
- Qu, W., Zhang, X. ve Huang, H. 2009. Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. *Journal of Composites for Construction*, 13(5), 350-359.
- Raouf, Z. ve 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.
- Sachin, B. P. ve Suresh, N. 2021. Flexural behaviour of reinforced self compacting concrete beams subjected to elevated temperature before and after retrofitting. *Journal of Structural Fire Engineering*, 12(3), 293-308.

- Sağlık, A., Tunç, E. ve Kocabeyler, M. F. 2007. Kimyasal ve mineral katkılarının kütle betonu tasarımında yeri ve önemi. 2. Betonda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 12-13 Nisan, İMO, Bildiri Özeti Kitabı, 277-297, Ankara.
- Sankaramoorthy, T., Karthikeyan, R., Pradeep, G. M., Athikesavan, D. ve Girimurugan, R. 2022. Improved performance of confinement of RC beam with glass fibre reinforced polymer laminates. Materials Today: Proceedings, 56, 3190-3195.
- SAP2000. 2021. Structural Analysis and Desing. Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- Saul, A. A. 1951. Principles Underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research, 2(6), 127-140.
- Shih, T. S., Lee, G. C. ve Chang, K. C. 1987. Local concrete-steel bond behavior at low temperature. Journal of Structural Engineering, 113(11), 2278-2289.
- Souder, W. H. ve Hidnert, P. 1919. Thermal Expansion of Insulating Materials. Scientific Paper of the Bureau of Standards, (15), 387-417.
- Şimşek, O. 2004. Eğik yüzeyli betonlara farklı kür metotlarının etkisi. İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) Teknik Dergi, 3229-3233.
- Tanyıldız, H. ve Yazıcıoğlu, S. 2006. Betonarme demiri ve beton arasındaki aderans dayanımına kür koşullarının etkisi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 11-14.
- Tariq, F., Gaikwad, M. ve Bhargava, P. 2021. Analysis of behaviour of corroded RC beams exposed to elevated temperatures. Journal of Building Engineering, 42.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Tekla Structures. 2021. Desing of Steel Construction. Türkiye.
- Testlab Basic. 2021. Teknik Destek Grubu Veri Toplama Yazılımı. Erzurum Teknik Üniversitesi Lisansı, Türkiye.
- Topçu, İ. B. ve Akman, A. 2005. Kalıp sökme sürelerinin olgunlukla belirlenmesi. Kocaeli Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Bildiri Özet Kitabı, 864-869, Kocaeli.
- Topçu, İ. B. ve Karakurt, C. 2002. Farklı çimentolar ile üretilen betonlarda olgunluk kavramı. Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu (ECAS 2002), 14 Ekim, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bildiri Özeti Kitabı, 477-484, Ankara.
- TS 1247. 2018. Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Şartlarında). Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 13508. 2012. Olguluk Yöntemi ile Beton Dayanımının Tahmini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

- TS 708. 2016. Çelik - Betonarme İçin - Donatı Çeliği. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. 2019. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5 . 2021. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6. 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12504-2. 2021. Yapılarda Beton Deneyleri-Bölüm 2: Tahribatsız Muayene - Geri Sıçrama Sayısının Belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12504-4. 2021. Yapılarda Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206+A2. 2021. Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Turgut, P. ve 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.
- Uysal, A. 2004. Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, İstanbul.
- Uysal, A. 2006. Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, Ankara.
- Üte, A. A. 2012. Folkart towers temel kütle betonunda sıcaklık kontrolü. Hazır Beton Dergisi, 73-83.
- Wang, N., Luo, K., Peng, K., Li, J., Lu, Z., Xia, Y., Lin, Y. ve Zhong, W. 2022. Thermal deformation and microstructure characteristics of low-heat Portland cement-based concrete in a high plateau environment. Journal of Building Engineering, 58.
- Yavuzcan, A. 2008. Betonarme kirişlerde çatlakların epoksi enjeksiyonu ile onarımının eğilme rijitliği üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 165, Ankara.
- Yazıcı, Ş. ve İnan Sezer, G. 2016. Farklı kür yöntemlerinin üçüncü kül içeren harçların eğilme ve basınç dayanımına etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 396-399, Denizli.

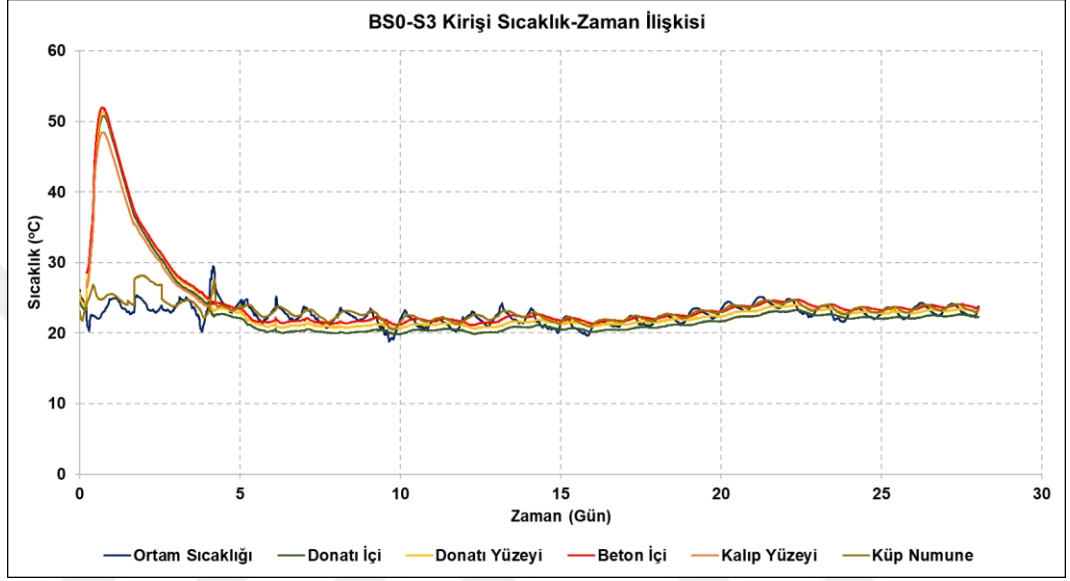
- Zhang, D. ve Shao, Y. 2016. Early age carbonation curing for precast reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 134-143.
- Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M. ve Frangopol, D. M. 2019. Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method. *Engineering Structures*, 192, 30-52.



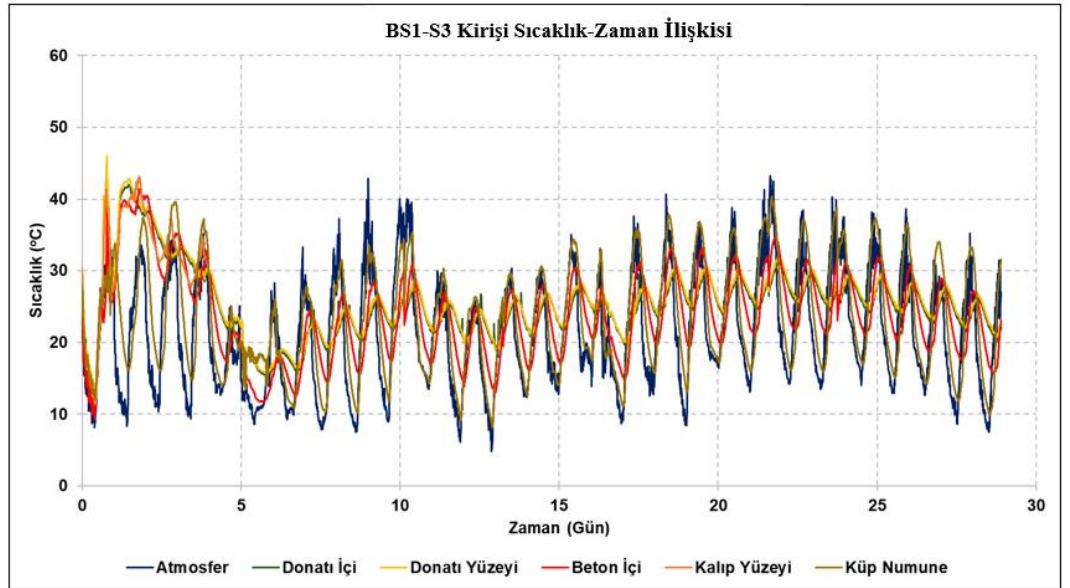
EKLER

EK-1

K3 Kesitli Kirişlere Ait 28 Günlük Sıcaklık Takip Grafikleri



Şekil 1. BS0-S3 28 Günlük sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 2. BS1-S3 28 Günlük sıcaklık-zaman grafiği

EK-2

Betonarme Kiriş Deney Gözlemleri

Tez çalışması kapsamında 6 adet kirişe dört noktalı eğilme deneyi uygulanmış ve bu deneye ait detaylar her kişinin kodu ile sunulmuştur. Deney düzeneğinin kurulması ve mevsime bağlı olarak üretimi gerçekleştirilen betonarme kiriş numuneleri, deney gününe kadar geçen sürede değişiklikler göstermiş fakat beton dökümünün 28. gününden önce hiçbir numuneye eğilme deneyi uygulanmamıştır.

Deneylerin ilk detaylı anlatımında kiriş numunesinin sisteme yerleştirilme görseliyle başlamış olup, deney numunesine ait döküm ortamı ve bakım durumunun belirtilmesiyle devam edilmiş ve ardından eğilme deneyine tabi tutulan kirişlerin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır.

Eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme (P- δ) grafiği sunulmuştur. Bu grafik üzerinde eğilme deneyinde meydana gelen İlk çatlak, akma, basınç bölgesinde beton ezilmesi, basınç bölgesindeki donatı burkulması ve eğilme deneyinde ulaşılan maksimum yük noktaları belirtilerek sunulmuştur. Aynı zamanda bu grafik üzerinde teorik ve deneysel malzeme dayanımlarıyla hesaplanan moment taşıma kapasitesi karşılık gelen yükler de sınır olarak belirtilmiştir. Ek olarak, yapılan teorik hesaplamalar ile deney sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Deneyin sonlanması ardından; deney sonrası fotoğrafı, eğilme numunesinin çatlak desenlerinin AUTOCAD (2022) programında çizilmiş görseli ve çeşitli yazılımlar kullanılarak eğilme deneyinde meydana gelen çatlaklar, numune üzerinde fotoğraflanarak sunulmuştur.

Bahsi geçen bu sıralama takip edilmiş ve her deney numunesine detaylıca yer verilmiştir.

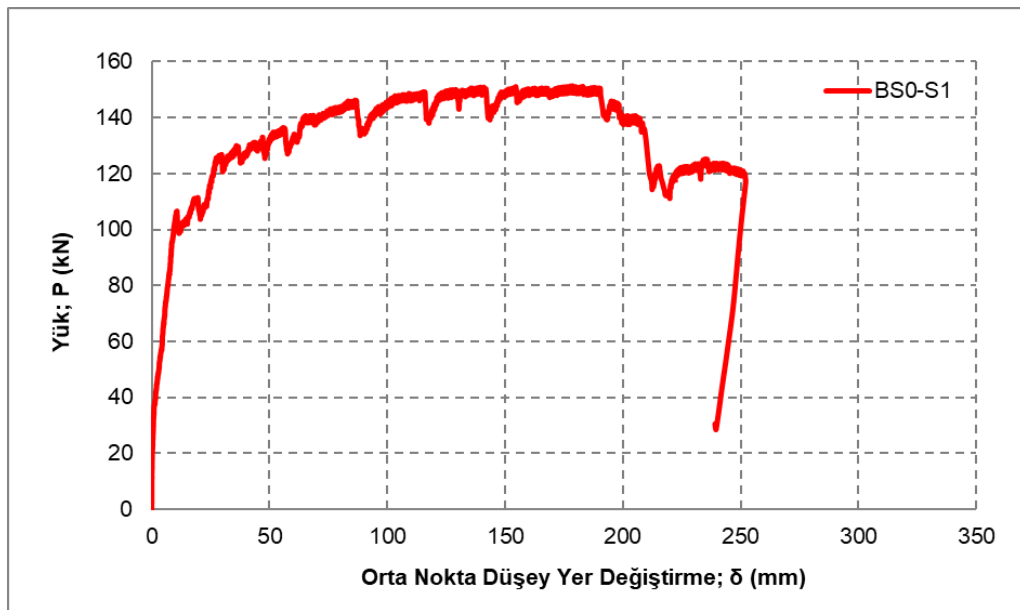
1. BS0-S1

BS0-S1 kodlu betonarme kiriş; Laboratuvar koşullarında 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılan ve laboratuvar ortamında deney gününe kadar oda sıcaklığında bekletilen S1 kesitli deney numunesidir. Deneye tabi tutulduğu gün beton dayanımı 32 MPa olarak belirlenen kiriş numunesinin deney öncesi genel görünümü Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1. BS0-S1 kirişi deney öncesi görünümü

BS0-S1 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 2’de sunulmaktadır.

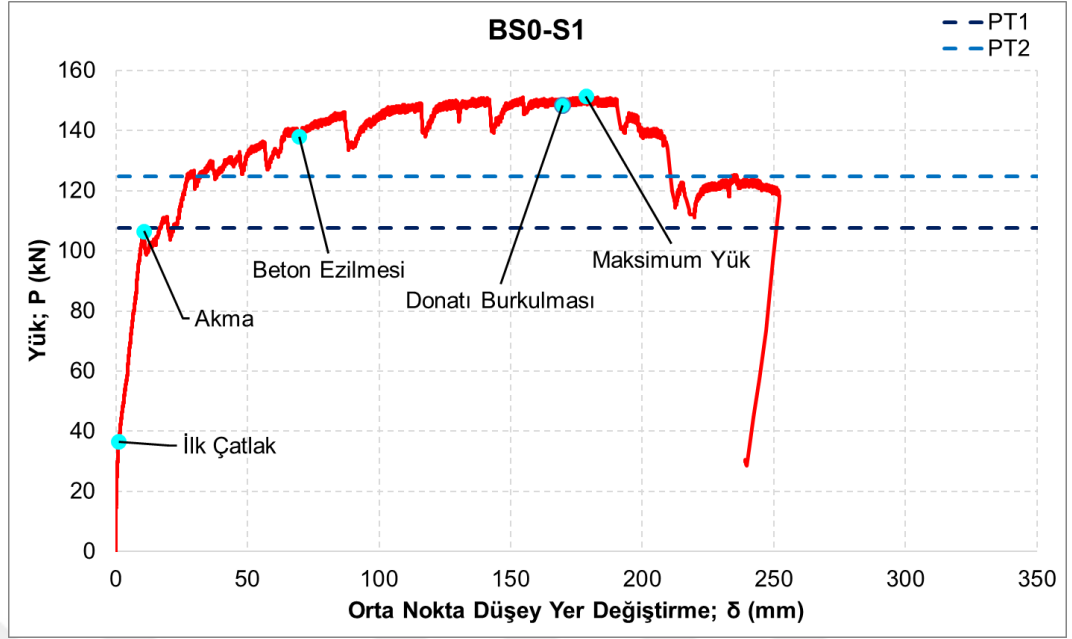


Şekil 2. BS0-S1 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS0-S1 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 1,00 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=30,16$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=87,93$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 10,73 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. $M=113,87$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 69,55 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. $M=122,34$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 169,56 mm orta nokta düşey yer değiştirme etkisi altında basınç bölgesindeki donatı burkulmuştur. BS0-S1 numunesi 178,57 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=124,89$ kN.m ile ulaşmıştır. Orta nokta düşey yer değiştirmesi 271,66 mm değerine ulaşıldığı anda deney sonlandırılmıştır.

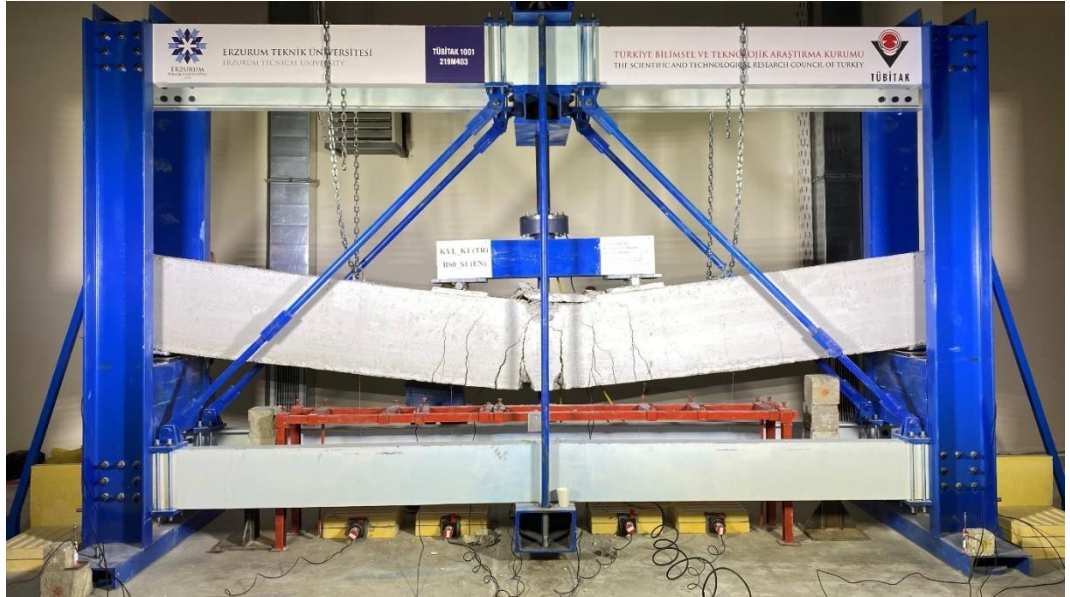
BS0-S1 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır. Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}= 88,70$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 107,52$ kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}= 102,95$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 124,79$ kN olarak hesaplanmıştır.

BS0-S1 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 3'te sunulmaktadır.

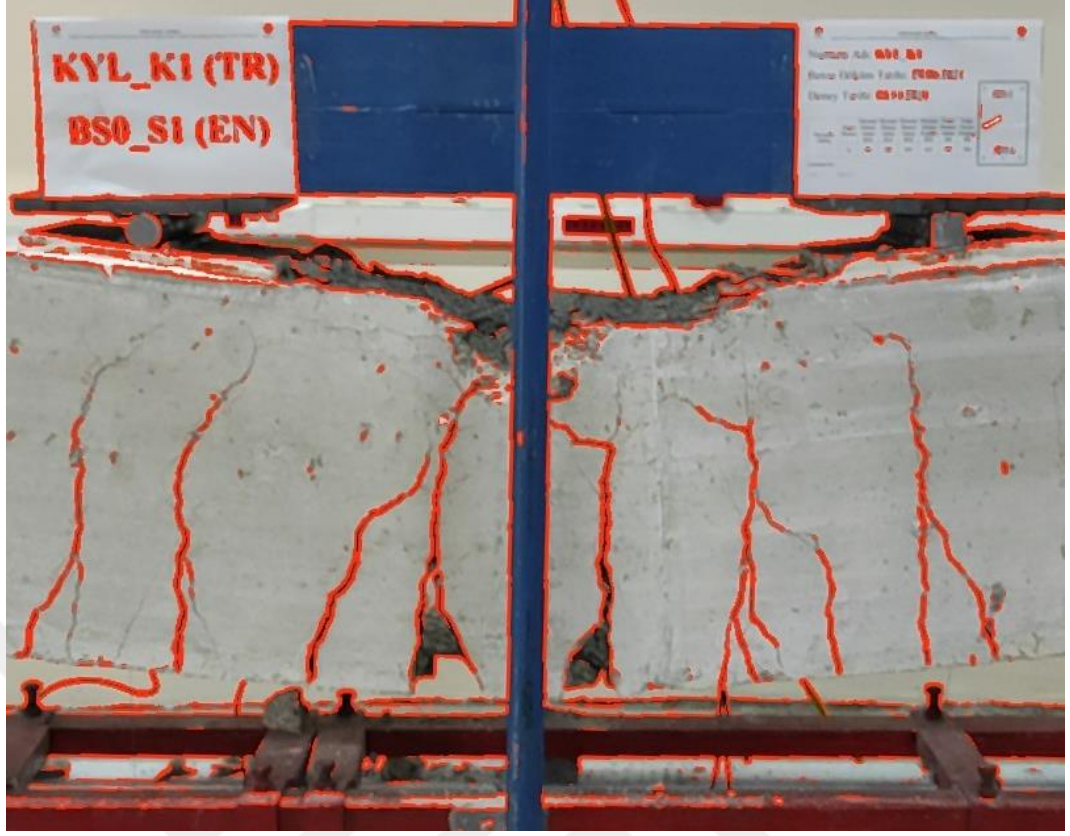


Şekil 3. BS0-S1 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

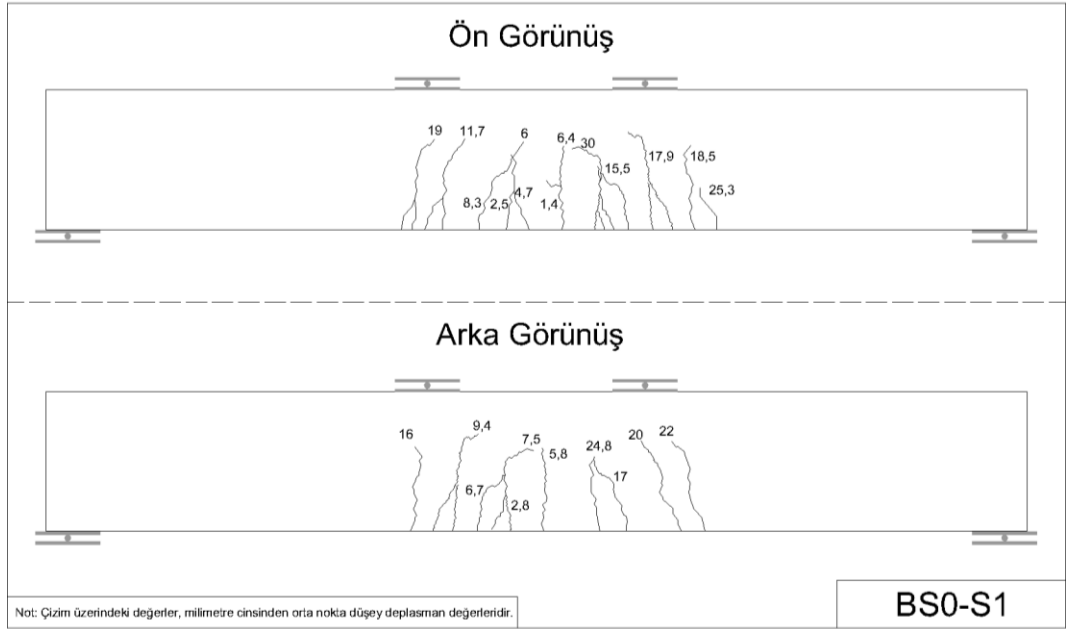
BS0-S1 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 3'te, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel olarak vurgulandığı görsel Şekil 4'te ve çatlak desen çizimleri Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 4. BS0-S1 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 5. BS0-S1 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı



Şekil 6. BS0-S1 kirişi çatlak desen çizimleri

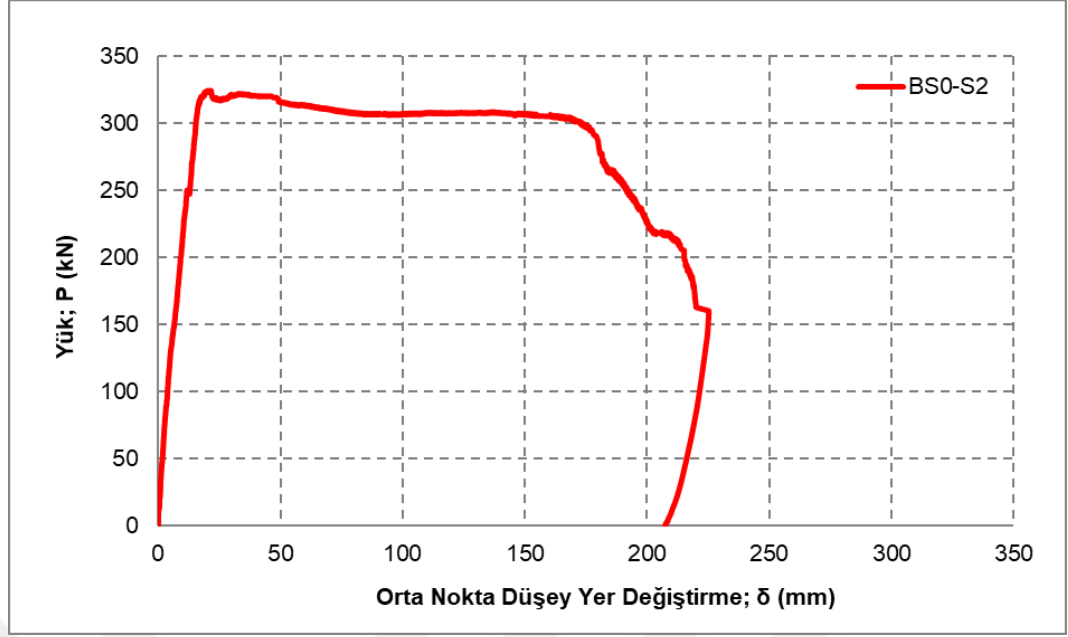
2. BS0-S2

BS0-S2 kodlu betonarme kiriş; Laboratuvar koşullarında 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılan ve laboratuvar ortamında deney gününe kadar oda sıcaklığında bekletilen S2 kesitli deney numunesidir. Deneye tabi tutulduğu gün beton dayanımı 32 MPa olarak belirlenen kiriş numunesinin deney öncesi genel görünümü Şekil 7’de sunulmaktadır.



Şekil 7. BS0-S2 kirişi deney öncesi görünümü

BS0-S2 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 8’de sunulmaktadır.



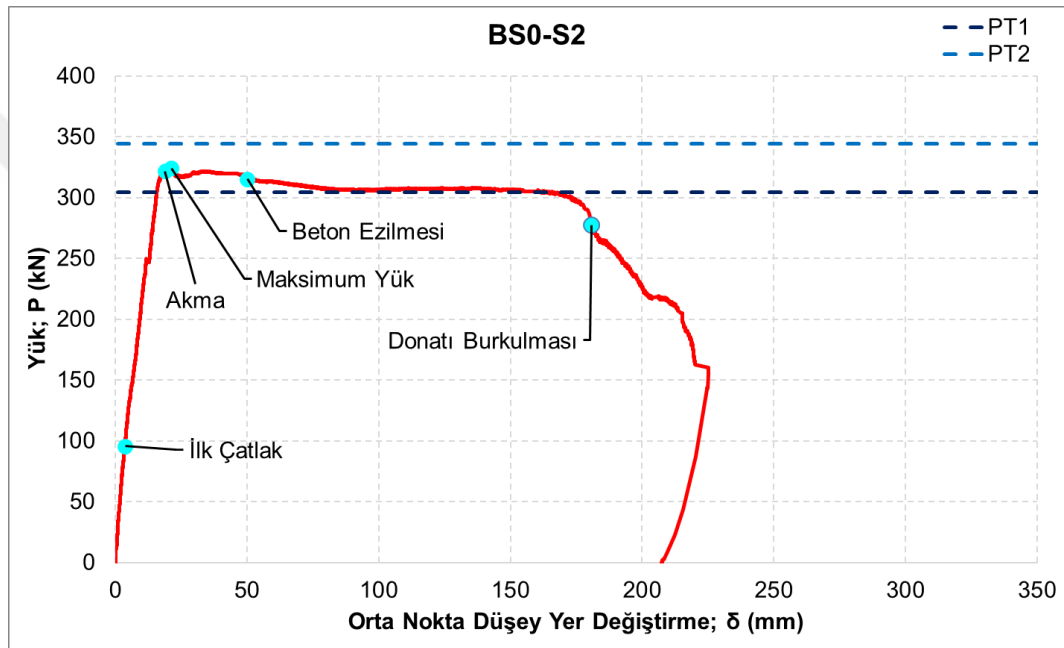
Şekil 8. BS0-S2 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS0-S2 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 3,67 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=79,00$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=265,47$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 18,84 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. BS0-S2 numunesi 21,16 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=267,48$ kN.m ile ulaşmıştır. $M=260,21$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 50,09 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. $M=229,21$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 180,73 mm orta nokta düşey yer değiştirme etkisi altında basınç bölgesindeki donatı burkulmuştur. Orta nokta düşey yer değiştirmesi 225,19 mm değerine ulaşıldığı anda deney sonlandırılmıştır.

BS0-S2 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır.

Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}=251,36$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 304,67$ kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}=284,40$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 344,73$ kN olarak hesaplanmıştır.

BS0-S2 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 9’da sunulmaktadır.

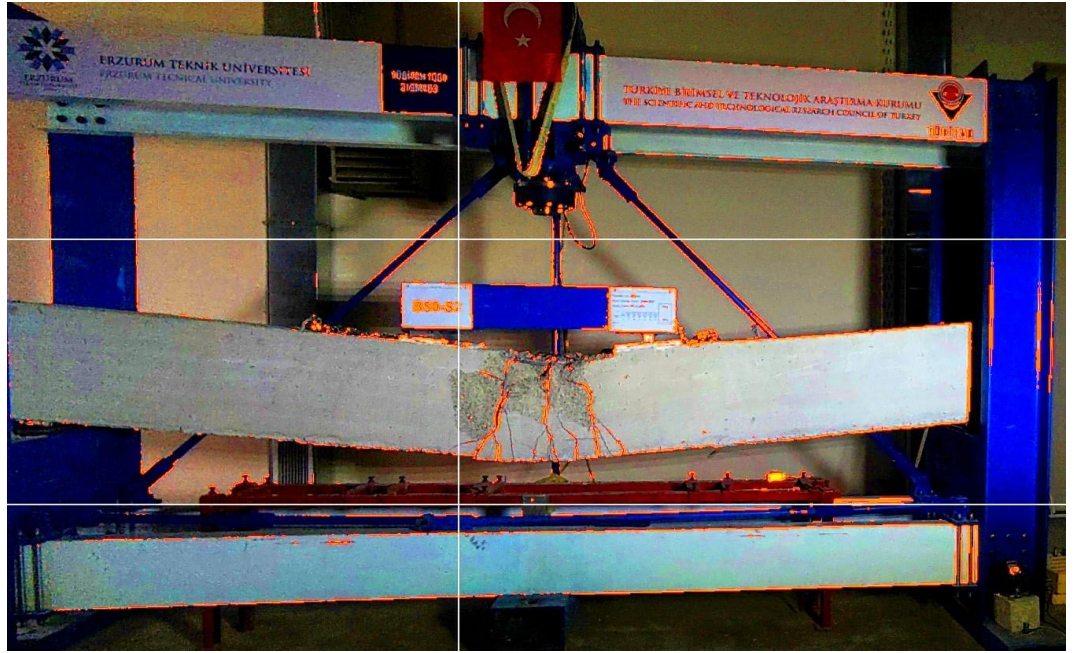


Şekil 9. BS0-S2 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

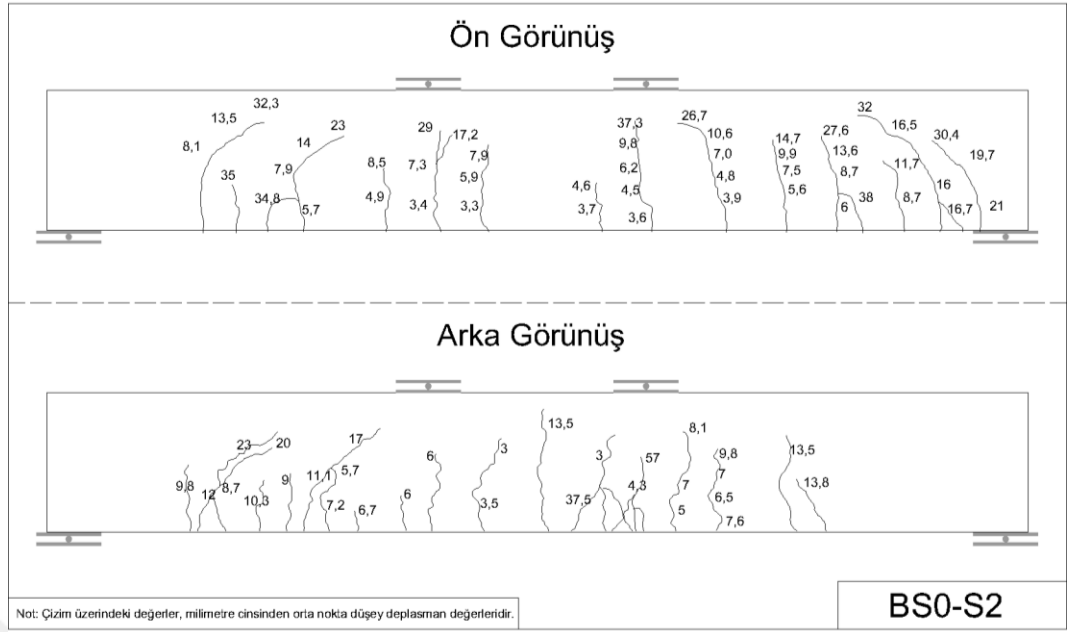
BS0-S2 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 10’da, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel olarak vurgulandığı görsel Şekil 11’de ve çatlak desen çizimleri Şekil 12’de sunulmaktadır.



Şekil 10. BS0-S2 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 11. BS0-S2 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı



Şekil 12. BS0-S2 kirişi çatlak desen çizimleri

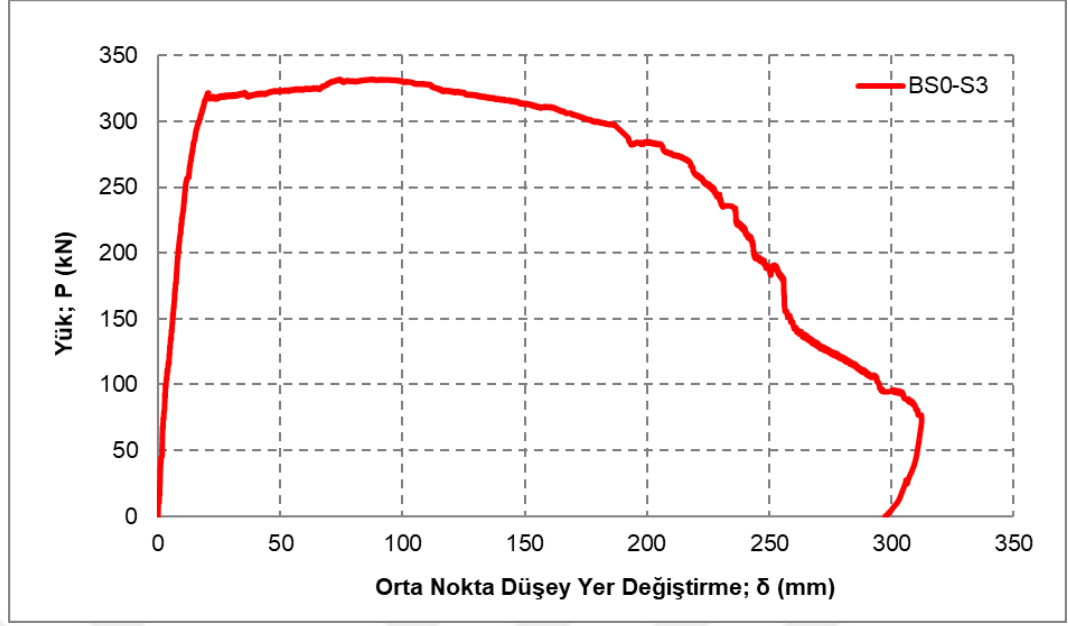
3. BS0-S3

BS0-S3 kodlu betonarme kiriş; Laboratuvar koşullarında 29.06.2021 tarihinde imalatı yapılan ve laboratuvar ortamında deney gününe kadar oda sıcaklığında bekletilen S3 kesitli deney numunesidir. Deneye tabi tutulduğu gün beton dayanımı 30 MPa olarak belirlenen kiriş numunesinin deney öncesi genel görünümü Şekil 13'te sunulmaktadır.



Şekil 13. BS0-S3 kirişi deney öncesi görünümü

BS0-S3 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 14'de sunulmaktadır.



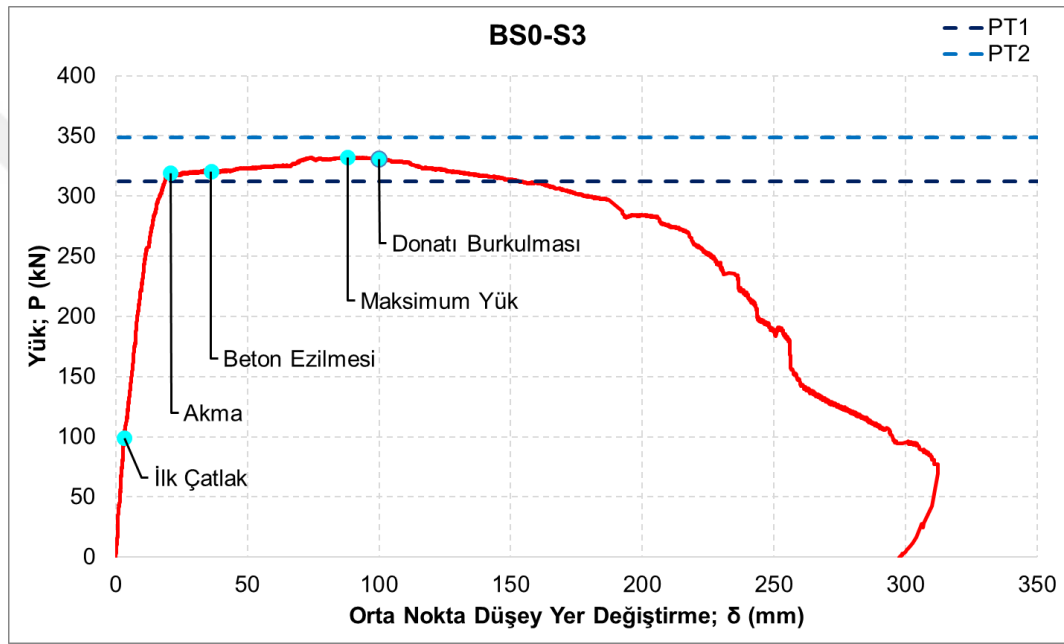
Şekil 14. BS0-S3 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS0-S3 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 3,20 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=81,51$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=263,40$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 20,74 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. $M=264,26$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 36,09 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. BS0-S3 numunesi 87,98 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=274,04$ kN.m ile ulaşmıştır. 100,02 mm orta nokta düşey yer değiştirmeye denk gelen $M=272,76$ kN.m eğilme momenti altında basınç bölgesindeki donatılardan biri burkulmuştur. Orta nokta düşey yer değiştirmesi 312,26 mm değerine ulaşıldığı anda deney sonlandırılmıştır.

BS0-S3 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır.

Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}=257,78$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 312,46$ kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}=287,81$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 348,87$ kN olarak hesaplanmıştır.

BS0-S3 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 15’te sunulmaktadır.

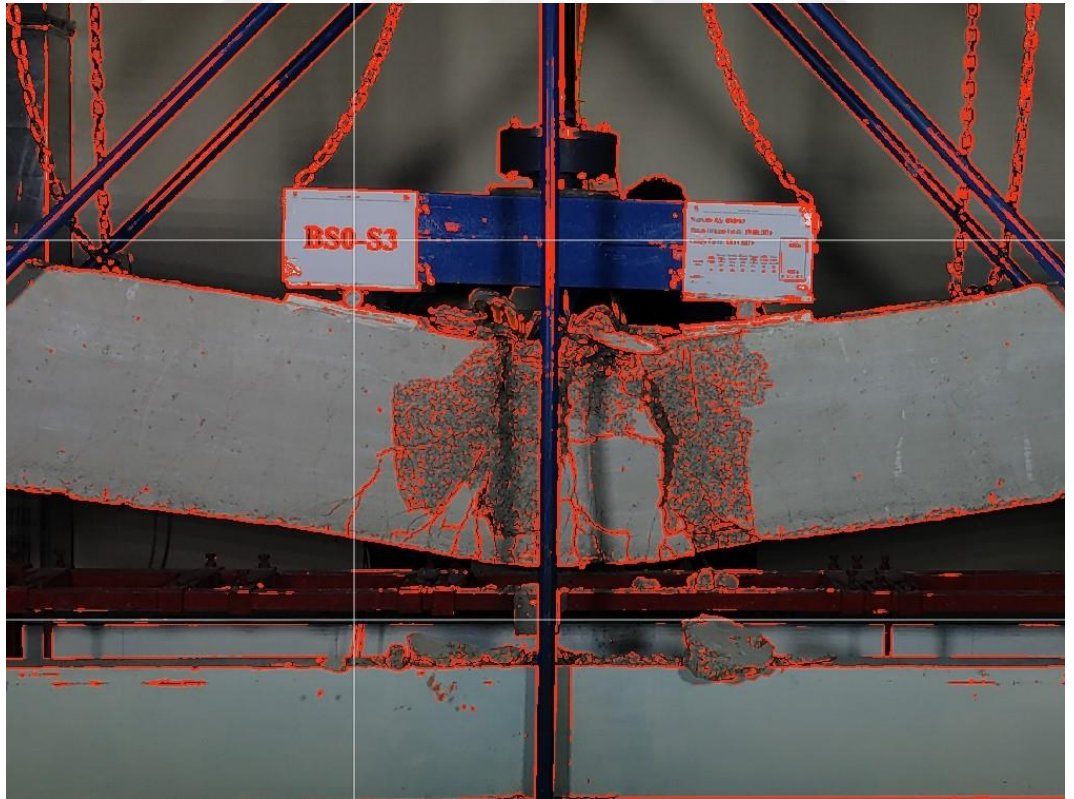


Şekil 15. BS0-S3 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

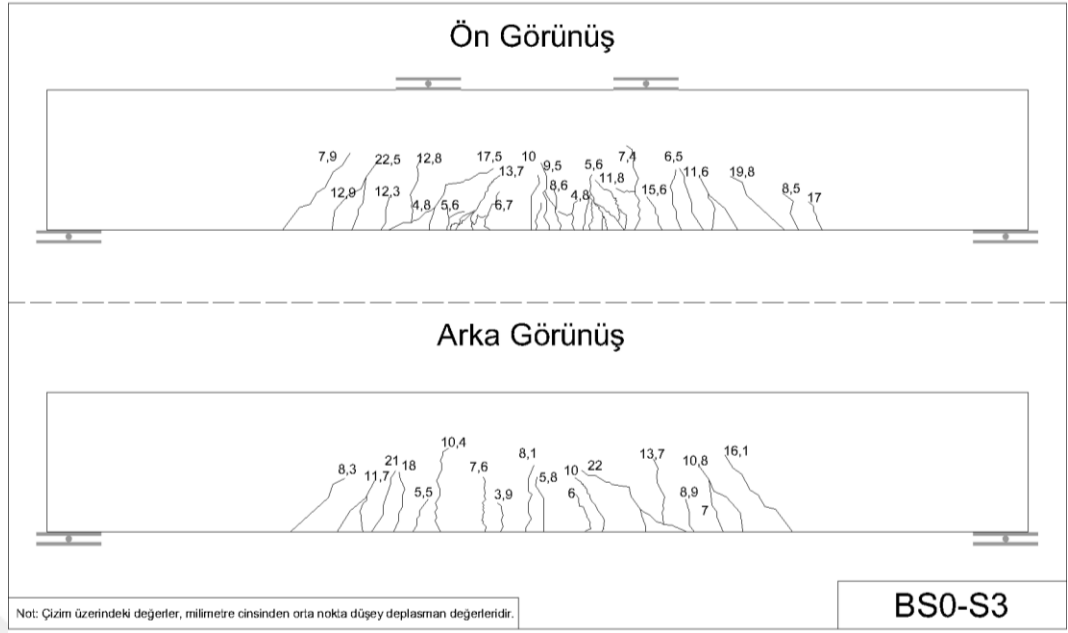
BS0-S3 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 16’da, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel olarak vurgulandığı görsel Şekil 17’de ve çatlak desen çizimleri Şekil 18’de sunulmaktadır.



Şekil 16. BS0-S3 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 17. BS0-S3 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı



Şekil 18. BS0-S3 kirişi çatlak desen çizimleri

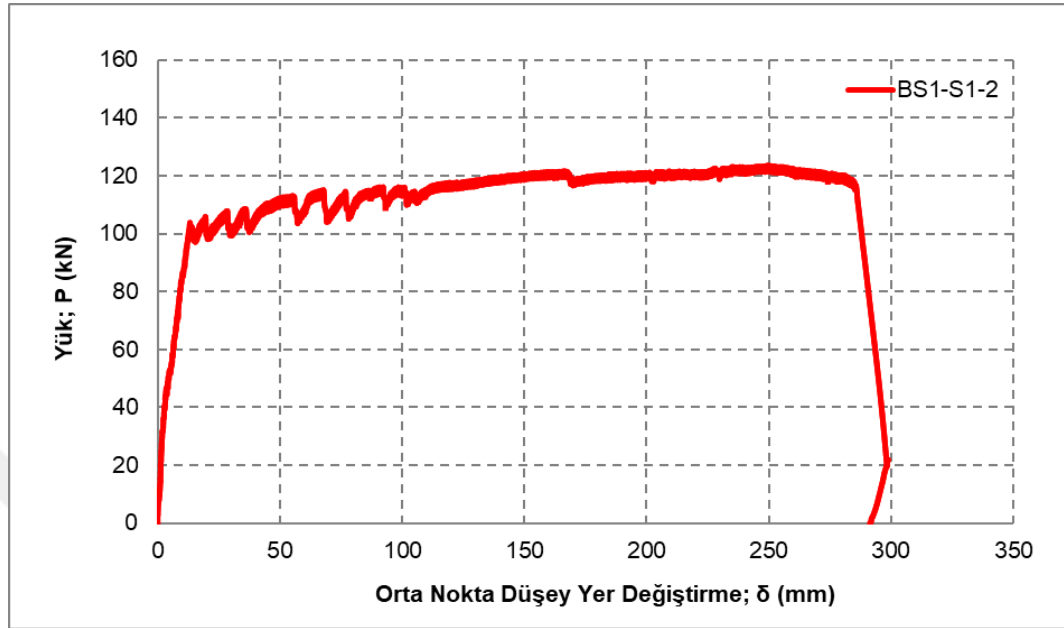
4. BS1-S1

BS1-S1 kodlu betonarme kiriş; Yaz koşullarında 18.06.2022 tarihinde atmosfere açık dış ortamda imalatı yapılan ve deney gününe kadar atmosferik koşullarda bekletilen S1 kesitli deney numunesidir. Deneye tabi tutulduğu gün beton dayanımı 29 MPa olarak belirlenen kiriş numunesinin deney öncesi genel görünümü Şekil 19’da sunulmaktadır.



Şekil 19. BS1-S1 kirişi deney öncesi görünümü.

BS1-S1 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 20’de sunulmaktadır.

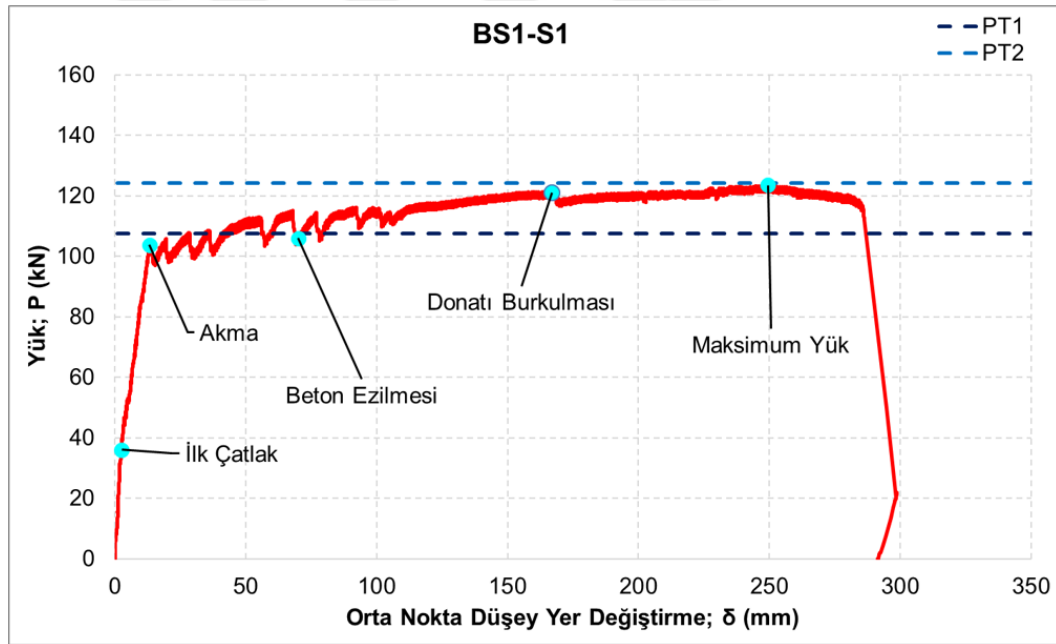


Şekil 20. BS1-S1 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS1-S1 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 2,49 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=29,74$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=58,67$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 13,21 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. $M=87,48$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 70,04 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M=99,85$ kN.m eğilme momenti etkisi altında basınç bölgesindeki donatı burkulmuş, orta noktada 167,02 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. BS1-S1 numunesi 249,39 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=101,95$ kN.m ile ulaşmıştır. Çekme bölgesindeki boyuna donatılardan birinin kopması neticesinde deney 283,91 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi değerine ulaşıldığı anda sonlandırılmıştır.

BS1-S1 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır. Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}=88,70 \text{ kN.m}$ bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 107,52 \text{ kN}$ olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}=102,61 \text{ kN.m}$ bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 124,38 \text{ kN}$ olarak hesaplanmıştır.

BS1-S1 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 21’de sunulmaktadır.

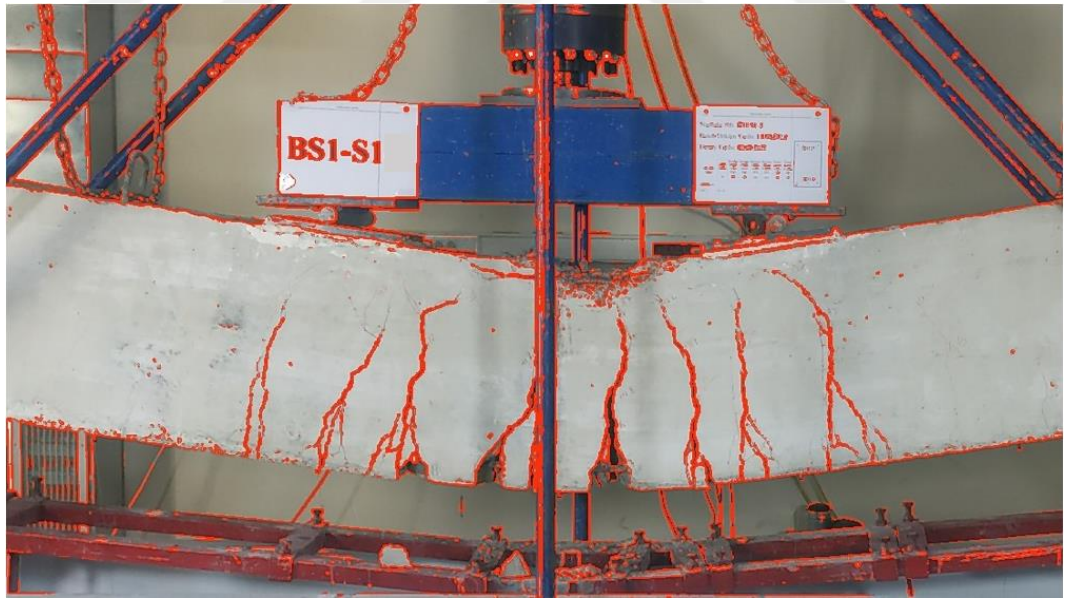


Şekil 21. BS1-S1 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS1-S1 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 22’de, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel olarak vurgulandığı görsel Şekil 23’te ve çatlak desen çizimleri Şekil 24’te sunulmaktadır.

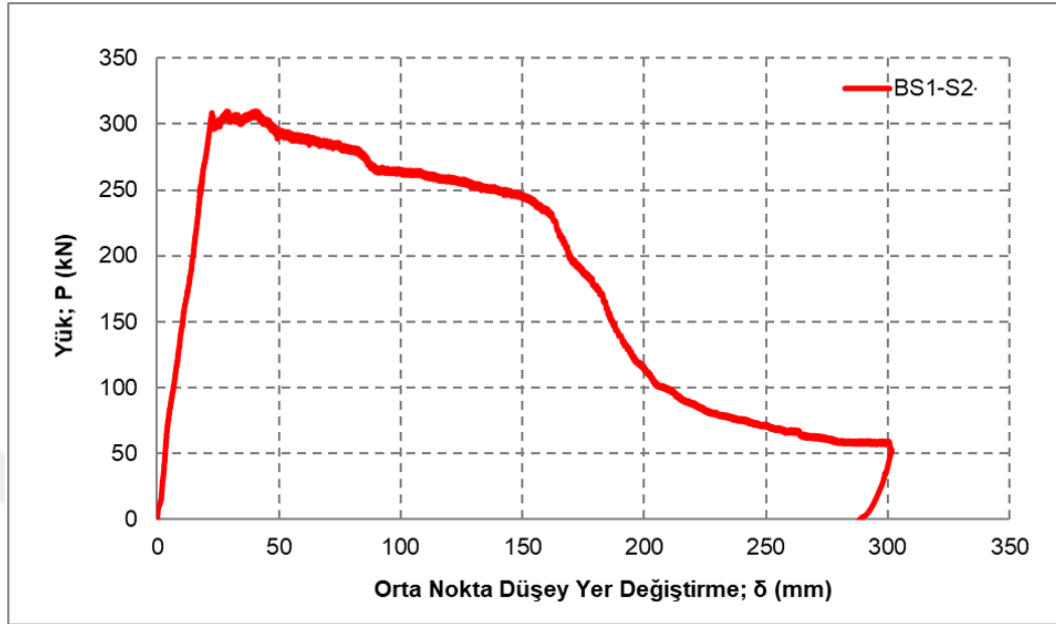


Şekil 22. BS1-S1 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 23. BS1-S1 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı

BS1-S2 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 26’da sunulmaktadır.



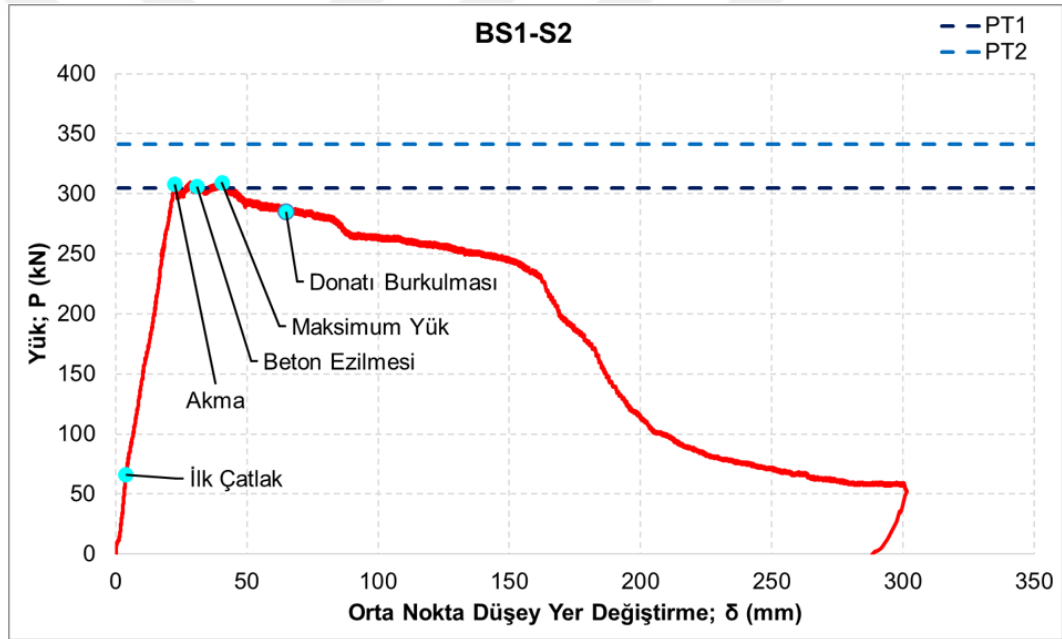
Şekil 26. BS1-S2 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS1-S2 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 3,85 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=54,53$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=254,05$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 22,40 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. $M=252,55$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 30,99 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. BS1-S2 numunesi 40,41 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=255,56$ kN.m ile ulaşmıştır. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M=235,11$ kN.m eğilme momenti etkisi altında basınç bölgesindeki donatı burkulmuş, orta noktada 65,01 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. Deney 300,78 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi değerine ulaşıldığı anda sonlandırılmıştır.

BS1-S2 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama;

Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır. Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}=251,36$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 304,67$ kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}=281,36$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 341,04$ kN olarak hesaplanmıştır.

BS1-S2 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 27’de sunulmaktadır.

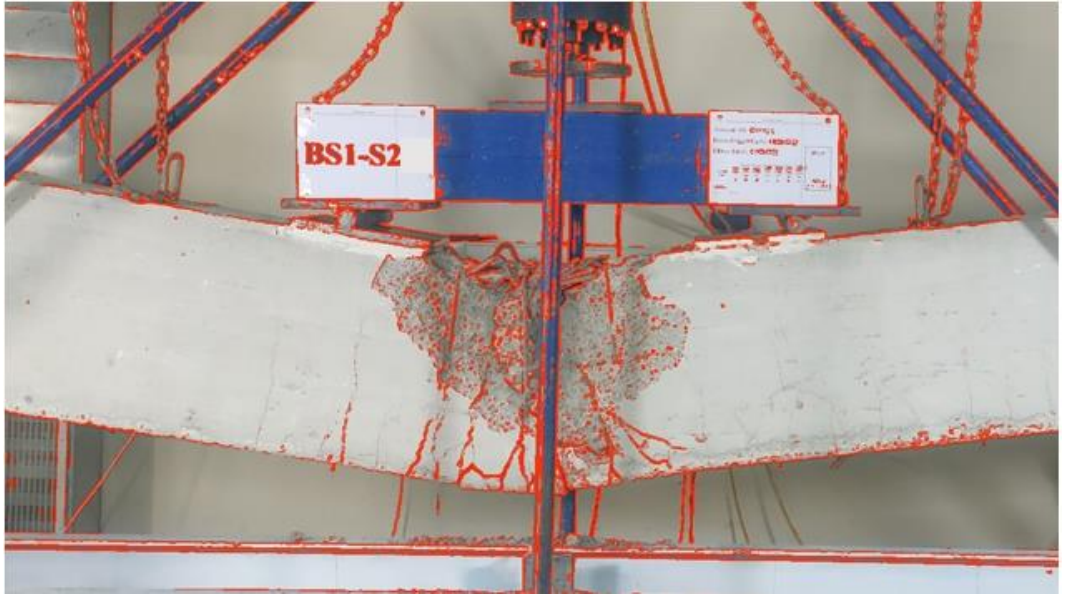


Şekil 27. BS1-S2 kirişi noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

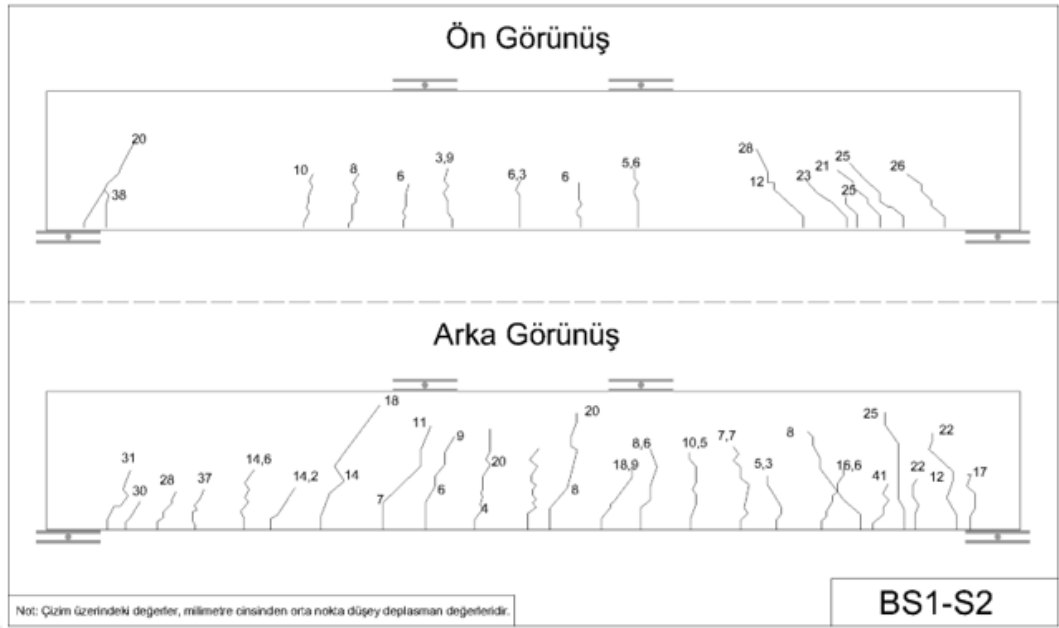
BS1-S2 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 28’de, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel olarak vurgulandığı görsel Şekil 29’da ve çatlak desen çizimleri Şekil 30’da sunulmaktadır.



Şekil 28. BS1-S2 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 29. BS1-S2 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı



Şekil 30. BS1-S2 kirişi çatlak desen çizimleri

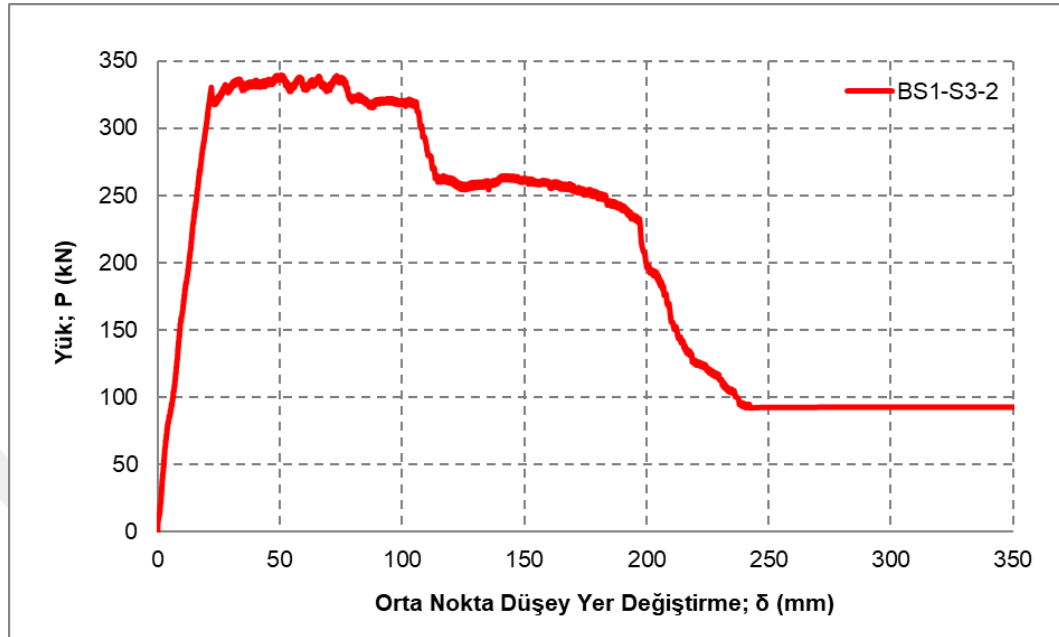
9.BS1-S3

BS1-S3 kodlu betonarme kiriş; Yaz koşullarında 18.06.2022 tarihinde atmosfere açık dış ortamda imalatı yapılan ve deney gününe kadar atmosferik koşullarda bekletilen S3 kesitli deney numunesidir. Deneye tabi tutulduğu gün beton dayanımı 29 MPa olarak belirlenen kiriş numunesinin deney öncesi genel görünümü Şekil 49’da sunulmaktadır.



Şekil 49. BS1-S3-2 kirişi deney öncesi görünümü

BS1-S3 kirişinin Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 50’de sunulmaktadır.



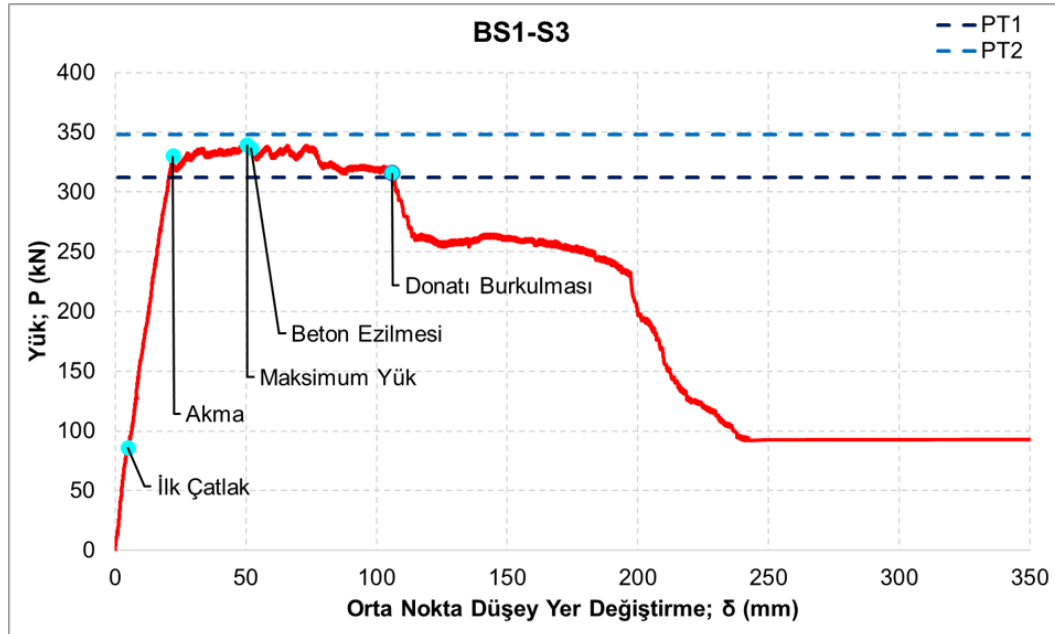
Şekil 50. BS1-S3-2 kirişi yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS1-S3 kirişinde ilk çatlak maksimum moment bölgesinin yaklaşık olarak orta kısmında 4,74 mm düşey yer değiştirmenin meydana geldiği $M_{cr}=71,15$ kN.m eğilme momenti etkisi altında meydana gelmiştir. Yüklemin ilerleyen aşamalarında öncelikle maksimum moment bölgesinde ve sonrasında maksimum moment bölgesi ile mesnetler arasında eğilme çatlakları oluşmuş; devamında çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M_y=272,65$ kN.m eğilme momenti etkisi altında akmış ve akma anında orta noktada 21,98 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. BS1-S3 numunesi 50,37 mm orta nokta çökmesiyle birlikte taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerine $M_{maks}=280,12$ kN.m ile ulaşmıştır. $M=277,93$ kN.m eğilme momenti ve aynı anda ölçülen 52,03 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi etkisi altında basınç bölgesinde beton ezilmeye başlamıştır. Kiriş; maksimum moment bölgesinde $M=260,62$ kN.m eğilme momenti etkisi altında basınç bölgesindeki donatı burkulmuş, orta noktada 106,05 mm düşey yer değiştirme ölçülmüştür. $M=200,33$ kN.m eğilme momenti değeri ve bu moment değerine karşılık gelen 184,11 mm düşey orta nokta yer değiştirme değerine ulaştığında, kirişteki etriye açılmıştır. $M=176,11$ kN.m eğilme momenti değeri ve bu moment değerine karşılık gelen 198,05 mm düşey orta nokta yer değiştirme değerine ulaştığında, enine donatılarla boyuna donatıları birbirine

bağlayan bağ teli kopmuştur. Deney 300,78 mm orta nokta düşey yer değiştirmesi değerine ulaşıldığı anda sonlandırılmıştır.

BS1-S3 kirişinin taşıma gücü metoduna göre kiriş moment taşıma kapasitesi, deneysel ve teorik malzeme dayanımlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplama; Betonun basınç dayanım sınıfı C30/37, çeliğin akma dayanımı sınıfı S420 kabulüne göre kesit taşıma momenti hesaplanmıştır. Deneysel hesaplama; deneye tabi tutulduğu gün beton basınç dayanımı ve donatının deneysel akma dayanımına göre hesaplanmıştır. Teorik malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt1}=257,78$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT1 = 312,46$ kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel malzeme dayanımına ve taşıma gücü metoduna göre kirişin moment taşıma kapasitesi $M_{pt2}=287,28$ kN.m bu momente karşılık gelen yük değeri $PT2 = 348,22$ kN olarak hesaplanmıştır.

BS1-S3 kirişinin Noktasal Belirteçli Yük – Orta Nokta Düşey Yer Değiştirme grafiği Şekil 51’de sunulmaktadır.



Şekil 51. BS1-S3 kirişinin noktasal belirteçli yük – orta nokta düşey yer değiştirme grafiği

BS1-S3-2 kirişinin deney sonrası görüntüsü Şekil 52’de, deney bitiminde kiriş orta bölgesinden android işletim sistemli cep telefonu ile çekilen çatlak hasarının çizgisel

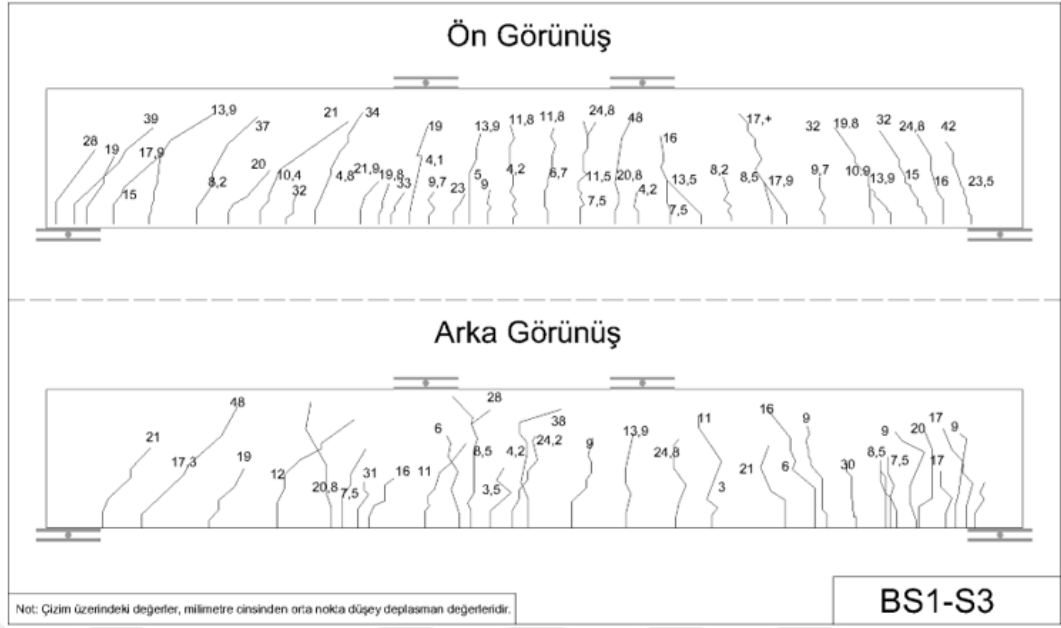
olarak vurgulandığı görsel Şekil 53’de ve çatlak desen çizimleri Şekil 54’te sunulmaktadır.



Şekil 52. BS1-S3-2 kirişi deney sonrası görünümü



Şekil 53. BS1-S3-2 kirişi orta bölgesi vurgulu çatlak hasarı fotoğrafı



Şekil 54. BS1-S3 kirişi çatlak desen çizimleri

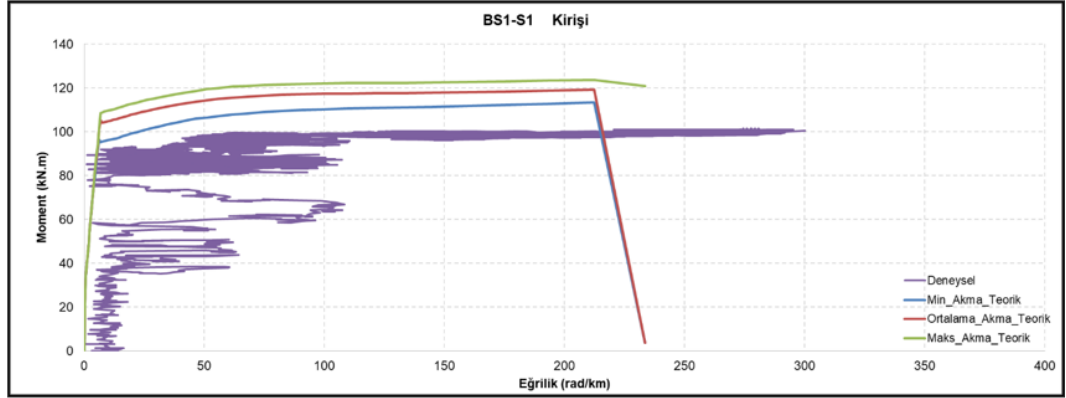
EK-3

Deneysel ve Teorik Moment-Eğrilik Grafikleri

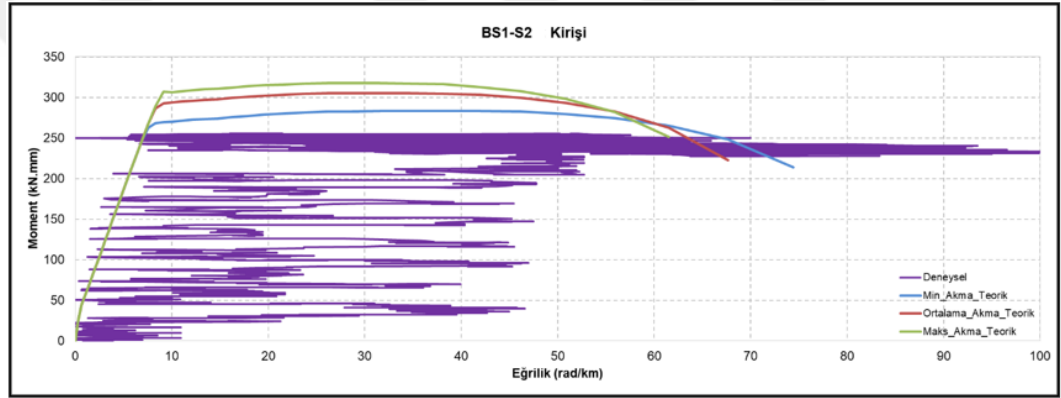
Tez çalışması kapsamında toplamda 6 adet 1:1 gerçek ölçekli betonarme kiriş imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan 6 kiriş numunesi 4 noktalı eğilme deneyi altındaki davranışı incelenmeye çalışılmıştır. En önemli ve ölçümü en zor olan moment-eğrilik ilişkisi bu parametrelerden biridir. Bu amaçla Pilot ve ilk 3 deneyde kiriş tam ortadan kesecek şekil sağ ve sol tarafından kirişin alt ucu ile üst ucuna 40 mm olacak şekilde toplam 4 sensör yerleştirilmiştir. Ancak ölçümlerin doğru sonuç vermeyeceği düşünülerek 4 adet sensör kirişin orta noktasında yukarıdan aşağıya dizilerek ölçüm alınmıştır. Yukarıdan aşağıya 4 sensör bağlanma nedeni sensörlerde oluşabilecek bir sıkıntıda diğer sensör ölçümlerinden yararlanmaktır. Ölçüm düzeneğine ait genel bilgiler “*MATERYAL ve YÖNTEM*” başlığı altında verilmiştir. Ölçümlerden elde edilen verilerle gerekli moment-eğrilik hesaplamaları yapılarak bu ikili arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler aşağıda sırasıyla sunulmaktadır. Grafiklerde “mor” renk ile elde edilen veriler, “*Response2000*” programında donatı akma deneylerinden elde edilen minimum, ortalama ve maksimum akma dayanımlarına göre yapılan kesit analizlerden; “mavi” renk ile minimum akma dayanımına göre, “kırmızı” ile ortalama akma dayanımına göre, “yeşil” renkle ise maksimum akma dayanımına göre elde edilen “Moment-Eğrilik” grafikleri üst üste çizdirilmiştir. Çekme deneylerinden laboratuvar koşullarında bekletilen boyuna çekme donatısı için sırasıyla minimum, ortalama ve maksimum akma dayanımı değerleri kullanılarak 3 ayrı teorik kesit analizi yapılmıştır. Bu analizlerde, basınç bölgesinde bulunan çekme ve basınç donatıları için ortalama akma dayanımları kullanılmıştır.

Numuneler döküm ortamının kodlarını ifade eden başlıklar altında S1, S2 ve S3’e ait moment-eğrilik ilişkisini içeren şekiller sunulmuştur. Bu şekil açıklamalarında, deneysel numunelerin hangi eğrilik değerinde sensörlerinin koptuğunu ve ölçümün devam ettirilemediğini açıklamaktadır.

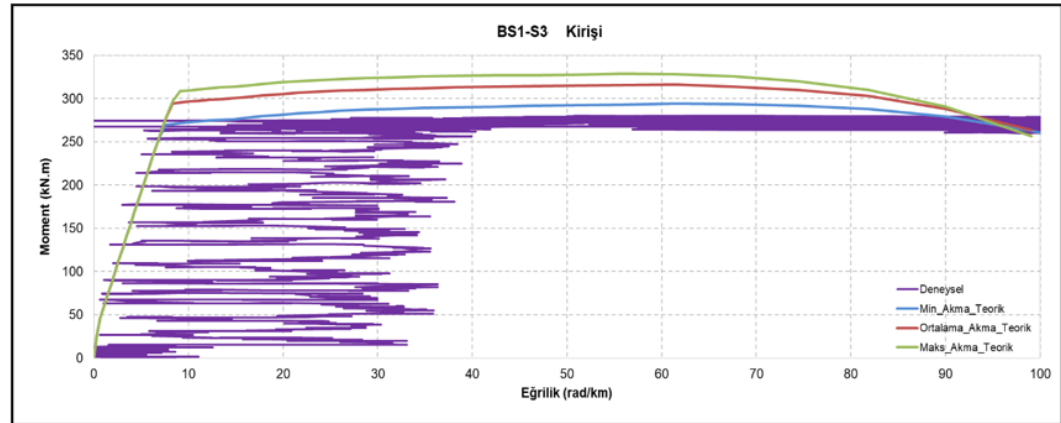
1. BS1-(S1-S2-S3)



Şekil 1. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 100,66 / eğrilik (rad/km); 300,14

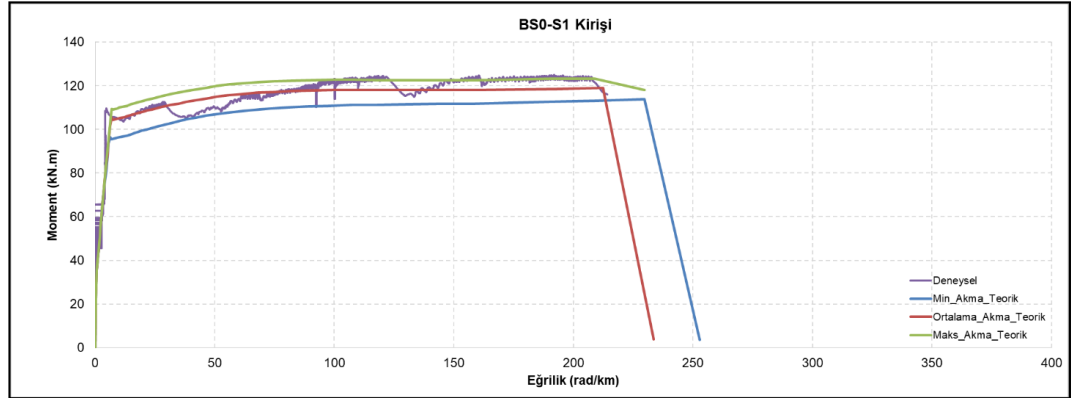


Şekil 2. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 233,04 / eğrilik (rad/km); 108,99

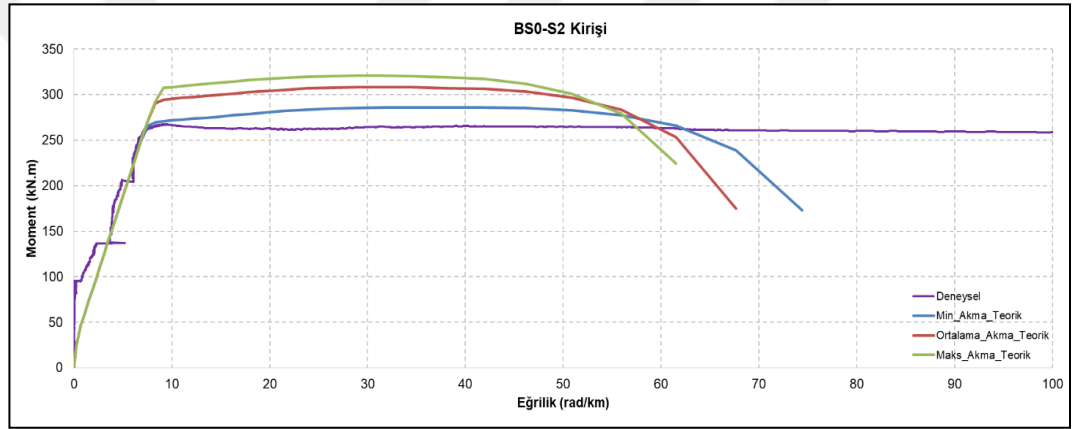


Şekil 3. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 251,36 / eğrilik (rad/km); 251,20

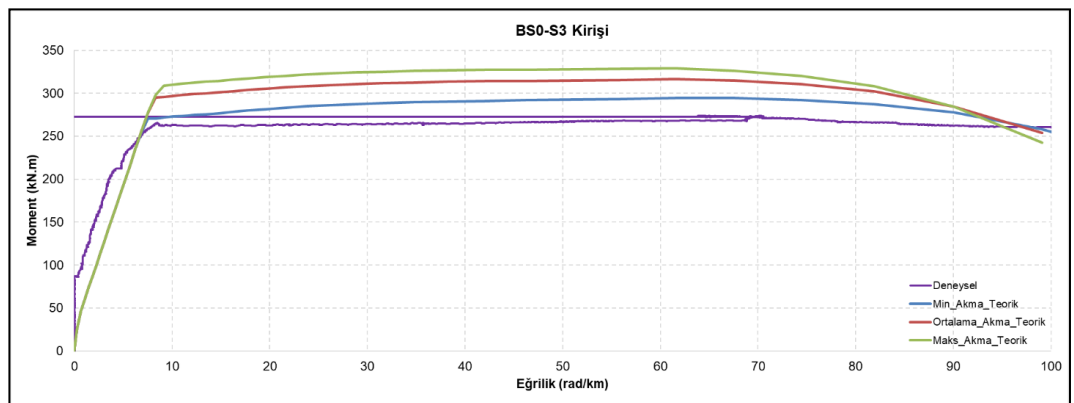
2. BS0-(S1-S2-S3)



Şekil 4. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 116,1 / eğrilik (rad/km); 214,2



Şekil 5. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 252,59 / eğrilik (rad/km); 255,12



Şekil 6. Sensör kopma noktası: moment (kN.m); 244,76 / eğrilik (rad/km); 154,88

EK-4

İdealize Edilmiş Moment-Eğrilik Grafikleri

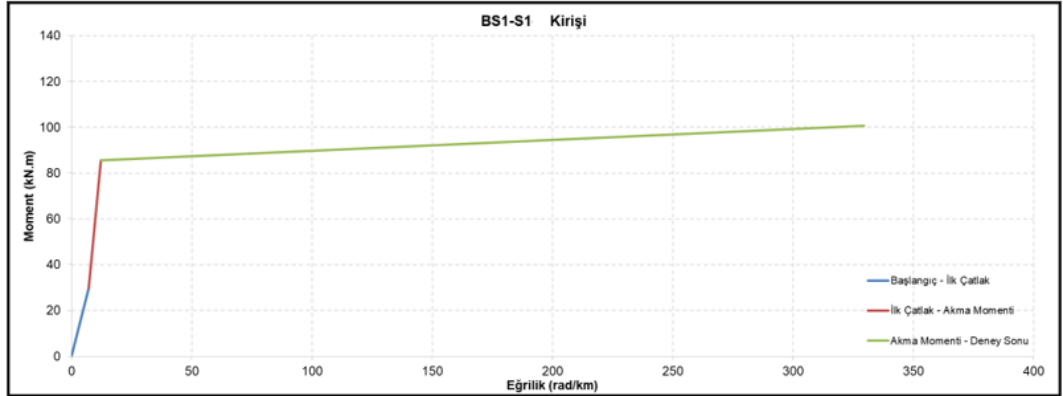
Tez çalışması kapsamında toplamda 6 adet 1:1 gerçek ölçekli betonarme kiriş imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan 6 kiriş numunesi 4 noktalı eğilme deneyi altındaki davranışı incelenmeye çalışılmıştır. En önemli ve ölçümü en zor olan Moment-Eğrilik ilişkisinden elde edilen eğriler üzerinde ve hesaplanan sayısal data üzerinden deneysel grafikler idealleştirilmeye, doğrusal olarak anlaşılması ve yorumlanabilmesi kolay bir formata dönüştürülmeye çalışılmıştır.

Her kiriş numunesinden elde edilen moment eğrilik ilişkisi incelenmiş ve “Başlangıç-İlk çatlak” arası olan bölgede ilk çatlağın oluştuğu momente kadar olan kısmın “mavi”, “İlk Çatlak-Akma Momenti” arası olan bölge “kırmızı”, “Akma Momenti-Maksimum Moment” arası olan bölge “yeşil” ve “Maksimum Moment-Deney Sonu” olan bölge “mor” renkli çubuklar ile doğrusallaştırılmış grafikler üretilmiştir.

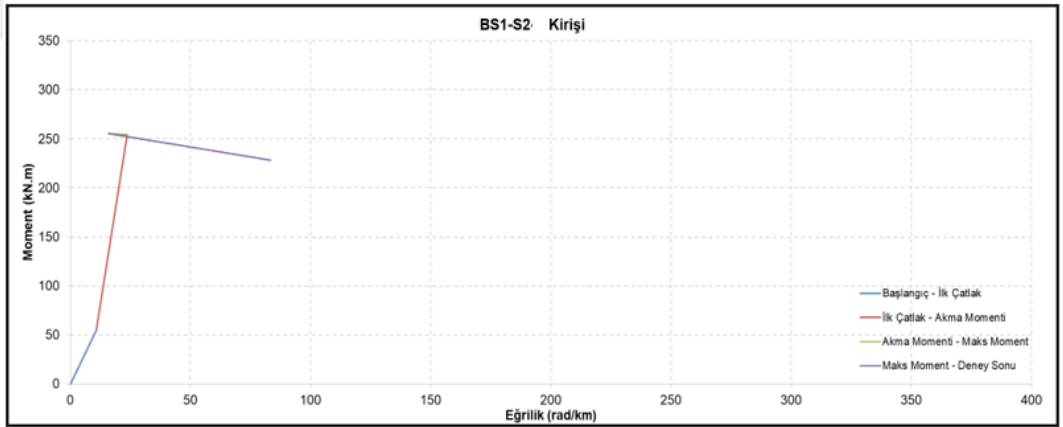
Grafik incelendiğinde ilk çatlaktan sonra meydana gelen rijitlik kaybı veya kazancı daha rahat gözlenmekte ve yorumlanması daha kolay bir grafik sunulmaktadır. Buna ek olarak akma momentine ulaştıktan sonra yeşil renkli doğrunun maksimum momente ulaşması ve sonrasında deney sonuna doğru momentin düştüğü renklendirmelerle daha rahat yorumlanmaktadır.

Her bir kiriş numunesi için bu idealleştirme yapılmış olup sırasıyla kesitlerin moment-eğrilik ilişkisi ve metnin sonunda S1, S2 ve S3 kesitlerinin toplu olarak karşılaştırmalı grafikleri sunulmuştur.

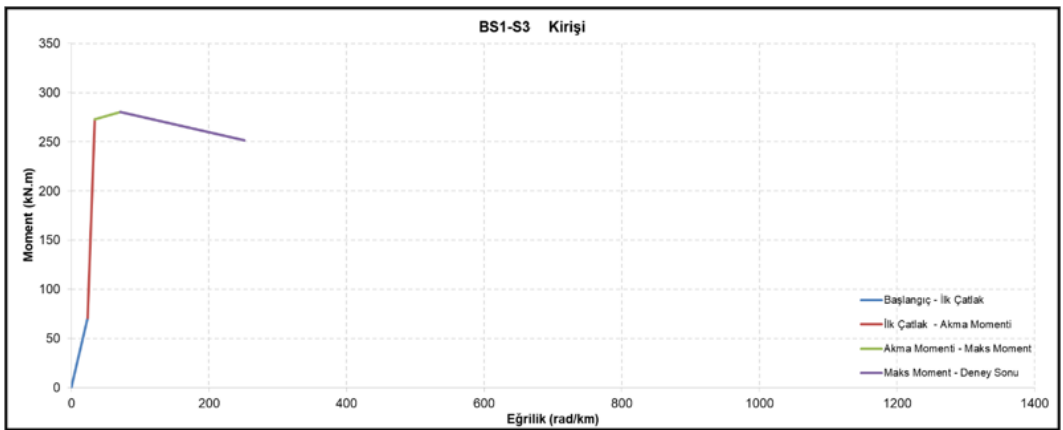
1. BS1-(S1-S2-S3)



Şekil 1. S1 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) İlişkisi

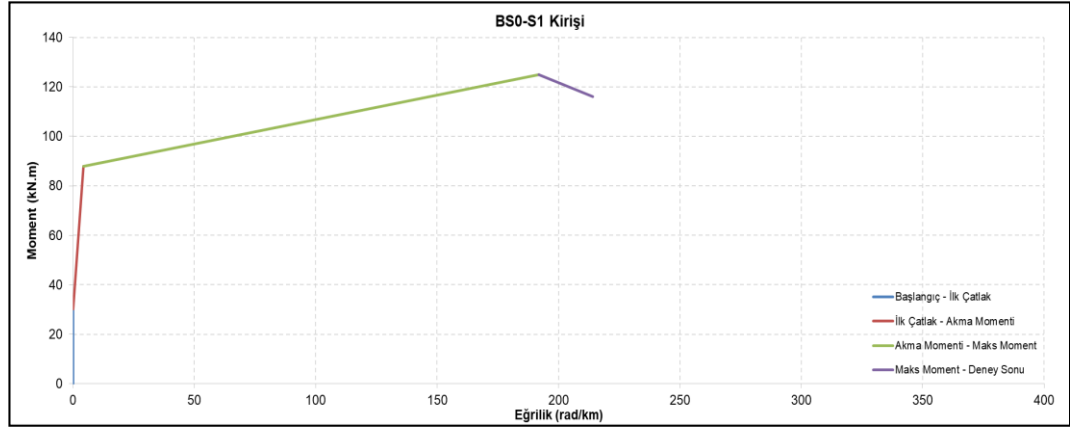


Şekil 5. S2 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) İlişkisi

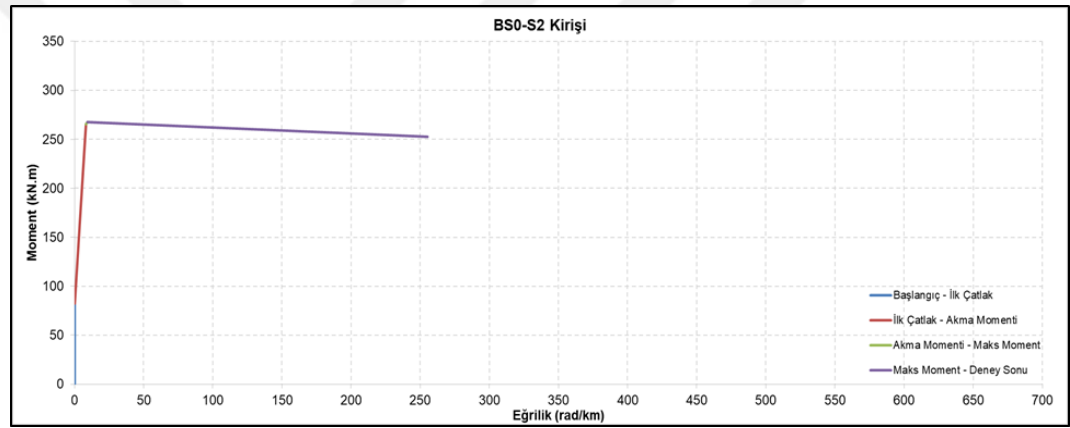


Şekil 3. S3 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) İlişkisi

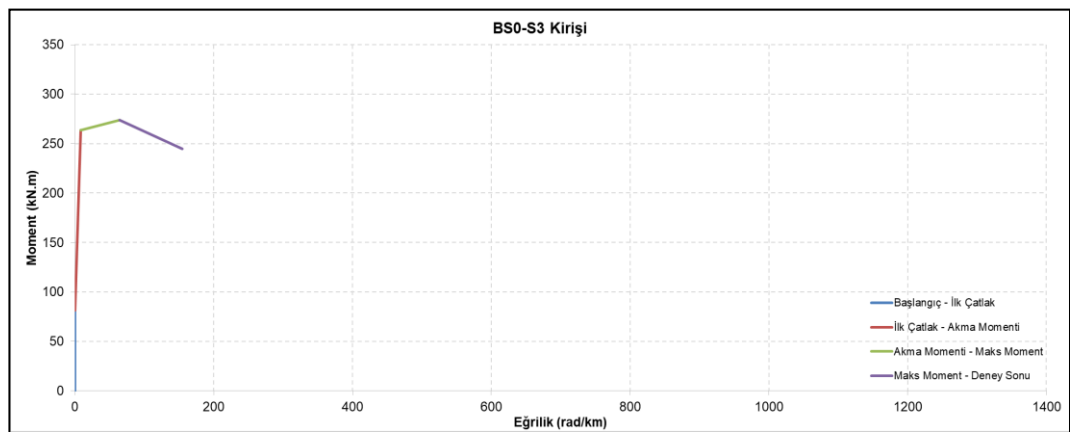
2. BS0-(S1-S2-S3)



Şekil 4. S1 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) ilişkisi



Şekil 5. S2 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) ilişkisi



Şekil 6. S3 kesiti, idealleştirilmiş Moment (kN.m)-Eğrilik (rad/km) ilişkisi