



**DÜŞEY DÜZLEMDE EĞRİ EKSENLİ BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞI**

Emre Göktuğ ÖZER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emre Göktuğ ÖZER

20/06/2022

DÜŞEY DÜZLEMDE EĞRİ EKSENLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞI

(Yüksek Lisans Tezi)

Emre Göktuğ ÖZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Betonarme yapılarda kirişler, genellikle düşey yükler altında eğilmeye çalışan yatay taşıyıcı elemanlar olarak kullanılırlar. Günümüz geleneksel betonarme yapılarında düz eksenli kirişler sıklıkla tercih edilmektedir. Yatay düzlemde eğri eksenli kirişler, otoyol köprüleri ve mimari açıdan alımlı olması istenen özel yapılarda tercih edilir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan düşey düzlemde eğri eksenli kirişler ise, kemer görünüşüne sahip olması istenen kısa açıklıklı yaya üst geçidi gibi özel yapılarda kullanılır. Yapılan literatür araştırması, yatay düzlem içerisinde eğriliğe sahip ve eğrilik düzlemine dik yönde yüklenen betonarme kirişler ile ilgili teorik, deneysel ve nümerik çalışmaların sayıca fazla olduğunu, fakat düşey düzlemde eğriliğe sahip olan ve eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen betonarme kirişler ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, farklı düşey eksen eğriliği, çekme ve basınç donatısı oranlarına sahip betonarme kirişlerin düşey yük altında davranış ve dayanımları araştırılmıştır. Bu bağlamda, toplam 15 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Eksen eğriliği olmayan düz betonarme (referans) kirişler az ($4\Phi 10$ basınç, $6\Phi 10$ çekme donatısı), orta ($5\Phi 10$ basınç, $9\Phi 10$ çekme donatısı) ve çok donatılı ($6\Phi 10$ basınç, $12\Phi 10$ çekme donatısı) olacak şekilde üç sınıfa ayrılmıştır. Bu üç adet referans numunesine ek olarak, 75 mm, 150 mm, 300 mm ve 450 mm düşey yükseltiye (f) sahip, az, orta ve çok donatılı 12 adet eğri eksenli kiriş, monotonik düşey yükleme altında test edilmiştir. Yapılan deneyler, düşey eksen eğriliği arttıkça taşıma gücünün ve enerji sönümleme kapasitesinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, düşey eksen eğriliği yüksek, çok donatılı kirişlerde aderans problemlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Çalışmanın son bölümünde, eş donatılı kirişlerde düşey eksen eğriliği arttıkça kirişin dayanımının $1-f/L$ oranı ile azaldığı belirlenmiştir.

Bilim Kodu	: 91102
Anahtar Kelimeler	: Betonarme kirişler, düşey eksen eğriliği, eğri eksenli kiriş, enerji sönümleme kapasitesi, süneklik
Sayfa Adedi	: 131
Danışman	: Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ
İkinci Danışman	: Prof. Dr. İlker KALKAN

BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH IN-PLANE CURVATURE

(M. Sc. Thesis)

Emre Göktuğ ÖZER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In reinforced concrete structures, beams are generally used as horizontal load-bearing member subject to flexure under vertical loads. Straight reinforced concrete beams are generally preferred in traditional reinforced concrete structures. Beams with out-of-plane curvature are adopted in, highway bridges and special structures that are desired to be architecturally attractive. Beams with in-plane curvature, which is the subject of this study, are used in special structures such as short-span pedestrian overpasses that are desired to resemble arches. The literature research has shown that there are many theoretical, experimental and numerical studies on reinforced concrete beams that have curvature in the horizontal plane and are loaded in the perpendicular direction to the plane of curvature, but the studies on reinforced concrete beams that have curvature in the vertical plane and loaded in the plane of curvature are limited. In this study, the behavior and strength of reinforced concrete beams with different vertical curvature and tension and compression reinforcement ratios under vertical load were investigated. In this context, a total of 15 reinforced concrete beams were tested. Straight reinforced concrete (reference) beams without axial curvature are divided into three classes, as lightly ($4\Phi10$ compression, $6\Phi10$ tensile reinforcement), moderately ($5\Phi10$ compression, $9\Phi10$ tensile reinforcement) and heavily-reinforced ($6\Phi10$ compression, $12\Phi10$ tensile reinforcement). In addition to these three reference beams, 12 lightly, moderately and heavily-reinforced curvilinear beams with vertical dimension of rise (f) of 75 mm, 150 mm, 300 mm and 450 mm were tested under monotonic vertical loading. Experiments have shown that as the vertical curvature increases, the bearing capacity and energy absorption capacity decrease. In addition, it has been observed that bonding problems occur in heavily-reinforced beams with high vertical axis curvature. In the last part of the study, it was determined that as the vertical axis curvature increases in beams with identical reinforcement, the strength of the beam decreases with the ratio of $1-f/L$.

Science Code : 91102

Key Words : Reinforced concrete beams, vertically curved axis, beam with in-plane curvature, energy absorption capacity, ductility

Page Number : 131

Supervisor : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

Co-Supervisor : Prof. Dr. İlker KALKAN

TEŞEKKÜR

Başta bugünlere gelmemde emeği büyük olan sevgili annem Sevim ÖZER ve sevgili babam Arslan ÖZER’e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek Lisans eğitimime başladığım günden itibaren deneysel çalışmalar ve tez yazımına kadar geçen uzun sürede, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Fatma ÖZER’e ve tez çalışmalarımı tamamlamak üzere iken dünyaya gelerek yüzümüzü güldüren biricik oğlumuz Alptuğ ÖZER’e sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Deney numunelerinin hazırlanması, düzenli olarak sulanması ve kas gücü gerektiren konularda yardımlarını esirgemeyen sevgili ağabeylerim Ahmet Gökhan ÖZER ve Kadir Korhan DÜZYOL’a teşekkür ederim.

Deney numunelerinin hazırlanması sürecinde düştüğüm karamsarlıktan beni çıkararak işe koyulmamızı sağlayan, kalıpların oluşturulması sürecinde bir kalıp ustasından daha ince işçilik gösteren ve bu süreci kendi işi gibi gören sevgili büyüğüm, değerli ağabeyim, Veteriner Hekim Murat ERGÜL’e sonsuz teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler esnasında hiçbir yardımı benden esirgemeyen, numunelerin taşınması, yerleştirilmesi, deney düzeneğinin kurulması konusunda sonsuz emek veren, değerli hocam “Gazi Üniversitesi” Emekli Öğretim Görevlisi Faruk OGÜN’e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmam ve rapor haline getirilmesi sürecinde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bu tezi bitirmem konusunda beni sürekli destekleyen danışman hocalarım “Gazi Üniversitesi” Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ’a ve “Kırıkkale Üniversitesi” Prof. Dr. İlker KALKAN’a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEY ELEMANLARI VE MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	17
2.1. Beton ve Donatı Çeliği Mekanik Özellikleri	17
2.1.1. Beton.....	17
2.1.2. Donatı çeliği.....	18
2.2. Deney Elemanlarının Hazırlanması	18
2.3. Deney Elemanlarının Özellikleri	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
3.1. Deney Düzeneği ve Deneylerin Uygulanması	25
3.2. L-0 Elemanı Deneyi.....	27
3.3. M-0 Elemanı Deneyi.....	32
3.4. H-0 Elemanı Deneyi.....	37
3.5. L -75 Elemanı Deneyi.....	42
3.6. M-75 Elemanı Deneyi.....	46
3.7. H-75 Elemanı Deneyi.....	50
3.8. L-150 Elemanı Deneyi.....	55

	Sayfa
3.9. M-150 Elemanı Deneyi.....	59
3.10. H-150 Elemanı Deneyi.....	64
3.11. L-300 Elemanı Deneyi	69
3.12. M-300 Elemanı Deneyi.....	74
3.13. H-300 Elemanı Deneyi.....	79
3.14. L-450 Elemanı Deneyi	84
3.15. M-450 Elemanı Deneyi.....	89
3.16. H-450 Elemanı Deneyi.....	94
4. ANALİTİK YAKLAŞIM.....	101
4.1. Referans Deney Elemanlarının Teorik Taşıma Kapasiteleri.....	101
4.1.1. L-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı.....	101
4.1.2. M-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı	104
4.1.3. H-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı	107
4.2. Eğri Eksenli Elemanlar İçin Açıklık Düzeltme Faktörü	110
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	113
5.1. Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması	113
5.1.1. L serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması	113
5.1.2. M serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması	115
5.1.3. H serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	117
5.2. Tüm Deney Elemanlarının Teorik Yük Taşıma Kapasiteleri İle DeneySEL Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması	119
5.3. Akma Rijitliği	121
5.3.1. L serisi deney elemanlarının akma rijitliği	121
5.3.2. M serisi deney elemanlarının akma rijitliği	121
5.3.3. H serisi deney elemanlarının akma rijitliği.....	122
5.4. Enerji Sönümleme.....	122

	Sayfa
5.4.1. L serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri	122
5.4.2. M serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri	123
5.4.3. H serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri.....	123
5.5. Süneklik	124
5.5.1. L serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları	124
5.5.2. M serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları	125
5.5.3. H serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları.....	125
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ	131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Beton küp numune basınç dayanımları.....	17
Çizelge 2.2. Beton malzemesi özellikleri	18
Çizelge 2.3. Donatı çelikleri mekanik özellikleri	18
Çizelge 2.4. Deney elemanlarının özellikleri.....	24
Çizelge 5.1. L serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki	113
Çizelge 5.2. M serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki	115
Çizelge 5.3. H serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki.....	117
Çizelge 5.4. Tüm deney elemanlarının teorik yük taşıma kapasiteleri ve deneysel taşıma kapasiteleri karşılaştırması	119
Çizelge 5.5. L serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması.....	121
Çizelge 5.6. M serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması.....	121
Çizelge 5.7. H serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması	122
Çizelge 5.8. L serisi deney elemanlarının enerji sönmleme kapasiteleri.....	122
Çizelge 5.9. M serisi deney elemanlarının enerji sönmleme kapasiteleri.....	123
Çizelge 5.10. H serisi deney elemanlarının enerji sönmleme kapasiteleri	123
Çizelge 5.11. L serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları	125
Çizelge 5.12. M serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları	125
Çizelge 5.13. H serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları.....	126

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Düz eksenli referans kirişlere (L-0, M-0, H-0) ait genel çizim	22
Şekil 2.2. Eğri eksenli kirişlere ait genel çizim	22
Şekil 2.3. Az yoğunlukta donatılı (L) kirişler için A-A kesiti	22
Şekil 2.4. Orta yoğunlukta donatılı (M) kirişler için A-A kesiti.....	23
Şekil 2.5. Yoğun donatılı (H) kirişler için A-A kesiti.....	23
Şekil 3.1. Referans deney elemanları (L-0, M-0, H-0) için serbest cisim diyagramı	26
Şekil 3.2. Eğri eksenli kiriş elemanları için serbest cisim diyagramı	26
Şekil 3.3. Düz eksenli referans kiriş elemanlar için mesnet detayı	26
Şekil 3.4. Eğri eksenli kirişler için mesnet detayı.....	27
Şekil 3.5. L-0 deney elemanı için deney düzeneği	29
Şekil 3.6. L-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	30
Şekil 3.7. M-0 deney elemanı için deney düzeneği	34
Şekil 3.8. M-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	35
Şekil 3.9. H-0 deney elemanı için deney düzeneği.....	39
Şekil 3.10. H-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	40
Şekil 3.11. L-75 deney elemanı için deney düzeneği	43
Şekil 3.12. L-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	44
Şekil 3.13. M-75 deney elemanı için deney düzeneği	47
Şekil 3.14. M-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	48
Şekil 3.15. H-75 deney elemanı için deney düzeneği.....	52
Şekil 3.16. H-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	53
Şekil 3.17. L-150 deney elemanı için deney düzeneği	56
Şekil 3.18. L-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	57
Şekil 3.19. M-150 deney elemanı için deney düzeneği	61
Şekil 3.20. M-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 3.21. H-150 deney elemanı için deney düzeneği.....	66
Şekil 3.22. H-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	67
Şekil 3.23. L-300 deney elemanı için deney düzeneği	71
Şekil 3.24. L-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	72
Şekil 3.25. M-300 deney elemanı için deney düzeneği	76
Şekil 3.26. M-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	77
Şekil 3.27. H-300 deney elemanı için deney düzeneği.....	81
Şekil 3.28. H-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	82
Şekil 3.29. L-450 deney elemanı için deney düzeneği	86
Şekil 3.30. L-450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	87
Şekil 3.31. M-450 deney elemanı deney düzeneği ve eleman özellikleri.....	91
Şekil 3.32. M – 450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri	92
Şekil 3.33. H-450 deney elemanı için deney düzeneği.....	97
Şekil 3.34. H-450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri.....	98
Şekil 4.1. Birim şekil değiştirme diyagramı	103
Şekil 5.1. L serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği.....	114
Şekil 5.2. M serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği.....	116
Şekil 5.3. H serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği	118
Şekil 5.4. Tüm deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği	120

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Yatay düzlemde eğri eksenli otoyol köprüsü kirişleri	1
Resim 1.2. Yatay düzlemde eğri eksenli balkon kirişleri	2
Resim 1.3. Düşey düzlemde eğri eksenli yaya köprüsü kirişleri	2
Resim 2.1. Referans deney elemanlarının kalıpları	19
Resim 2.2. Referans deney elemanlarının donatı ve etriye detayı	19
Resim 2.3. Eğri eksenli deney elemanlarının kalıplarının hazırlanışı	20
Resim 2.4. Eğri eksenli deney elemanlarının kalıp ve donatı görünümü	20
Resim 2.5. Beton dökümü ve vibratör ile sıkıştırma uygulaması	21
Resim 3.1. L-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	31
Resim 3.2. L-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü	31
Resim 3.3. L-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	31
Resim 3.4. M-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	36
Resim 3.5. M-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü	36
Resim 3.6. M-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	36
Resim 3.7. H-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	41
Resim 3.8. H-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü	41
Resim 3.9. H-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	41
Resim 3.10. L-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	45
Resim 3.11. L-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü	45
Resim 3.12. L-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	45
Resim 3.13. M-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	49
Resim 3.14. M-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü	49
Resim 3.15. M-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	49
Resim 3.16. H-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	54

Resim	Sayfa
Resim 3.17. H-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	54
Resim 3.18. H-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü.....	54
Resim 3.19. L-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	58
Resim 3.20. L-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü	58
Resim 3.21. L-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	58
Resim 3.22. M-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	63
Resim 3.23. M-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	63
Resim 3.24. M-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	63
Resim 3.25. H-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü.....	68
Resim 3.26. H-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	68
Resim 3.27. H-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü.....	68
Resim 3.28. L-300 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	73
Resim 3.29. L-300 deney elemanı deney sonu genel görünümü	73
Resim 3.30. L-300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	73
Resim 3.31. M-300 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	78
Resim 3.32. M-300 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	78
Resim 3.33. M – 300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü.....	78
Resim 3.34. H-300 deney elemanı deney öncesi genel durumu.....	83
Resim 3.35. H-300 deney elemanı deney sonu genel durumu.....	83
Resim 3.36. H-300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü.....	83
Resim 3.37. L-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	88
Resim 3.38. L-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü	88
Resim 3.39. L-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	88
Resim 3.40. M-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	93
Resim 3.41. M-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	93
Resim 3.42. M-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	93

Resim	Sayfa
Resim 3.43. H-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü	99
Resim 3.44. H-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü.....	99
Resim 3.45. H-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Eşdeğer basınç bloğu derinliği
a_1	Düz kirişlerde yük ile mesnet merkezi arası uzaklık
a_2	Eğri kirişlerde yük ile mesnet arası uzaklık
A_s	Kirişlerde çekme donatısı
A_s'	Kirişlerde basınç donatısı
A_{sw}	Kirişlerde enine donatı
b, b_w	Kiriş kesit genişliği
c	Kiriş tarafsız eksen derinliği
d	Kiriş kesit faydalı yüksekliği
d'	Kiriş basınç bölgesi faydalı yüksekliği
D_{max}	Beton agregası için maksimum tane çapı
E_{115}	115 mm deplasmanda enerji sönümlleme kapasitesi
E_c	28 günlük taze beton elastisite modülü
EI_e	Betonarme kesit için çatlamış etkin kesit rijitliği
E_r	Donatı akması anındaki enerji sönümlleme kapasitesi
E_s	Donatı çeliği elastisite modülü
f	Eğri eksenli kirişler için yükselti mesafesi
F	Kuvvet
f_{cd}	Beton tasarım basınç dayanımı
$f_{ci,maks}$	Maksimum beton numunesi basınç dayanımı
$f_{ci,min}$	Minimum beton numunesi basınç dayanımı
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cm}	Beton numuneleri ortalama basınç dayanımı
$f_{k,150}$	Boyutu 150 mm olan küp beton numune dayanımı
$f_{s,150 \times 300}$	Standart silindir beton numune dayanımı
f_{su}	Donatı çeliği kopma dayanımı
f_y	Donatı çeliği akma dayanımı

Simgeler**Açıklamalar**

f_{yd}	Donatı çeliği tasarım akma dayanımı
h	Kiriş kesit yüksekliği
H	Yoğun donatılı deney elemanları simgesi
k_1	Eşdeğer gerilme dağılımı derinliği parametresi
kN	Kilonewton
L	Az yoğunlukta donatılı deney elemanları simgesi
L	Kiriş uzunluğu
L_1	Referans kirişler için mesnet açıklığı
L_2	Eğri eksenli kirişler için mesnet açıklığı
M	Orta yoğunlukta donatılı deney elemanları simgesi
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
M_r	Kiriş moment taşıma kapasitesi
M_y	Kiriş akma momenti
P	Kirişe uygulanan tekil yük
P_1	Referans kirişler için yük mesnedine uygulanan yük
P_2	Eğri eksenli kirişler için yük mesnedine uygulanan yük
P_y	Kiriş çekme donatısı akma yükü
q	Kiriş üzerindeki düzgün yayılı yük
RF	Eğri eksenli kirişlere uygulanacak düzeltme faktörü
S	Kiriş etriye donatısı aralığı
SF	Açıklık düzeltme faktörü
$x_{1,2}$	İkinci dereceden denklemin kökleri
γ_c	Beton birim hacim ağırlığı
Δ	İkinci dereceden denklem çözümü için parametre
ϵ'_s	Basınç donatısı birim kısalması
ϵ_{cu}	Ezilmede en dış basınç lifindeki beton birim kısalması
ϵ_s	Çekme donatısı birim uzaması
θ	Eğri eksenli kiriş üzerinde merkezden ölçülen açı
λ	Çelik kirişlerde narinlik oranı
μ_c	Eğrilik süneklik katsayısı
ρ	Çekme donatısı oranı

Simgeler**Açıklamalar**

ρ'	Basınç donatısı oranı
ρ_b	Dengeli donatı oranı
Σ	Toplam
σ'_s	Basınç donatısında oluşan gerilme
σ_s	Çekme donatısında oluşan gerilme
Φ	Donatı çapı
ϕ_y	Betonarme kesitlerde akma eğriliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
CFRP	Karbon elyaf takviyeli polimer
LVDT	Doğrusal değişken diferansiyel transformatör
OSB	Yönlendirilmiş yonga levha
TS	Türk Standardı
TSE EN	Türk Standartları Enstitüsü Avrupa Normları

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda kirişler, genellikle düşey yükler altında eğilmeye çalışan yatay taşıyıcı elemanlar olarak kullanılırlar. Günümüz geleneksel betonarme yapılarında düz eksenli kirişler sıklıkla tercih edilmektedir. Yatay düzlem içerisinde eğri olan ve eğrilik düzlemine dik olarak yüklenen kirişler yani yatayda eğri eksenli olan kirişler günümüzde, düzgün bir trafik akışı sağlamak için otoyol köprüleri (Resim 1.1), geniş kentsel alanlarda kavşaklar, bina balkonları (Resim 1.2) ve çeşitli diğer yapılarda sıklıkla kullanılırlar. Fakat düşey düzlem içerisinde eğriliğe sahip olan kirişler, mimari olarak kemer görüntüsüne sahip ancak kemer gibi davranmayan kısa açıklıklı betonarme yaya köprüsü kirişi (Resim 1.3) ve benzeri şekillerde kullanılmaktadır.



Resim 1.1. Yatay düzlemde eğri eksenli otoyol köprüsü kirişleri [1]



Resim 1.2. Yatay düzlemde eğri eksenli balkon kirişleri [2]



Resim 1.3. Düşey düzlemde eğri eksenli yaya köprüsü kirişleri

Yapılan araştırmalarda, yatay düzlem içerisinde eğriliğe sahip ve eğrilik düzlemine dik yönde yüklenen betonarme kirişler ile ilgili hem teorik, hem deneysel hem de nümerik araştırmalar olduğu gözlenmiş fakat düşey düzlemde eğriliğe sahip olan ve eğrilik düzleminde yüklenen betonarme kirişler ile ilgili çalışmaların çok kısıtlı olduğu g r lm ştir. Bu nedenle Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmış olan bu çalışmada; artan düşey eksen eğriliği ile farklı donatı oranları olan kirişlerin iki noktadan monotonik düşey yükleme altında davranış ve dayanımları araştırılmıştır.

Araştırmanın amacı

Düşeyde eğri eksenli betonarme kirişlerde yükselti arttıkça davranış ve dayanım açısından ne gibi değişikliklerin olduğunu ortaya koymak ve donatı yoğunluğunun bu tip kirişlerde ne gibi farklılıklara yol açtığını göstermek olarak özetlenebilir.

Bu kapsamda, donatı oranları bakımından 3 gruba eksen eğriliği bakımından 5 gruba ayrılan 15 adet betonarme kiriş monotonik düşey yükleme altında eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Bu amaçla, donatı oranları farklı olan ve değişik yükseltilere sahip olan kirişlerin dayanım ve davranış biçimlerini gözlemleyerek, çıkan sonuçları yorumlamak araştırmanın temel amacıdır.

Araştırmanın  nemi

Eğri eksenli betonarme kirişler hakkında yapılan literatür taramasında, yatay eksen içerisinde eğriliğe sahip betonarme kirişler ile ilgili sonlu elemanlar yöntemleri ile yapılan çalışmalar ve deneysel çalışmalar göze çarpmaktadır. Fakat düşey eksen eğriliğine sahip ve eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen ama mesnetlerinde yatay yönde serbestçe hareket edebilen yani kemer gibi davranmayan, salt eğilme etkisi altındaki betonarme kirişler ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle bu araştırma ile düşey ekseninde eğriliğe sahip ve mesnetlerinde serbest şekilde yatay yönde hareket edebilen kirişlerin, yani kemer görüntüsüne sahip ama statik açıdan kemer gibi davranmayan düşeyde eğri eksenli kirişlerin davranış ve dayanımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, eksen eğriliği artan kirişlerin akma ve taşıma gücü dayanımlarında düşüşler gözlendiği, donatı oranı arttıkça birtakım aderans problemleri

ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum, kemer görüntüsünde olan ama statik açıdan kemer gibi davranmayan, mesnetlerinde yatayda serbestçe hareket edebilen eğilmeye çalışan kiriş tasarımı için gelecekte yapılan çalışmalara ışık tutacaktır.

Sınırlılıklar

Araştırma için 3 farklı donatı oranına 5 farklı yükselti mesafesine (f) sahip, toplam 15 adet deney elemanını teste tabi tutma olanağı bulunmuştur. Deney esnasında birtakım zorluklar ile karşılaşmıştır. Teknik olarak yaşanan zorluklardan biri yük hücresinin (Load Cell) 135 mm deplasmandan daha öteye gitmemesidir. Bu durum yaklaşık 135 mm deplasman seviyesinde deneye ara verilerek deney elemanının sabitlenip yük hücresinin altı doldurularak tekrar deneye devam etme zorunluluğunu doğurmuştur. Bu esnada deplasman seviyelerinde olmaması gereken 3-5 mm mertebesinde değişiklikler meydana gelmiştir. Düşey eksen eğriliği yani yükselti mesafesi (f) arttıkça dayanımda düşüşler görülmüş olmasına karşın, daha yüksek düşey eksen eğriliğine sahip deney elemanlarının denenmemiş olması çalışmanın sınırlılıkları arasında görülmektedir.

Geçmişte yapılan bazı çalışmalar

Wilson ve Quereau (1928), eğri eksenli elemanlarda gerilmeyi belirlemek için basit bir yöntem belirtmişlerdir. Çalışmalarında sundukları elemanlar sadece simetrik yüklemeye maruz kalan ve sadece yükleme düzleminde kavisli olan, homojen malzemelerden imal edilmiş örneğin çelik gibi malzemeler için geçerlidir. Bu elemanlara örnek olarak vinç kancaları, vagonlardaki elemanlar, zincir bağlantıları gibi elemanlar verilebilir. Bu çalışmada, düz kirişlerdeki veya eğilme elemanlarındaki birincil gerilmeler için güvenilir değerler veren sıradan eğilme formülünün, eğri eksenli eğilme elemanlarına uygulandığında çok küçük gerilme değerleri verdiği anlaşılmıştır. Eğimli bir kirişin içbükey (veya iç) tarafındaki liflerin daha kısa olması nedeni ile birim şekil değiştirme ve dolayısı ile orantılı sınır içindeki birim gerilme, düz kiriş formülü ile bulunandan daha büyüktür ve dış bükey (veya dış) taraftaki gerilme daha azdır. Benzer şekilde, kesitin tarafsız eksenli kirişin enine kesitinin ağırlık merkezinden geçmez, içbükey yani iç tarafa daya yakın bölgeden geçer. Kirişin eğriliğine bağlı olarak gerilmedeki bu artışın, özellikle gerilmenin birçok kez tekrarlandığı elemanlarda büyük önem taşır. E. Winkler (1835-1888), düz bir kirişteki ve eğimli bir kirişteki gerilme dağılımı arasındaki farkı açıkça belirten ve sorunun mühendislik

önemini vurgulayan belki de ilk mühendisti. Bach analizi genişleterek ayrıca değerli deneysel sonuçlar elde etmiştir. Winkler-Bach formülü olarak anılan bu değerlendirmeden elde edilen formül oldukça geniş bir kabul görmüştür.

Salt eğilme için gerilme formülü;

$$S = \frac{M}{aR} \left[1 + \frac{1}{Z} \left(\frac{y}{R+y} \right) \right] \quad (1.1)$$

Burada;

S: söz konusu lifte birim gerilme

M: Eğilme momenti

a: Kesit alanı

R: Eğriliğin merkezinden kesitin ağırlık merkezinden geçen eksene olan uzaklık

y: Ağırlık merkezinden geçen eksenenden söz konusu life olan uzaklık

Z: Aşağıdaki formül ile belirlenen bir enkesit özelliği

$$Z = -\frac{1}{a} \int \frac{y}{R+y} da \quad (1.2)$$

Wilson ve Quereau'nun çalışmasında belirtildiği üzere bu formül, çelikten yapılmış kavisli kirişlerin deneysel gerilme ölçümlerinde bulunan gerilmeler ile uyuşan sonuçlar verdiği görülmüştür. Denklemin aynı zamanda eğrilik yarıçapının çok büyük hale geldiği, yani kirişin pratik olarak düz hale geldiği durumdaki normal bükülme formülüne indirgeme şeklindeki sınırlayıcı koşulu da sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte formül teorik olarak tatmin edici olmasına rağmen, uygulama zorluğundan dolayı ciddi bir dezavantaja sahiptir. Bu zorluk enine kesitin Z özelliğinin bulunmasındadır. Kesit alanının bu özelliğinin analitik bir yöntemle değerlendirilmesi, daire ve dikdörtgen dışındaki tüm bölümler için karmaşıktır ve I ve T kesitler gibi daha basit sıradan kompozit bölümler için bile ifade, hızlı veya doğru çözüm için çok karmaşık hale gelmektedir [3].

Liew, Thevendran, Shanmugam ve Tan (1994), yatayda yani plan düzlemleri içerisinde eğri eksenli çelik I kesitli kirişlerin yer çekimi yönünde yapılan yüklemeler altında davranış ve tasarımı için ve ayrıca maksimum yük taşıma kapasitelerini tahmin etmek için bir tasarım

yöntemi önermişlerdir. Yine aynı çalışmada, yatay olarak eğri eksenli bir I kesitli çelik kirişin elastik olmayan büyük yer değiştirme davranışını analiz etmek için bir sonlu eleman yöntemi sunmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile üretilen yük-deplasman değerlerini ve maksimum dayanım sonuçlarını literatürde yayımlanan teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Daha sonra ise, artık gerilmelerin ve eğrilik yarıçapının, açıklığa oranlarının, yatay olarak eğri eksenli I kesitli çelik kirişlerin maksimum dayanım ve davranışına etkilerini incelemişlerdir. Birkaç farklı yükleme ve sınır koşulu için yatayda eğri eksenli I kesitli çelik kirişlerin maksimum taşıma moment kapasitesini değerlendirmek için yaklaşık bir denklem türetmişler ve önermişlerdir. Araştırma sonuçlarından, belirli bir eğrilik için kirişin göçme modunun, açıklık uzunluğuna bağlı olarak farklı olduğunu ortaya koymuştur. Örnek olarak, daha kısa açıklığa sahip kirişin göçme modu, yayılı plastisite ve yanal burulma kararsızlığının birleşik etkilerinden oluşurken, daha uzun açıklığa sahip kirişlerde göçme modunun esas olarak yanal burulma kararsızlığından oluştuğu gözlemlenmiştir. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deplasman eğrileri ile ikinci dereceden elastik eğri ile elde edilen eğriler arasındaki kolerasyonun iyi olduğu bulunmuştur. Çalışmada ayrıca, planda eğri eksenli I-kesitli çelik kirişlerin maksimum mukavemeti üzerindeki artık gerilmelerin etkilerinin, orta narinlik oranı $0,3 < \lambda < 1,5$ olan kirişler için önemli olduğu görülmüştür. Çalışmada önerilen yaklaşık maksimum dayanım denklemi, açıklık boyunca momenti bildiren I kesitli çelik kirişler için ikinci dereceden elastik ve ikinci dereceden rijit-plastik eğri arasındaki kesişme noktasının çözülmesi ile elde edilir. Basitleştirilmiş denklemin doğruluğu, sonuçların üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilenler ile karşılaştırılması ile doğrulanmıştır. Yatay eğriliğin açıklığa oranı R/L 5, 12,5 ve 25 olan I kesitli çelik kirişler için bir dizi tasarım eğrisini oluşturmuşlardır. Yine bu çalışmada ara mesnetli yatayda eğri eksenli I kesitli çelik kirişlerin davranışı ve maksimum mukavemeti, R/L oranları 14 ve 1,56 olan iki büyük ölçekli I çelik kirişin test edilmesiyle araştırılmıştır. Test sonuçları, ABAQUS isimli sonlu elemanlar analizi yapan bilgisayar programı ve basitleştirilmiş formül tarafından tahmin edilenlerle karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar programından çıkan sonuçlar ile test sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmüştür. Basitleştirilmiş denklemin ise, merkez ekseninde yüklenen basit mesnetli I kesitli çelik kirişlere eşit uygulanan uç momente sahip kirişler için üniform eğilme üreten kirişler için geçerli olduğu görülmüştür. Elastik burkulma momentine (M_e) uygun katsayılar uygulanarak, aynı tasarım denklemi, açıklık boyunca değişen moment değerlerine maruz kalan kirişlere uygulanabilir. Ancak, ara mesnetli kirişler için basitleştirilmiş denklemin doğruluğunu belirlemek için daha fazla numunenin test

edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Mevcut araştırmanın, yatay eğrilik-açıklık oranının $R/L=5$ 'e kadar olan kirişlerle sınırlı olduğu görülmüştür. Yine daha kesin tasarım yönergeleri oluşturmada önce soğuk şekillendirme işleminden dolayı eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırılması önerilmektedir [4].

Jönsson (2005), ahşap yapıştırma tabakalı eğri eksenli damarlarına dik olarak kendinden kılavuzlu vidalarla güçlendirilmiş ve iklimsel nedenlerden kaynaklı iç gerilmelere maruz kalan ahşap kirişlerin yük taşıma kapasitesini belirlemeye çalışmıştır. Güçlendirme amaçlı olarak kullanılan kendinden kılavuzlu vidalar, yapıştırma tabakaların damar boyunca ayrılmasını ve damarlara dik kırılmaya önlemek amacı ile kullanılmıştır. Kuru ve nemli iklim koşullarında ıslah edilmiş numuneler ve tek bir iklim değişikliğine maruz kalmış numuneler ve yine kuru ve nemli iklim koşullarında ıslah edilmiş güçlendirilmiş numuneler ile testler yapılmıştır. Güçlendirme uygulanmayan numuneler göçme durumuna kadar test edilip daha sonra güçlendirilerek tekrar test edilmişlerdir. Çalışmada sonuç olarak, sonlu eleman analizine göre kirişin eğri kısmında eşit gerilme dağılımı elde etmek için vidalar arasındaki mesafe kesit yüksekliğinin yaklaşık %40'ı yani 110 mm arasında olması gerektiği görülmüştür. Güçlendirme olmayan kirişler göçme durumuna kadar denendikten sonra güçlendirildiğinde kapasitelerinin %10 ile %20 arasında arttığı görülmüştür. Rijitlik oranının da aynı mertebelerde olduğu ve deformasyon kapasitesinin yaklaşık olarak 2 kat arttığı görülmüştür. Teste tabi tutulmadan önce yapılan güçlendirme işlemleri kapasiteyi %40 ile %50 oranında artırmıştır ve rijitlik güçlendirme olmayan kirişlerle aynı olduğunu görülmüştür. Damar kırılmasına dik olarak kapasitenin nem durumundan etkilendiği görülmüştür. Kiriş bir nemlendirme durumundaysa, kapasite kurutulmuş numunenin ortalama değerine kıyasla neredeyse yarıya indiği görülmüştür. Test kurulumu ile ilgili olarak, kısa açıklık nedeniyle, takviyeden sonra (hem testten önce hem de sonra) hâkim göçme modunun kesme kırılması olduğu sonucuna varılabilir. Bu, daha büyük elemanların kullanıldığı gerçek yapılarda sorun değildir ve büyük olasılıkla güçlendirilmiş yapılar için göçme durumu eğilmede olmalıdır, yani damar kopmasına dik göçme muhtemelen burada araştırılan tipin güçlendirilmesiyle önlenilebileceği öngörülmüştür [5].

Yousifany (2010), iki noktadan tekil yüke maruz, plan düzleminde eğri eksenli betonarme kirişlerin davranışının yapısal analizi ile ilgilenmiştir. Daha önce deneysel testlerden geçirilmiş plan düzleminde eğri eksenli betonarme kirişlerin bazıları teorik olarak ANSYS isimli sonlu eleman analizi yapan bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Bu analizlerde,

yük-deplasman ilişkileri, çatlak modeli ve çatlağın farklı yük aşamalarında ve maksimum yük taşıma kapasitesine kadar yayılması incelenmiştir. Plan düzlemi içerisinde eğri eksenli kirişlerin doğrusal olmayan davranışı, daha önce Jordaan ve diğerleri (1974) tarafından test edilen kirişlere referansla incelenmiştir [6]. Sonlu elemanlar analizinden yük-deplasman eğrileri, çatlak desenleri ve maksimum yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizi ve referans olarak verilen deneyler arasında yakın bir uyum gözlenmiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesindeki sapma %4-8 olarak bulunmuş ve sonuçlar önerilen sonlu eleman modelinin geçerliliğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu çalışma ile, sonlu elemanlar yönteminin, bu gibi kirişlerin göçmeye kadar olan davranışları hakkında kapsamlı bilgi sağladığı görülmüştür [7].

Hemzah ve Ali (2014), dıştan karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) katmanlarla ya da içten çelik donatı ile güçlendirilmiş ya da güçlendirme yapılmamış gövdesinde boşluk bulunan ya da bulunmayan yatayda eğri eksenli betonarme kirişlerin davranışını ve performansını araştırmıştır. Deneyisel çalışmada, iki gruba ayrılan 14 adet yatayda eğri eksenli kiriş imal edilerek teste tabi tutulmuştur. Birinci grup on adet yarım daire kirişten oluşturulmuş ve bunların biri boşluksuz dokuz tanesi boşluklu yapıda imal edilmiştir. İkinci grup dört adet tam dairesel betonarme kirişten imal edilmiş olup bunun biri boşluksuz üçü ise boşluklu yapıdadır. Deneyler için imal edilen kirişler, dairesel kirişin geometrisi, kiriş profili boyunca boşluğun konumu, takviye donatı çelikleri (etriyeler) ile iç güçlendirmenin varlığı ve boşlukların etrafında dıştan kirişlerin CFRP katmanlarla güçlendirilmesi gibi değişkenleri içermektedir. Deneyler için üretilen 14 adet numune, kiriş açıklığının orta üst noktasından tekil yükleme altında test edilmişlerdir. Deneyler sonucunda, boşluğun kiriş açıklık ortasına ya da iç mesnet noktasına yakın olması durumunda maksimum yük kapasitesinin yarı dairesel kirişler için yaklaşık %35 ve tam dairesel kirişler için yaklaşık %50 azaldığı görülmüştür. Eğri eksenli kirişin dış mesnedinin yakınında boşluk bulunması durumunda, boşluksuz kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, maksimum yük kapasitesi üzerinde yaklaşık %13 daha az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kirişteki boşluk bölgesinin içten etriyeler ile güçlendirilmesi, güçlendirme olmayan eğri eksenli kirişlere göre, yarı dairesel eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesini yaklaşık %3 ile %30 tam dairesel eksenli kirişlerin ise yaklaşık %60 artırdığı görülmüştür. Yine kirişteki boşluk bölgesinin dıştan CFRP ile güçlendirilmesi, güçlendirme olmayan eğri eksenli kirişlere göre, yarı dairesel eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesini yaklaşık %11 ile %40 tam

dairesel eksenli kirişlerin ise yaklaşık %75 artırdığı görülmüştür. Boşluk konumu dış mesnede yakın olan içten etriyeler ile güçlendirilen ve dıştan CFRP ile sargılanan eğri eksenli kirişlerin her ikisinde de, açıklık ortasında maksimum yük değerinde maksimum deplasman ve dönme değerlerinde küçük bir etki görülmüştür. Açıklık ortasında boşluk bulunan kirişlerde ise açıklık ortası kesitinin sehim ve dönme değerlerinde %33 ve %66 oranında azalma meydana gelmiştir. Ayrıca, iç mesnete yakın boşluğu bulunan kirişler için sehim ve dönme değerlerinde %28 ve %38 oranında artış görülmüştür. CFRP katmanlarla dıştan güçlendirilmiş numunelerin genel tepkisi, sehim ve maksimum yük taşıma kapasitesi açısından çelik etriye donatıları ile içten güçlendirilmiş numuneler ile yaklaşık olarak uyumlu görüldüğü bildirilmiştir. Yine aynı çalışmada deney numunelerinin ANSYS isimli bilgisayar yazılımı ile gerçekleştirilen çözümlerinde yük-deplasman eğrilerinin genel tepkisi, deneyler ile uyumlu olduğu ve maksimum yük kapasitesinde yaklaşık %11 maksimum sapma ile analizin geçerli olduğu bildirilmiştir. Tüm deney numunelerinin sayısal ve deneysel sonuçlarından bulunan servis yükleri ve maksimum taşıma kapasitesi esnasındaki deplasman değerleri arasındaki ortalama fark sırası ile yaklaşık olarak %4,8 ve %4,1 olarak bulunmuştur. Eğri eksenli kirişlerin maksimum yük kapasiteleri boşluğun artması (%103, %130 ve %172) aynı boydaki eğriliğin ($1/R$) azalması (0,5, 0,33 ve 0) ile artmıştır. Kirişlerdeki boşlukların dairesel biçime sahip olması dikdörtgen biçimdeki boşluklara göre yük taşıma kapasitesini yaklaşık %41 oranında arttırdığı görülmüştür. Aynı alana sahip boşluklar için genişliği yüksekliğinden daha uzun olan boşlukların, genişliği yüksekliğine eşit ya da daha az olan boşluklardan yaklaşık %7 oranında daha iyi maksimum yük taşıma kapasitesi verdiği görülmüştür [8].

Subramani, Subramani ve Prasath (2014), yatayda eğri eksenli derin betonarme kirişlerin davranışını ve yük taşıma kapasitesini araştırmak için üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli üzerine çalışmalarını aktarmışlardır. Çalışmada benimsenen üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modelinin, betonarme eğri eksenli derin kirişlerin davranışını tahmin etmeye uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Modelin uygulanmasında, kutupsal koordinat sistemi arasındaki verilerin temsilindeki farklılıktan kaynaklanan zorluklara rağmen faydalı olduğu düşünülmektedir. Sayısal sonuçların, tüm davranış aralığı boyunca mevcut deneysel yük-deplasman sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Yine aynı çalışmadan şu sonuçlar çıkarılmıştır; tekil yükün uygulandığı noktadan mesnete olan mesafe yani kesme kolu uzunluğunun efektif derinliğe oranı (a/d) azaldıkça eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesi artmıştır. Maksimum

yükteki bu artışın, kesme kolu uzunluğunun efektif derinliği oranı (a/d) 2'den küçük olduğu zaman daha etkili duruma geldiği görülmüştür. Eğri eksenli kirişlerin uzunlukları sabit tutulurken, kirişlerin merkezi eğim açısının yani eğriliklerinin değiştirilmesi, maksimum taşıma yükünü önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Merkezi eğim açısının azaltılmasının, eğri eksenli kirişlerin maksimum taşıma yükünün artmasına neden olduğu bulunmuştur. Eğriliğin azalmasından dolayı maksimum taşıma yükünün artmasında a/d oranlarının değiştirilmesinin net bir etkisi olmadığı görülmüştür. Eğri eksenli kirişlerin kesitine etki eden iç burulmanın a/d oranı azaldıkça maksimum yük taşıma kapasitesine etkisi azalmıştır. Eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesi, $a/d=4,36$ için bir eğri kiriş ucundaki burulma kısıtlamasının serbest bırakılması ile %22 azalırken, $a/d=1,75$ için azalış %12 olarak görülmüştür. Enine donatı miktarındaki artışın ise eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesinde artışa yol açtığı görülmüştür ve a/d oranının 2'den küçük olduğunda enine donatı miktarının maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. Etriye çapının 6,35 mm'den 12 mm'ye değiştirilmesi nedeniyle eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesindeki artış $a/d=2,51$ için %9,1'den $a/d=1,75$ için %5,2'ye düşmekte olduğu görülmüştür. Yatay kesme donatısı olarak ilave boyuna çubukların kullanılması, eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Ek boyuna donatı kullanılmasının bu etkisi a/d oranı azaldıkça arttığı görülmüştür. 12 mm çapında ek boyuna donatı çubukları kullanılması nedeni ile eğri eksenli kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesindeki artış $a/d=4,36$ için %3,77'den $a/d=1,75$ için %10,5'a yükseldiği görülmüştür [9].

Kayathri ve Balaji (2015), eğri kirişlerin eğilme davranışı üzerine deneysel bir araştırmayı ve sonuçlarının düz kirişler ile karşılaştırılmasını aktarmışlardır. Numuneler, başlangıç eğriliği, 4000 mm ve 2000 mm ve beton dayanımı C40 olan 1200 mm uzunluğunda 150 mm genişliğinde ve 100 mm derinliğinde eğri eksenli kirişlerdir. Hangi donatı detayının maksimum yüklemeye göre daha dayanıklı olacağını tahmin etmek için kavisli kirişlerde çeşitli donatılar kullanılmıştır. Üç adet referans numunesi ile birlikte, çeşitli donatı kombinasyonları kullanılarak 12 adet kavisli kiriş numunesi dökülmüştür. Kirişler hem yatay hem de dikey olarak iki nokta yükleme altında test edilmiştir. Kiriş dayanımını anlayabilmek için deplasman ve maksimum moment taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Ayrıca deneysel modellerle karşılaştırmak için Sonlu Elemanlar Yazılımı ABAQUS kullanılarak maksimum moment taşıma kapasitesini belirlemek için analitik modelleme yapılmıştır. Kirişlerin deneysel sonuçlarından, sehim değerleri, nihai moment taşıma kapasiteleri tahmin

edilmeye çalışılmış ve hangi donatı detayının burulma momentlerine karşı daha dayanıklı olacağı ve burulma nedeni ile diyagonal çekme çatlakları kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, eğri eksenli kirişlerin maksimum mukavemetinin, geleneksel dikdörtgen kesitli düz kirişlere göre %10-15 oranında arttığı düşünülmektedir. Kapasitesi arttırılmış eğri eksenli kirişler kullanılarak kesit alanının azaltılabileceği düşünülmektedir. Küçük eğrilığe sahip eğri eksenli bir kirişte, maksimum dayanımın büyüdüğü ve büyük eğrilığe sahip eğri eksenli kirişlerin maksimum dayanımının küçüldüğü görülmüştür. Eğri eksenli kirişlerde minimum deplasman nedeni ile dikey yükleme yerine yatay yükleme koşulunun önerildiği görülmüştür [10].

Numan, Waryosh ve Ali (2019), tam ölçekli eğri eksenli betonarme kirişler ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneyler için 4 adet deney numunesi kullanmışlardır. Bunlardan 1 numaralı numune kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Tüm eğri eksenli betonarme kirişlerin kesiti T kesit olarak tasarlanmıştır. Deneyler, T kesitli kirişin başlık ve gövde kısmında kullanılan betonun döküm süresinin ve betonun basınç dayanımının bu tür yapıların yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için yapılmıştır. 4 adet deney numunesi için 3 adet farklı beton sınıfı kullanılmışlardır ve bu betonların basınç dayanımları 25 MPa, 50 MPa ve 75 MPa olarak değişmektedir. Kontrol numunesi olan 1 numaralı elemanda T kiriş kesitinin gövde ve başlık kısmı betonu 25 MPa olarak bir seferde dökülerek hazırlanmıştır. Bu çalışmada, eğri eksenli betonarme kirişlerin T kesitlerinin başlık bölgesine (flanş) dökülen betonun 25 MPa'dan sırası ile 50 MPa ve 75 MPa'a yükseltilmesi, sırasıyla 3 numaralı numunede %14,29, 4 numaralı numunede %22,86 yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Ek olarak, başlık bölgesinde betonun basınç dayanımının artması kontrol numunesi 1'e göre ilk çatlağın görünmesini 3 numaralı numunede %76,19 ve 4 numaralı numunede %91,43 oranında geciktirmiştir. Bu bulgulardan hareketle yazarlar, başlık bölgesindeki betonun basınç dayanımı değerinin, başlık parçası ve gövde parçası betonunun farklı bir zamanda dökümünün herhangi bir etkisi olmaksızın, hem maksimum yük kapasitesinde hem de eğri eksenli betonarme kiriş numunelerinin deplasmanı üzerinde büyük bir etkisi olduğu sonucuna varmıştır. 1 ve 2 numaralı deney numunelerinin aynı basınç dayanımına sahip olmalarına karşın 2 numaralı numunenin başlık ve gövde parça betonlarının farklı zamanlarda dökülmesinin etkisinin sınırlı olduğunu görmüşlerdir. Yalnızca 2 numaralı numunede ilk çatlağın görülmesi 1 numaralı numuneye göre biraz daha geç olmuş ve yine 1 numaralı numuneye göre maksimum yükte önemsiz bir artış gözlemişlerdir. Yine bu çalışmada, tüm eğri eksenli betonarme kirişlerin alt yüzünde

maksimum yük seviyesinin %20 ile %30 aralığında çekme bölgesinde başlayan ve daha sonra sayıca artarak genişleyen ve ilerleyen eğilme çatlaklarının ortaya çıktığı görülmüştür. Daha sonra bu çatlakların ilerleyerek beton ezilmesinin gerçekleştiği son aşamalarda numunenin üst yüzüne yaklaşmış ve yukarı kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. 3 ve 4 numaralı numunelerde kontrol numunesine kıyasla ana çatlak oluşumunun azaldığı görülmüştür. Yine aynı çalışmada, 4 numaralı eğri eksenli kiriş numunesi için beton basınç bölgesinde kaydedilen maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,0047 olarak görülmüş. Bu oran sırası ile kontrol numunesi 1, 2 ve 3 numaralı numunelerde %55,32, %42,55 ve %23,40 azalmıştır. 3 ve 4 numaralı numunelerde beton maksimum birim şekil değiştirme değeri, katmanlı dökümden kaynaklanan %18,18 ile %44,15 arasında değişen bir yüzde farkı ile ACI-318-14 yönetmeliği tarafından önerilen birim şekil değiştirme sınırını aştığı görülmüştür. Betondaki maksimum birim şekil değiştirme farkı 1 numaralı kontrol numunesi ve 2 numaralı numune arasında minimum yüzde farkı olarak %25 oranında gerçekleştiği görülmüştür. Maksimum birim şekil değiştirme yüzde farkı 1 numaralı kontrol numunesi ile 4 numaralı numune arasında meydana gelmiş ve oran % 76,47 olarak ölçülmüştür. Yine bu çalışmada belirtildiği üzere, tüm numunelerin çelik donatılarında yüke karşı gelen birim şekil değiştirme eğilimi genel olarak benzer olduğu görülmüştür. 4 numaralı numunenin basınç bölgesinde donatı çeliğinde kaydedilen minimum birim şekil değiştirme değeri 0,0015 olarak gözlemlenmiştir. Öte yandan, çekme bölgesinde 3 numaralı numunede kaydedilen maksimum çelik donatı birim şekil değiştirme değeri 0,0042 olarak görülmüştür [11].

Subramanian ve Murugesan (2019), düşeyde eğimli betonarme kirişlerin yatay itmesini araştırmışlardır. Araştırmada kullanılan kirişlerin orta kısımları bir kemer gibi kavislidir ve bu tür kirişlere dikey kavisli kirişler denir. Araştırmalarında 15 adet düşey eğimli betonarme kiriş dökmüşlerdir. Bu kirişlerden 8 tanesi sabit 200 mm'lik merkezi yükseltiye ve 490 mm'den 1832 mm'ye değişen açıklığa sahiptir. Kalan 7 adet kiriş sabit 300 mm'lik merkezi yükseltiye sahiptir ve eğri kısmın kiriş açıklığı 690 mm'den 1844 mm'ye değişmektedir. Düşeyde eğri eksenli kirişlerin eğri kısımları parabolik bir şekle sahiptir. Eğri eksenli betonarme kirişler test edilirken boyuna (yatay) yer değiştirmeyi durdurmak için bağlantı çubukları kullanılmıştır. Eğri eksenli betonarme kirişler, çökme meydana gelene kadar kademeli olarak artan bir merkezi noktasal yüklemeye maruz bırakılmıştır. Kirişlerin davranışı, başlangıçtan göçme meydana gelene kadar yoğun olarak gözlenmiş ve ilk çatlak yükü, göçme yükü, sehim ve yatay yer değiştirme kaydedilmiştir. Bağlantı çubuklarındaki

kuvvet, ölçülen yatay yer değiştirmeye göre hesaplanmıştır. Bağlantı çubuklarındaki toplam kuvvet, bir eğri eksenli kirişin her iki ucundaki mevcut yatay itme kuvvetidir. Eğri eksenli kirişlerin teorik yatay itmesi kuvvet yöntemine göre hesaplanır. Bu teorik itme değerleri ve deneysel sonuçlar bu araştırmada karşılaştırılmıştır. Teorik yatay itmenin deneysel yatay itmeye oranının ortalama değerinin çok tatmin edici olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, kiriş uzunluğu (L_2) arttıkça, kirişin eğri kısmı tarafından teşvik edilen daha büyük kemer hareketi nedeni ile düşeyde eğri eksenli betonarme kirişlerin ilk çatlak yükünün ve maksimum yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Eğri eksenli kirişlerin, eğri kısmının yatay izdüşümü uzunluğunun (L_2) tüm kiriş uzunluğuna belirli bir oranı (L) için, eğri kısmın yüksekliğinin artması düşeyde eğri eksenli kirişlerin ilk çatlak yükü ve maksimum yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Bu durum yüksekliğin artması ile kemer hareketindeki artışa bağlanabilir. Kirişin eğri kısmının yatay uzunluğu (L_2) arttıkça merkezde ölçülen deplasmanın azaldığı görülmüştür. Bu durum, kiriş uzunluğu (L_2) ne kadar büyük olursa, merkezdeki deplasmanın azalması ile sonuçlanan bağlantı çubukları tarafından sunulan daha yatay büyük itmenin mevcudiyeti nedeni ile kemer hareketinin o kadar büyük olduğu gerçeğine atfedilebilir. Eğri eksenli kirişlerin, eğri kısmının yatay izdüşümü uzunluğunun (L_2) tüm kiriş uzunluğuna belirli bir oranı (L) için, eğri kısmın yüksekliğinin artması, düşeyde eğri eksenli betonarme kirişlerin deplasmanının azalmasına sebep olur, bu durum daha yüksek bir yüksekliğin kemer hareketindeki artışa bağlanabilir. L_2/L oranının 0,453'ün altında olduğu durumlarda, başlangıçta birleşim yerlerinin her iki tarafında eğilme çatlakları gelişmiştir. Maksimum yükte eğri kısımda yatay çatlakların oluşması nedeni ile kirişler göçme moduna ulaşmıştır. L_2/L oranının 0,453'ten büyük olduğu durumlarda, eğri kısımda oluşan dikey çatlaklar ve çok ince yatay çatlaklar nedeni ile göçme moduna ulaşmıştır. Bu kirişler dikey çatlakların genişlemesi nedeni ile göçme moduna ulaşmıştır, çünkü eğri kısmın genişlemesinin büyük ölçüde bağlantı çubukları tarafından durdurulduğu görülmüştür. Mafsal bağlantılı mesnetli bir düşeyde eğri eksenli kiriş, eğri kısmın yay etkisinden dolayı iki uçta yatay bir kuvvet iletir. Mafsalı mesnetleri simule etmek için, kirişin her iki tarafında birer tane olmak üzere ve uçlarına ankrajlı iki bağlantı çubuğu kabul edilmiştir. Kirişlerin uçlarında ölçülen yer değiştirmelerin toplamı iki kolondaki eksenel deformasyondan hesaplanmıştır. İki bağlantı çubuğundaki yatay kuvvet, bir düşeyde eğri eksenli kirişin her iki ucundaki yatay itmeye eşittir. Kuvvet analizi yöntemi kullanılarak, uçların yatay olarak hareket etmesi engellendiğinde, maksimum yükte, düşeyde eğri eksenli betonarme kirişlerdeki yatay itmeyi tahmin etmek için bir denklem önerilmiştir. Bu denklem ile elde edilen teorik yatay itmenin deneysel yatay itmeye oranının ortalama

değeri, 0,041 standart sapma ve %4,8 değişim katsayısı ile 0,856 olarak bulunmuştur. Bu oran, kirişlerin ucundaki yatay yer değiştirmeler önleğinde, düşeyde eğri eksenli betonarme kirişlerin maksimum yükte maruz kaldığı yatay itmenin kuvvet analizi yöntemi kullanılarak tatmin edici bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermektedir [12].

Keykha (2019), içi boşluklu kare kesitli çelik profillerden imal edilen düşeyde eğri eksenli kirişlerin karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmesi ve iyileştirilmesi ile ilgilenmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar incelemesini kullanarak, tekil yük veya düzgün yayılı yük altında CFRP güçlendirmesinin düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin davranışı üzerindeki etkilerini analiz etmek ve incelemek için üç boyutlu modelleme ve doğrusal olmayan statik analiz kullanmıştır. Düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin güçlendirilmesi için kullanılan CFRP elemanların uzunluğu 400 mm olarak 2 adet seçilmiştir. Ek olarak, CFRP genişliği 100, 300 ve 400 mm olmak üzere 3 tip olarak kullanılmıştır. Düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum kapasitesi, maksimum kapasitedeki artan yüzdesi ve kırılma modları bu araştırmada önemli maddeler olarak incelenmiştir. CFRP güçlendirmesinin düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için 4 adet numune analiz edilmiştir. Düşeyde eğri eksenli çelik kirişin teorik bir analizi, tekil yük P veya düzgün yayılı yük q altında bu tip kirişlerdeki maksimum eğilme momentinin $\theta=90^\circ$ açısında meydana geldiğini göstermiştir. Bu nedenle, düşeyde eğri eksenli çelik kirişler, maksimum eğilme momentleri konumunda kısmen güçlendirilirse, bu tip kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesinin artacağı sonucu çıkarılmıştır. Sonuç olarak, bazı özel konumlarda düşeyde eğri eksenli çelik kirişleri güçlendirmek için CFRP kullanılmasının, bu kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerini artırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. 100, 300 ve 400 mm olmak üzere 3 tipte CFRP genişliğinin değiştirilmesi, numunelerin maksimum kapasitesini artırma etkisine sahip olduğu görülmüştür. CFRP genişliği 400 mm olduğunda, düşeyde eğri eksenli kirişlerin maksimum taşıma kapasitelerinde artış gözlenmiştir. B2-400 numunesi için maksimum yük taşıma kapasitesi P tekil yük altında gerçekleşmiş ve 158,44 kN olarak ölçülmüştür. Yine aynı numune için maksimum kapasitedeki artış yüzdesi %25,13 olarak belirlenmiştir. Tekil P yüklemesi altında, bu numunelerin dikey kenarlarında ve orta açıklığa yakın bölgelerde yerel burkulmalar meydana geldiği görülmüş, bu nedenle, düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin dikey kenarlarını açıklık ortasında CFRP ile güçlendirmenin, yerel burkulmanın başlangıcını geciktirdiği ve bu kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesindeki artış üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Düzgün yayılı q yükü altındaki tüm düşeyde eğri eksenli çelik

kirişlerde, bu kirişlerin mesnetlerinin yakınlarında Von Mises gerilmesinin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca düzgün yayılı q yükü altındaki tüm düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin mesnetlerinin yakınlarında yerel burkulmalar olduğu görülmüştür. CFRP güçlendirmesinin, tekil yük altında yüklenen düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesini artırma üzerindeki etkisi, düzgün yayılı yük altında yüklenen düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesini artırma etkisinden daha yüksek olduğu görülmüştür. CFRP güçlendirmesinin, tekdüze yayılı yük altında yüklenen düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesini artırma üzerindeki etkisinin daha düşük olmasının nedeni, bu kirişlerin göçme modunun CFRP güçlendirme bölgesinin dışında gerçekleşmesidir. Genel olarak bu çalışmanın sonuçları şunları içermektedir; iyileştirme ve güçlendirme çalışmaları için bu tip hızlı, düşük maliyetli ve pratik uygulanabilen güçlendirme yöntemleri, mevcut düşeyde eğri eksenli çelik kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerini gözle görülür ve önemli bir ölçüde attırmaktadır [13].

2. DENEY ELEMANLARI VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde deney elemanlarının imalatında kullanılan beton ve donatı çeliği malzemelerinin karakteristik mekanik özellikleri ve deney elemanlarının isimlendirilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca deney numunelerinin özellikleri Çizelge 2.4’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.1. Beton ve Donatı Çeliği Mekanik Özellikleri

2.1.1. Beton

Deneysel çalışmalarda kullanılan beton malzemesinin özellikleri aşağıda listelenmiştir. Tüm deney numuneleri için C25/30 kalitesinde hazır beton istenmiş ve aynı mikserden bir kerede dökülmüştür. Deney elemanlarının beton döküm işlemi sırasında deney elemanları önüne koyulan 11 adet 150x150x150 mm küp boyutlarındaki numune kaplarına da beton dökülerek numuneler alınmıştır. Bu numuneler, yapı mekaniği laboratuvarında deneyler sırasında basınç dayanımı testine tutulmuştur. Küp numunelerinin basınç dayanım test sonuçları, bu sonuçların TS EN 206 standardına göre 150x300 mm boyutlarındaki standart silindir numune değerlerine dönüştürülmüş değerleri ve hesaplarda kullanılacak ortalama beton dayanımı aşağıdaki Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Beton küp numune basınç dayanımları

Küp Numune Numarası (150x150x150 mm)	Basınç Dayanımı (MPa) $f_{k,150}$	Basınç Dayanımı (MPa) $f_{s,150x300}$
1	33,5	26,9
2	34,1	27,5
3	37,7	30,6
4	36,2	29,3
5	33,6	27,0
6	37,5	30,4
7	38,6	31,3
8	34,0	27,4
9	31,0	24,8
10	31,2	24,9
11	31,0	24,8
f_{cm} (MPa)	34,4	27,7
$f_{ci,max}$ (MPa)	38,6	31,3
$f_{ci,min}$ (MPa)	31,0	24,8
Standart sapma	2,765	2,389
Değişim (Varyasyon) katsayısı	%8,04	%8,62

TSE EN 206 TS 13515'e uygun olarak üretilmiş, özel bir beton firmasından sahaya nakledilerek, deney numune kalıplarına dökülen betona ait sevk irsaliyesinde yer alan beton malzemesine ait özellikler aşağıda Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton malzemesi özellikleri

Beton Sınıfı	C25/30
Beton Kıvam Sınıfı	S3
Çevresel Etki Sınıfı	XC2
Klorür İçeriği	0,1
Maksimum Tane Çapı (D_{max})	12,00
Çimento Tipi	CEM I 42,5
Beton Birim Hacim Ağırlığı (γ_c)	2318 kg/m ³
Beton Katkısı	Süper Akışkan
Su/Çimento Oranı	0,582
Beton karakteristik basınç dayanımı (f_{ck})	25 MPa
28 günlük beton elastisite modülü (E_c)	30000 MPa

2.1.2. Donatı çeliği

Tüm deney elemanlarında kullanılan donatı çelikleri, karakteristik mekanik özelliklerinde herhangi bir fark olmaması için aynı fabrikadan, aynı seri üretimde çıkmış seriden alınmıştır. Kiriş deney elemanlarında boyuna donatı olarak S420 kalitesinde 10 mm çapında nervürlü donatılar ve etriye donatısı olarak S220 kalitesinde 5 mm çapında düz yüzeyli nervürlü donatılar kullanılmıştır. Donatı çeliklerinin satın alındığı firmadan verilen muayene sertifikasında belirtilen, TS EN ISO 15630-1 standardına göre yapılan testlerle belirlenmiş, donatı çeliğine ait mekanik özellikler Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Donatı çelikleri mekanik özellikleri

Çelik Sınıfı (Donatı çapı)	Akma Gerilmesi f_y (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} (MPa)
S420 ($\Phi 10$)	450	560
S220 ($\Phi 5$)	260	380

2.2. Deney Elemanlarının Hazırlanması

Tüm deney elemanları Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı ve bahçesinde hazırlanmıştır. Boyuna donatı çubukları olarak kullanılan 10 mm çaplı nervürlü donatı

ubukları ve etriye donatısı olarak kullanılacak olan 5 mm çaplı nervürsüz donatı çubukları hazır olarak alınarak, laboratuvar da gerekli boyutlarda kesilmiştir. Referans düz kirişlerin kalıp işleri 2 mm kalınlığında sac levhalardan yapılarak 42 cm aralıklarla levhalar berkitilerek kalıplar hazırlanmıştır.



Resim 2.1. Referans deney elemanlarının kalıpları



Resim 2.2. Referans deney elemanlarının donatı ve etriye detayı

Eğri eksenli kiriş numunelerinin kalıp işleri 11 mm ve 18 mm OSB plakalardan oluşturulmuştur. Alt taban işlerinde 18 mm OSB yan kanat kalıp işlerinde 11 mm OSB plakalar kullanılmıştır. Eğri eksenli tüm deney kiriş numunelerinin kalıpları oluşturulurken,

numune kalıp şekillerinin 1:1 ölçekli çıktısı alınarak OSB plaklar üzerine işlenmiş ve dekopaj testeresi ile kalıp şekli verilmiştir.



Resim 2.3. Eğri eksenli deney elemanlarının kalıplarının hazırlanışı



Resim 2.4. Eğri eksenli deney elemanlarının kalıp ve donatı görünümü

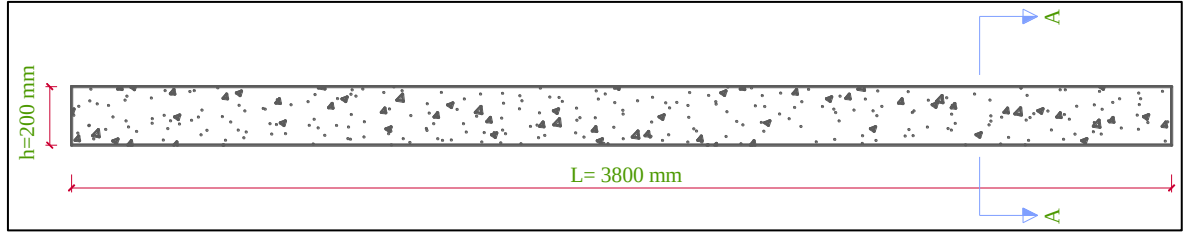
Tüm eğri eksenli kiriş kalıp ve donatıları hazırlandıktan sonra, bir sıra halinde dizilerek ve her deney numunesi önüne beton küp numune kapları (150x150x150 mm) koyularak, bir dökümde mikserin arkasından vibratör ile sıkıştırılarak beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.



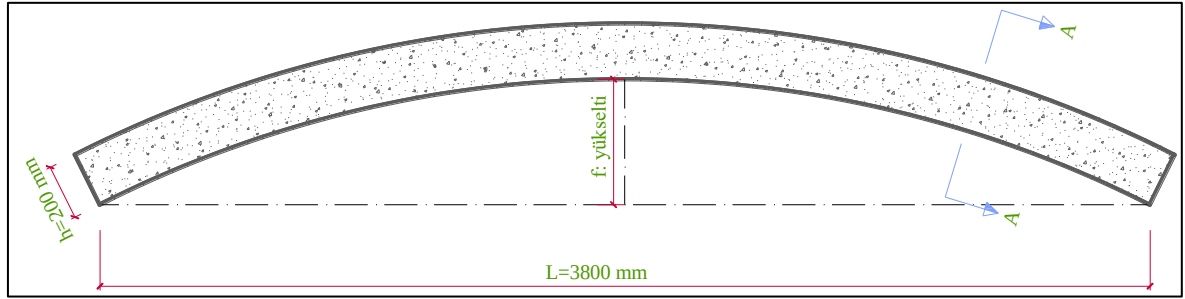
Resim 2.5. Beton dökümü ve vibratör ile sıkıştırma uygulaması

2.3. Deney Elemanlarının Özellikleri

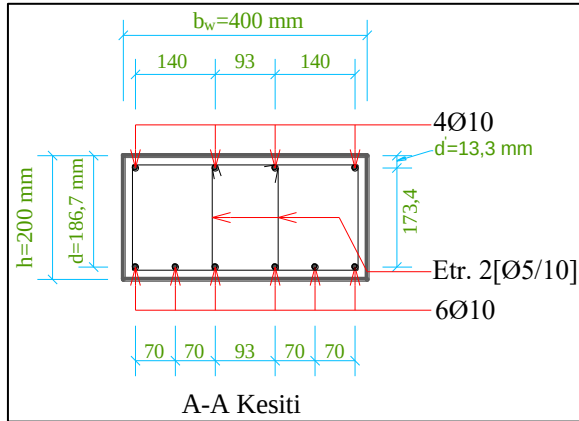
Deneyisel çalışmalar için, uzunluğu 3800 mm, yüksekliği 200 mm, genişliği 400 mm olan dikdörtgen kesitli 15 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Bu 15 adet betonarme kiriş deney numunesi farklı yükselti mesafesine (f) sahip 5 gruptan oluşmaktadır. İlk grup, düz eksenli referans deney numune kirişlerini temsil etmekte olup 0 rakamı ile belirtilmiştir. Bu grup kirişler, eksen eğriliği olmayan ($f=0$ mm) düz kiriş olarak imal edilmiş olup (Şekil 2.1), kendi içinde az (L), orta (M) ve çok yoğunlukta donatılı (H) olarak ayrılmıştır. Diğer 4 grup deney numunesi toplam 12 kiriş olmak üzere sırası ile 75, 150, 300, 450 mm yükselti ile imal edilmiş ve her bir grup kendi içerisinde az, orta ve yoğun donatılı olarak ayrılmıştır (Şekil 2.2). Aşağıda, düz eksenli ve eğri eksenli kirişlere ait genel çizimler ve bu kirişlere ait 3 tip (L, M, H) donatı detayları gösterilmiştir. Ardından Çizelge 2.4'de tüm deney elemanlarının genel özellikleri ve donatı içerikleri tablo halinde verilmiştir.



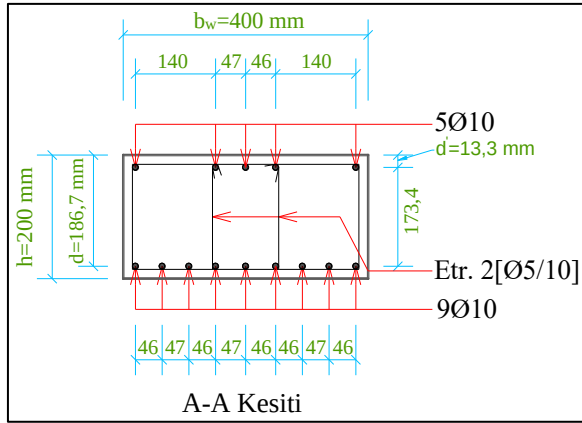
Şekil 2.1. Düz eksenli referans kirişlere (L-0, M-0, H-0) ait genel çizim



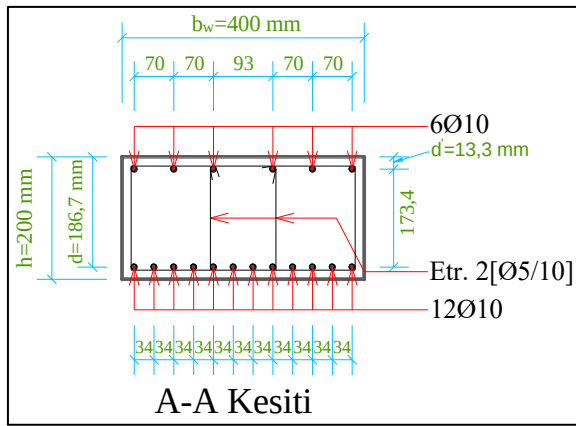
Şekil 2.2. Eğri eksenli kirişlere ait genel çizim



Şekil 2.3. Az yoğunlukta donatılı (L) kirişler için A-A kesiti



Şekil 2.4. Orta yoğunlukta donatılı (M) kirişler için A-A kesiti



Şekil 2.5. Yoğun donatılı (H) kirişler için A-A kesiti

Çizelge 2.4. Deney elemanlarının özellikleri

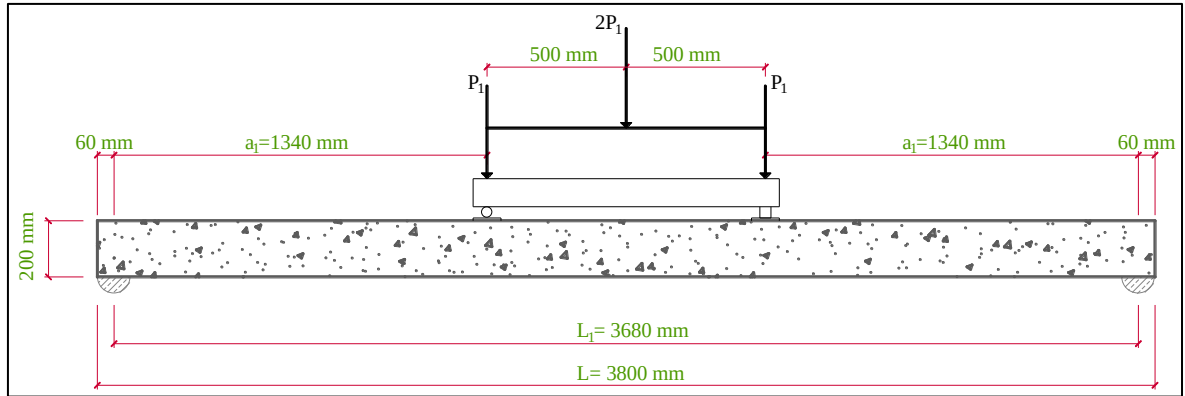
No	Eleman Adı	Kiriş Boyu, mm (L)	Kesit Yüksekliği, mm (h)	Kesit Genişliği, mm (b)	Yükselti mesafesi, mm (f)	Çekme Donatısı, mm ² (A _s)	Basınç Donatısı, mm ² (A _s)	Enine Donatı (A _{sw} /S)	Çekme Donatısı Oranı (ρ)	Basınç Donatısı Oranı (ρ')	Dengeli Donatı Oranı (ρ _b)
1	L-0	3800	200	400	0	471,24 (6Φ10)	314,16 (4Φ10)	2[Φ5/100]	0,0063	0,0042	0,025
2	M-0	3800	200	400	0	706,86 (9Φ10)	392,70 (5Φ10)	2[Φ5/100]	0,0095	0,0053	0,025
3	H-0	3800	200	400	0	942,48 (12Φ10)	471,24 (6Φ10)	2[Φ5/100]	0,0126	0,0063	0,025
4	L-75	3800	200	400	75	471,24 (6Φ10)	314,16 (4Φ10)	2[Φ5/100]	0,0063	0,0042	0,025
5	M-75	3800	200	400	75	706,86 (9Φ10)	392,70 (5Φ10)	2[Φ5/100]	0,0095	0,0053	0,025
6	H-75	3800	200	400	75	942,48 (12Φ10)	471,24 (6Φ10)	2[Φ5/100]	0,0126	0,0063	0,025
7	L-150	3800	200	400	150	471,24 (6Φ10)	314,16 (4Φ10)	2[Φ5/100]	0,0063	0,0042	0,025
8	M-150	3800	200	400	150	706,86 (9Φ10)	392,70 (5Φ10)	2[Φ5/100]	0,0095	0,0053	0,025
9	H-150	3800	200	400	150	942,48 (12Φ10)	471,24 (6Φ10)	2[Φ5/100]	0,0126	0,0063	0,025
10	L-300	3800	200	400	300	471,24 (6Φ10)	314,16 (4Φ10)	2[Φ5/100]	0,0063	0,0042	0,025
11	M-300	3800	200	400	300	706,86 (9Φ10)	392,70 (5Φ10)	2[Φ5/100]	0,0095	0,0053	0,025
12	H-300	3800	200	400	300	942,48 (12Φ10)	471,24 (6Φ10)	2[Φ5/100]	0,0126	0,0063	0,025
13	L-450	3800	200	400	450	471,24 (6Φ10)	314,16 (4Φ10)	2[Φ5/100]	0,0063	0,0042	0,025
14	M-450	3800	200	400	450	706,86 (9Φ10)	392,70 (5Φ10)	2[Φ5/100]	0,0095	0,0053	0,025
15	H-450	3800	200	400	450	942,48 (12Φ10)	471,24 (6Φ10)	2[Φ5/100]	0,0126	0,0063	0,025

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

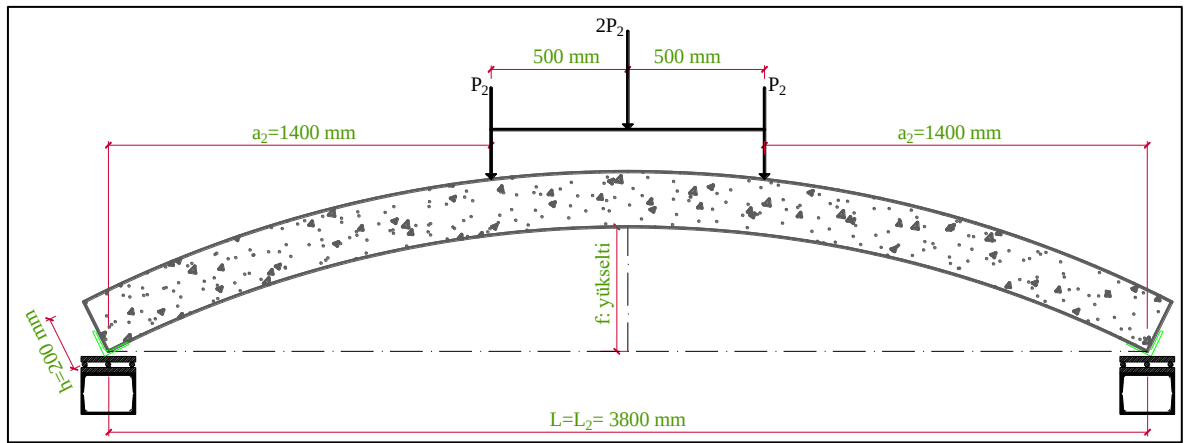
Bu bölümde özellikleri bölüm 2'de detaylı olarak anlatılan 15 adet deney elemanının testlerinin yapıldığı deney düzeneği ile ilgili genel bilgiler, deplasman ölçerlerin (LVDT) konumları, yükleme koşulları, mesnet detayları ve deneysel çalışmalarda çıkan sonuçlar ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.1. Deney Düzeneği ve Deneylerin Uygulanması

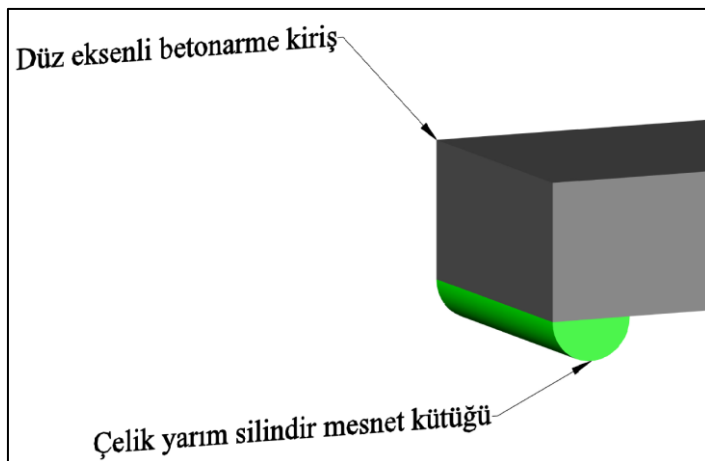
Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde, oldukça rijit ağır çelik profillerden oluşturulmuş deney platformu kullanılmıştır. Deneyler sırasında, 3 adet deplasman ölçer (LDVT-4, LVDT-8, LVDT-9) ile toplam 3 noktadan sürekli düşey deplasman değerleri ölçülmüştür. Bu deplasman ölçerlerden LVDT-4 tam kiriş açıklık ortasına, LVDT-8 500 mm sağ tarafına tam yük mesnedinin altına ve LVDT-9 ise 500 mm sol tarafa yine diğer yük mesnedinin tam altına konumlandırılmıştır. Tüm deney elemanları iki noktadan monotonik yüklenerek dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Yük noktaları, tam kiriş açıklık ortasının 500 mm sağ ve sol noktalarından kirişe yükleme yapılacak şekilde belirlenmiştir. Ek gerilmeler oluşmaması için kiriş tam ekseninden yüklenmiştir. Yük noktaları arasındaki uzaklık, düzgün yayılı yükleme altındaki moment diyagramını benzeştirecek bir moment diyagramı ortaya çıkaracak şekilde seçilmiştir. Anlık yükleme değerleri ve bu değerlere karşılık gelen her üç deplasman ölçerden alınan veriler kayıt altına alınmıştır. Her elemanın mesnetleri düşeyde deplasmana izin verilmeyecek şekilde sabitlenmiş fakat yatayda ötelenebilecek şekilde serbest bırakılmıştır. Yük hücresi ucunun 135 mm'den daha fazla ileri gidememesi nedeni ile deneyler 135 mm düşey deplasman seviyesinde kesilmiş, deney elemanı sabitlenerek yük hücresinin altı çelik plakalarla doldurulup deneye devam edilmiştir. Deneylere öncelikle düz eksenli yani referans elemanlar test edilerek başlanmış daha sonra eğri eksenli kiriş numuneleri ile devam edilmiştir. Aşağıda hem referans yani düz eksenli kirişlerin hem de eğri eksenli kirişlerin serbest cisim diyagramı ve mesnet detayları verilmiştir. Ayrıca her deney elemanının anlatıldığı alt bölümlerde deney düzeneği ve deney elemanı ile ilgili ayrıntılı çizim eklenmiştir.



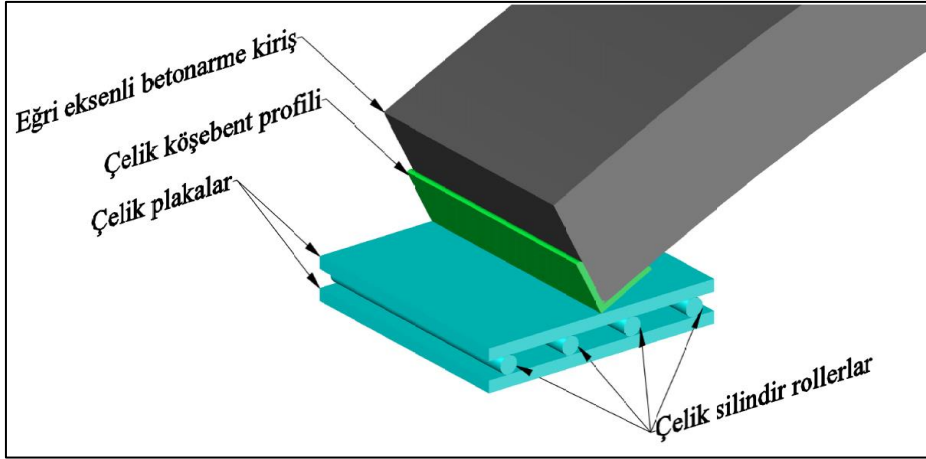
Şekil 3.1. Referans deney elemanları (L-0, M-0, H-0) için serbest cisim diyagramı



Şekil 3.2. Eğri eksenli kiriş elemanları için serbest cisim diyagramı



Şekil 3.3. Düz eksenli referans kiriş elemanlar için mesnet detayı



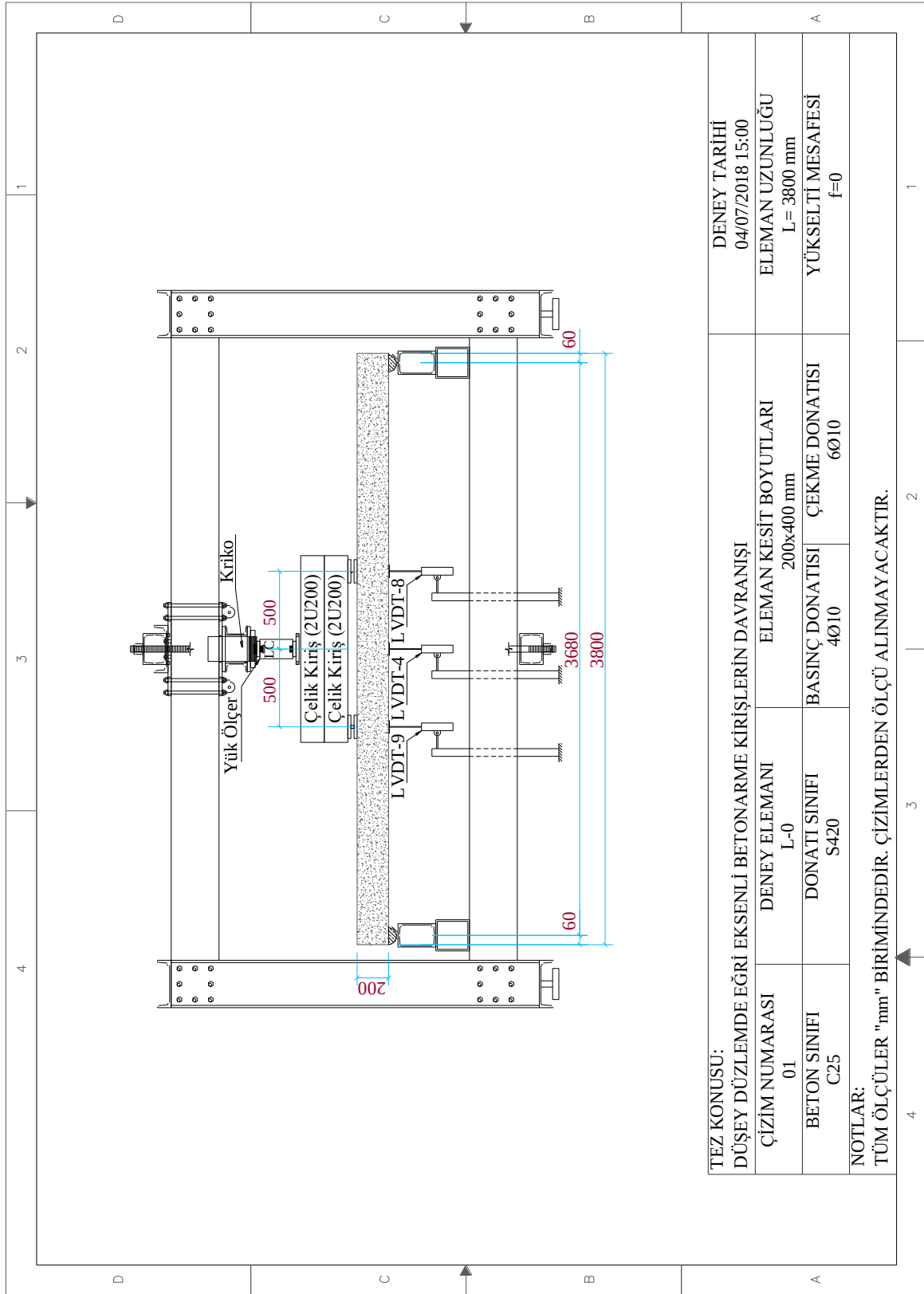
Şekil 3.4. Eğri eksenli kirişler için mesnet detayı

3.2. L-0 Elemanı Deneyi

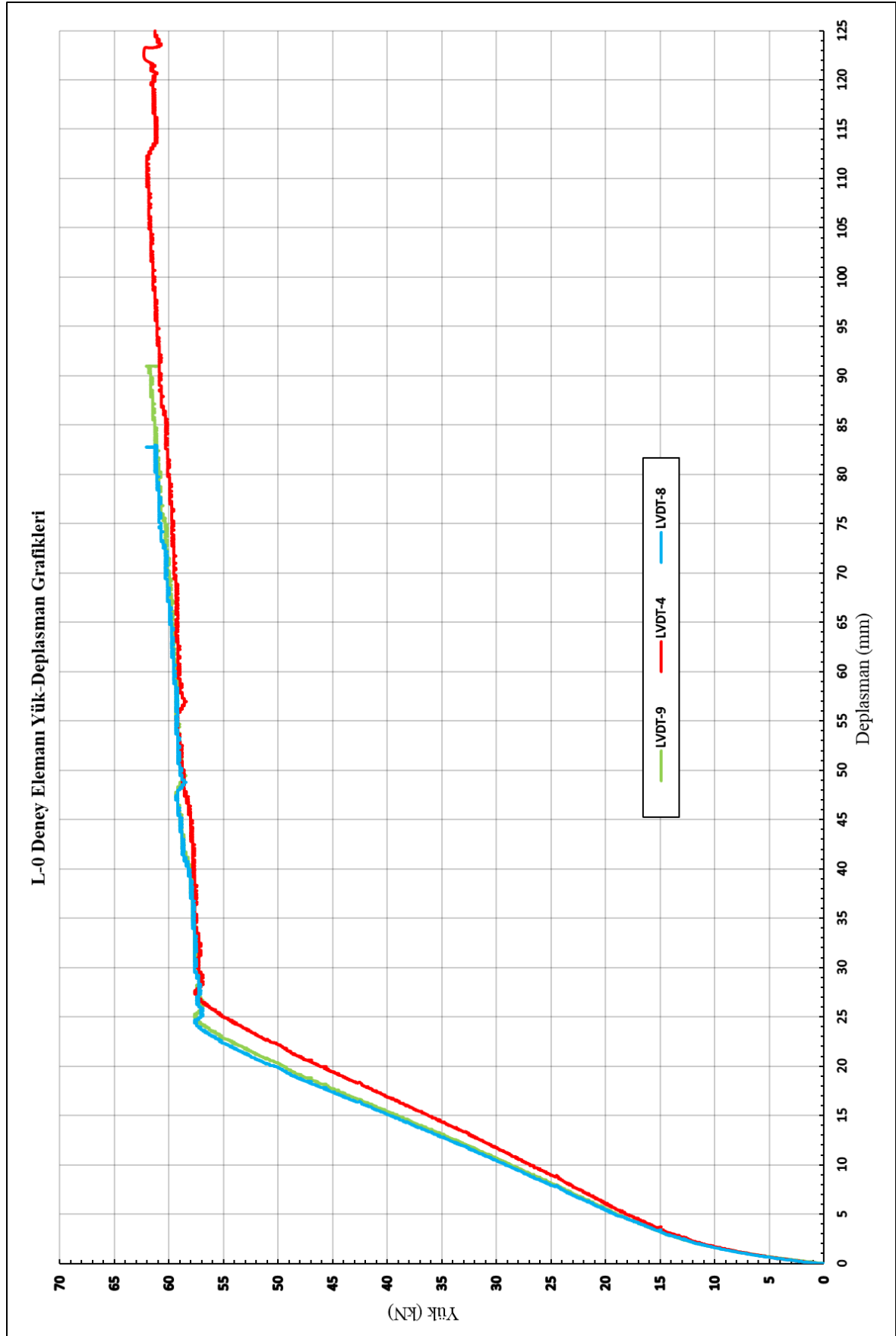
Yükselti mesafesi $f=0$ mm olan, donatı yoğunluğu az, referans düz eksenli kiriş numunesi L-0 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil 3.6’da ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 19 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 5,5 mm seviyesine çıkana kadar kiriş üzerinde herhangi bir çatlak gözlenmedi.
- Yük 23 kN açıklık ortası deplasman değeri 7,9 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında 0,1 mm boyutlarında bir eğilme çatlak gözlemlendi.
- Yük 29 kN açıklık ortası deplasman değeri 11,2 mm seviyesinde iken, sağ ve sol yük uygulama noktaları altında yani LVDT-9 ve LVDT-8 deplasman ölçerlerinin bulunduğu noktalarda ikişer adet 0,1 mm boyutlarında eğilme çatlak gözlemlendi.
- Yük seviyesi 30-35 kN değerlerinde iken sağ ve sol kesme kollarında 0,1 mm’den küçük eğilme çatlak tipinde yük uygulama noktalarına yakın bölgelerde çatlaklar gözlemlendi.
- Yük 44 kN açıklık ortası deplasman değeri 19 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak açıklık ortasında belirlenmiştir.
- Yük 49,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 21,6 mm seviyesinde iken, kesme kollarında herhangi bir kesme çatlak gözlenmedi fakat mesnetlerden uzak eğilme tipi çatlakların olduğu görüldü.

- Yük 54 kN açıklık ortası deplasman değeri 24,5 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği tam açıklık ortasında 0,3 mm boyutlarında eğilme tipi çatlak olarak gözlenmiştir ve sabit moment bölgesinde karakteristik çatlak genişliğinin 0,2 mm civarında olduğu grlmştir.
- Yük 57,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 27,3 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladığı görüldü. Kirişin sol ve sağ alın yüzlerinde herhangi bir deformasyon ya da çatlak gözlenmediği için donatılarda sıyrılma olmadığı anlaşıldı.
- Yük 57,64 kN açıklık ortası deplasman değeri 39 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği açıklık ortasında 1 mm ve sabit moment bölgesinde karakteristik çatlak genişliğinin 1 mm civarında olduğu görüldü. Sabit moment bölgesinde yedi adet 1 mm genişliğinde çatlak olduğu görüldü.
- Yük 58,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 46 mm seviyesinde iken, kesme kollarında çatlakların sınırlı olduğu, sağ ve sol kesme kollarındaki çatlak genişliğinin maksimum 0,2 mm civarında olduğu ve bu çatlakların da yük uygulama noktalarına yakın olan çatlaklar olduğu görüldü.
- Yük 59,36 kN açıklık ortası deplasman değeri 55 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliğinin açıklık ortasında 1,2 mm olduğu gözlendi.
- Yük 60,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 86 mm seviyesinde iken, eğilme tipi çatlakların sabit moment bölgesinde yoğunlaştığı ve bu bölgede yaklaşık 10 cm aralıklarla konumlandığı, karakteristik çatlak genişliğinin 1,2 mm civarında ve maksimum çatlak genişliğinin 2 mm civarında olduğu grlmştir.
- Yük 64,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 135 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliğinin ve karakteristik çatlak genişliğinin 2 mm düzeyinde olduğu görüldü. Çatlakların büyük bir kısmının sabit moment bölgesinde olduğu ve kesme kollarında hasar olmadığı ve yüklemeden ötürü oluşan tüm eğriliğin sabit moment bölgesinde olduğu görüldü.
- Deney sonucunda, az donatılı referans kiriş numunesi L-0 için ölçülen akma başlangıç yükü 57,6 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 27,3 mm olarak gözlendi. Deney esnasında L-0 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 64,5 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 135 mm olarak llmştir.



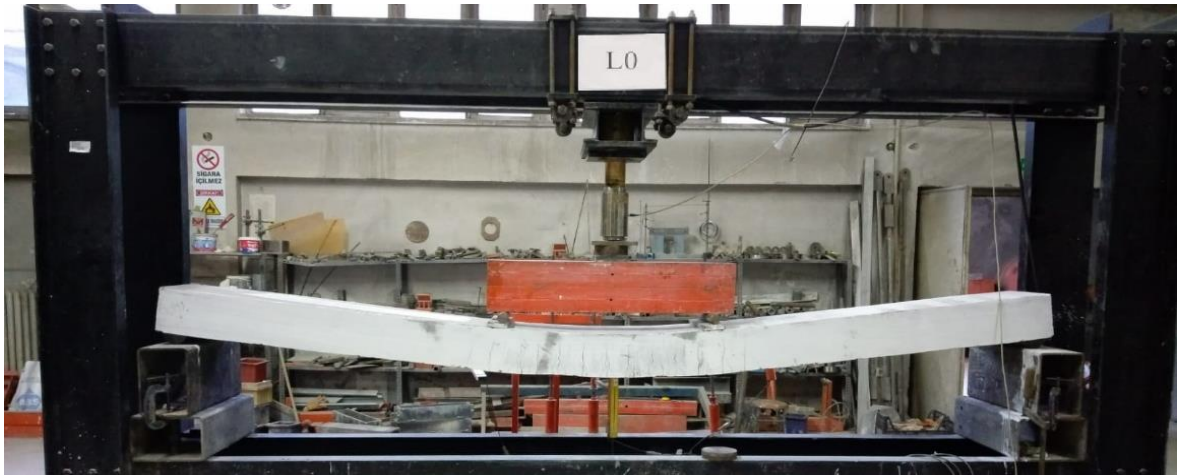
Şekil 3.5. L-0 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.6. L-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.1. L-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.2. L-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü



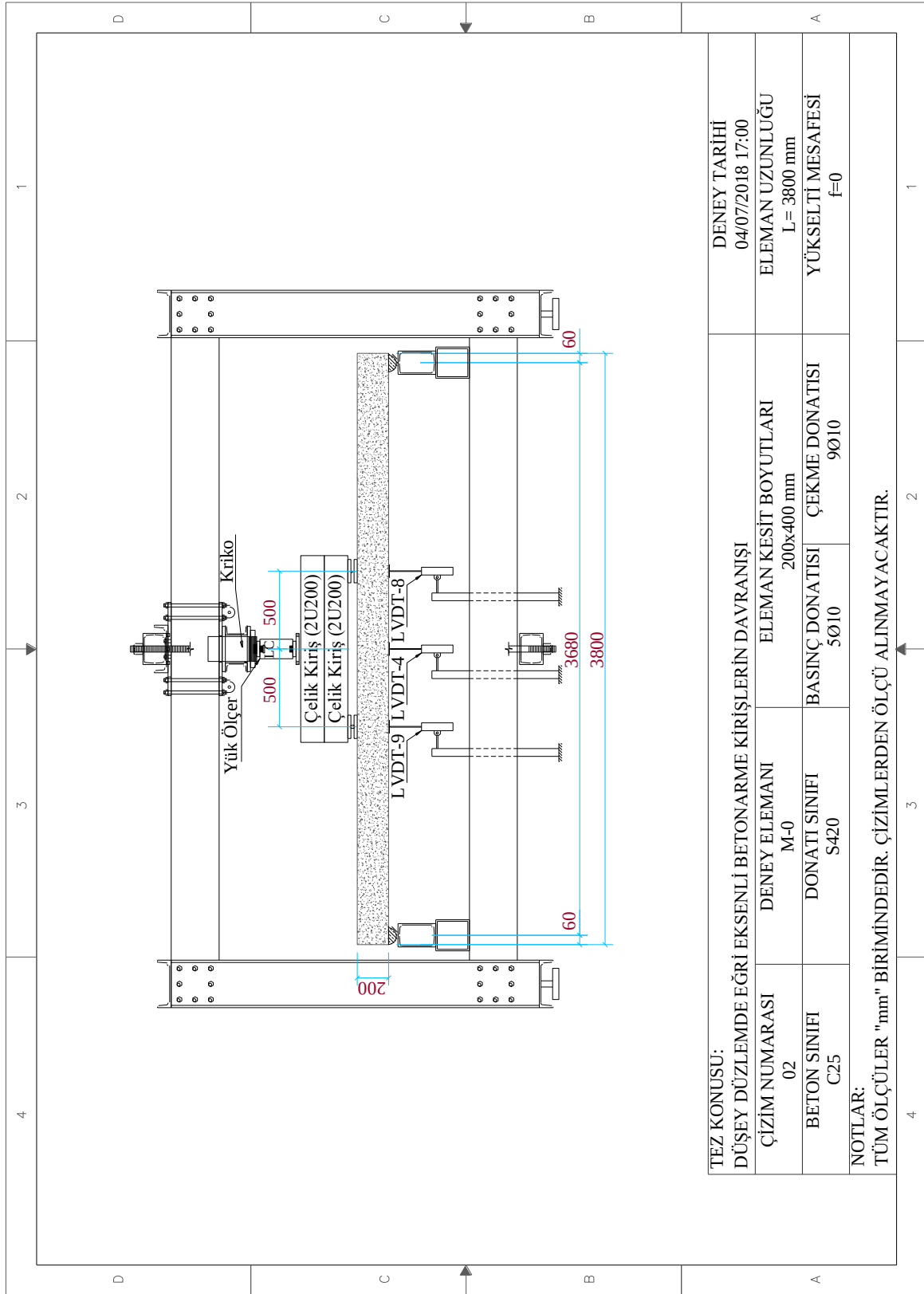
Resim 3.3. L-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.3. M-0 Elemanı Deneyi

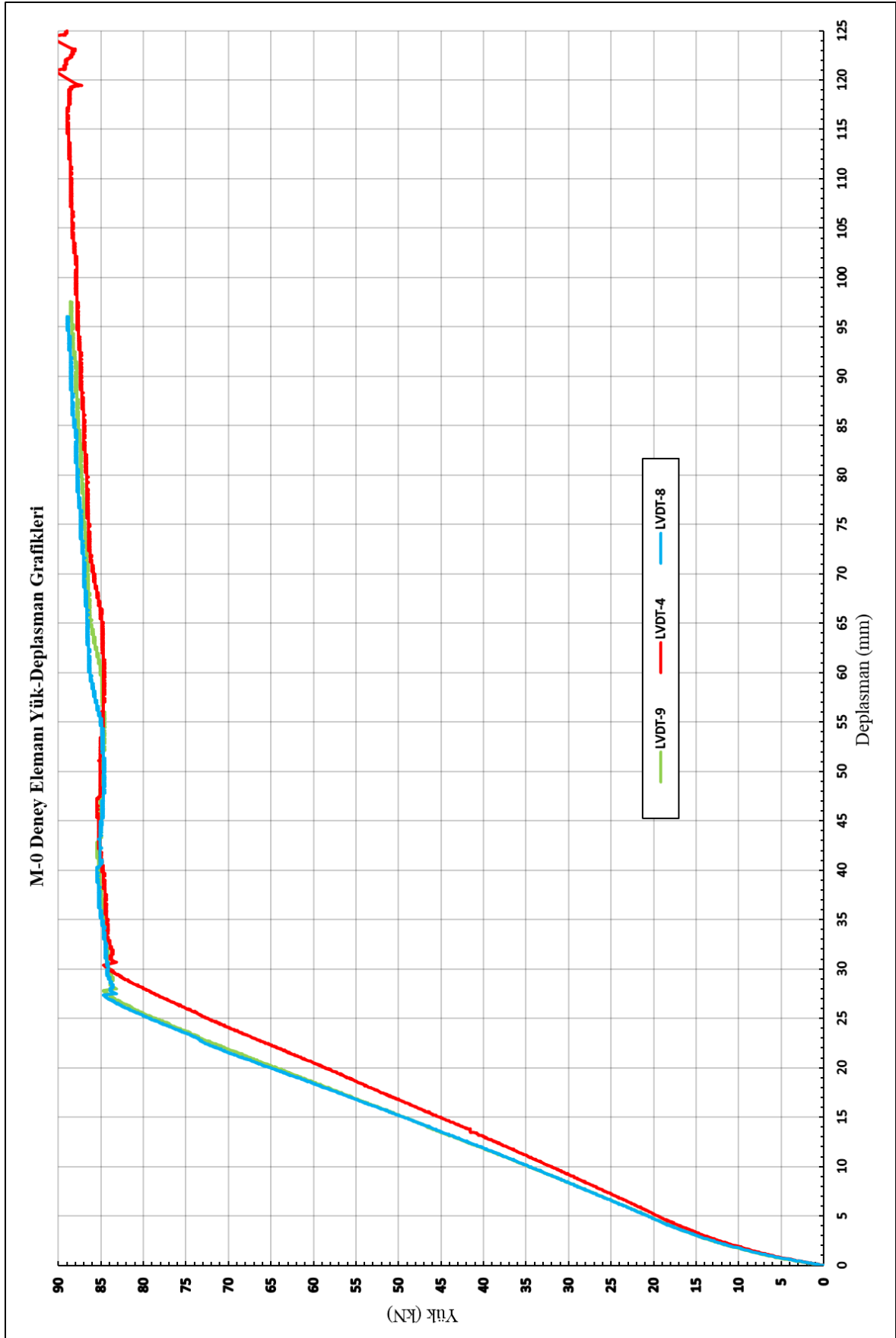
Yükselti mesafesi $f=0$ mm olan, donatı yoğunluğu orta, referans düz kiriş numunesi M-0 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.8’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 34 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 10,7 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde 0,1 mm’den küçük eğilme çatlakları gözlemlendi.
- Yük 49 kN açıklık ortası deplasman değeri 16,4 mm seviyesinde iken, çatlakların sabit moment bölgesinde oluştuğu ve maksimum çatlak genişliğinin 0,1 mm olduğu gözlemlendi.
- Yük 57 kN açıklık ortası deplasman değeri 19,4 mm seviyesinde iken, sağ ve sol kesme kollarında oluşan 0,05 mm boyutlarında çatlaklar gözlemlendi.
- Yük 72 kN açıklık ortası deplasman değeri 24,7 mm seviyesinde iken maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 83,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 29,6 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,3 mm ve kesme kollarındaki maksimum çatlak genişliği 0,1 mm’den küçük olarak gözlemlendi.
- Yük 84,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 30,3 mm seviyesinde iken çekme donatılarının akmaya başladığı gözlemlendi ve hemen ardından maksimum çatlak genişliği 0,6 mm değerinde eğilme çatlağı olarak gözlemlendi.
- Yük 84,9 kN, açıklık ortası deplasman değeri 40 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,8 mm ve karakteristik çatlak genişliği 0,7 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 84,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 59 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 1,2 mm ve karakteristik çatlak genişliği 1 mm olarak gözlemlendi. Aynı anda kesme kollarındaki maksimum çatlak genişliği 0,1 mm’den küçük, kesme kolları doğrusala çok yakın ve hasar düzeyi rahatlıkla sıfır varsayılabilir durumda olduğu gözlemlendi.
- Yük 86 kN açıklık ortası deplasman değeri 71 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 1,5 mm ve karakteristik çatlak genişliği 1,2 mm olarak gözlemlendi ve çatlakların sabit moment bölgesinde yaklaşık 10 cm aralıklara dağıldığı ve kesme kollarının hâlâ doğrusala yakın olduğu görüldü.

- Yük 86,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 80 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği ve karakteristik çatlak genişliğinin 1,5 mm olduğu gözlendi.
- Yük 87,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 96 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 1,8 mm ve karakteristik çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlendi. Aynı seviyede kesme kollarında herhangi bir değişiklik olmadığı ve hasar düzeyinin sıfıra yakın olduğu görüldü.
- Yük 88 kN açıklık ortası deplasman değeri 123 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 2,5 mm ve karakteristik çatlak genişliği 2 mm seviyelerinde olduğu görüldü. Aynı anda betonda herhangi bir ezilme belirtisi olmadığı görüldü. Bu aşamada tarafsız eksen derinliğinin 3 cm ya da daha küçük olduğu belirlendi.
- Yük 87 kN açıklık ortası deplasman değeri 125 mm seviyesinde iken, deneye son verildi.
- Deney sonucunda, orta donatılı referans kiriş numunesi M-0 için ölçülen akma başlangıç yükü 84,5 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 30,2 mm olarak gözlendi. Deney esnasında M-0 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 91,1 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 124,4 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7. M-0 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.8. M-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.4. M-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.5. M-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü



Resim 3.6. M-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

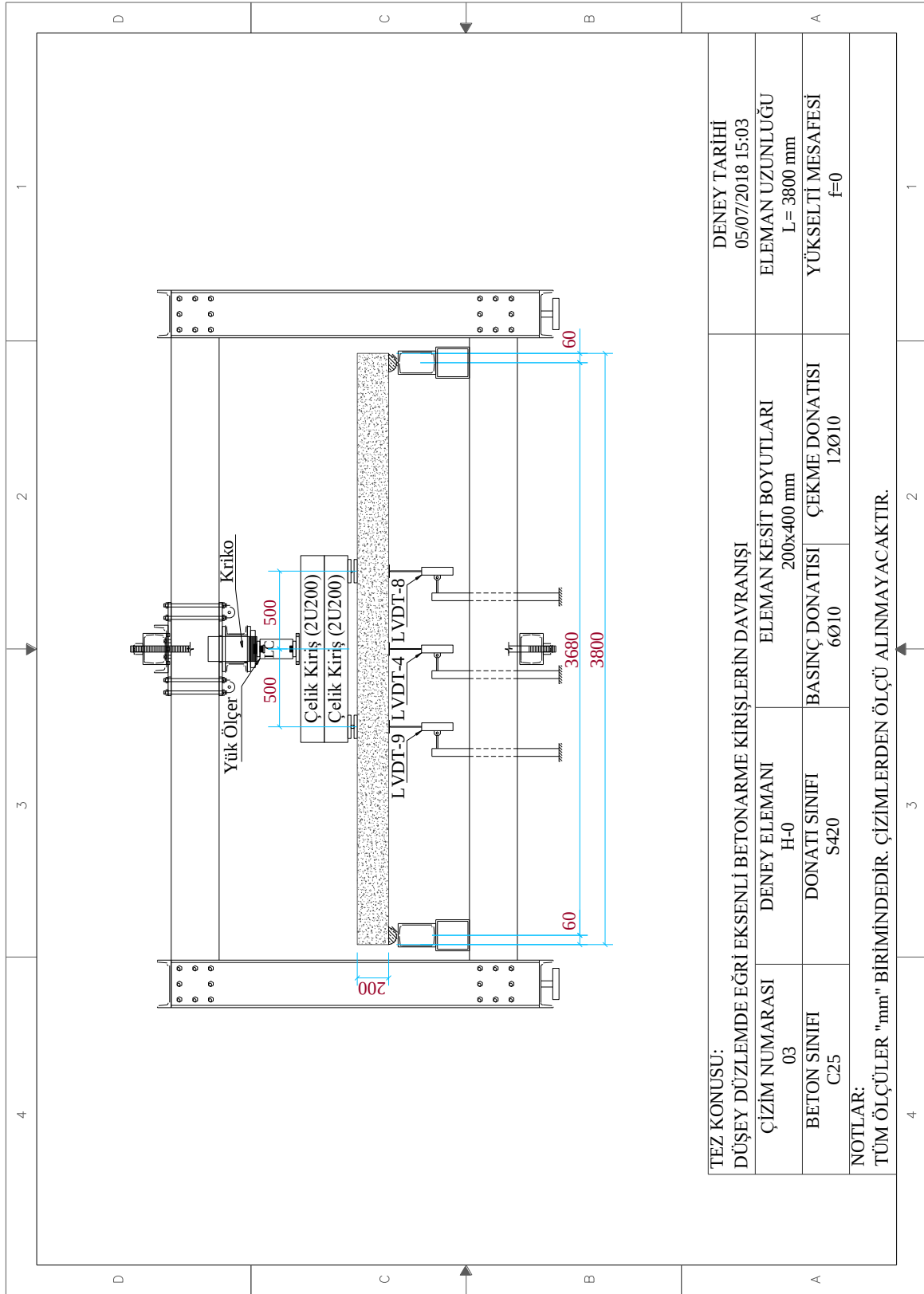
3.4. H-0 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=0$ mm olan, donatı yoğunluğu çok, referans düz kiriş numunesi H-0 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.10'da ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

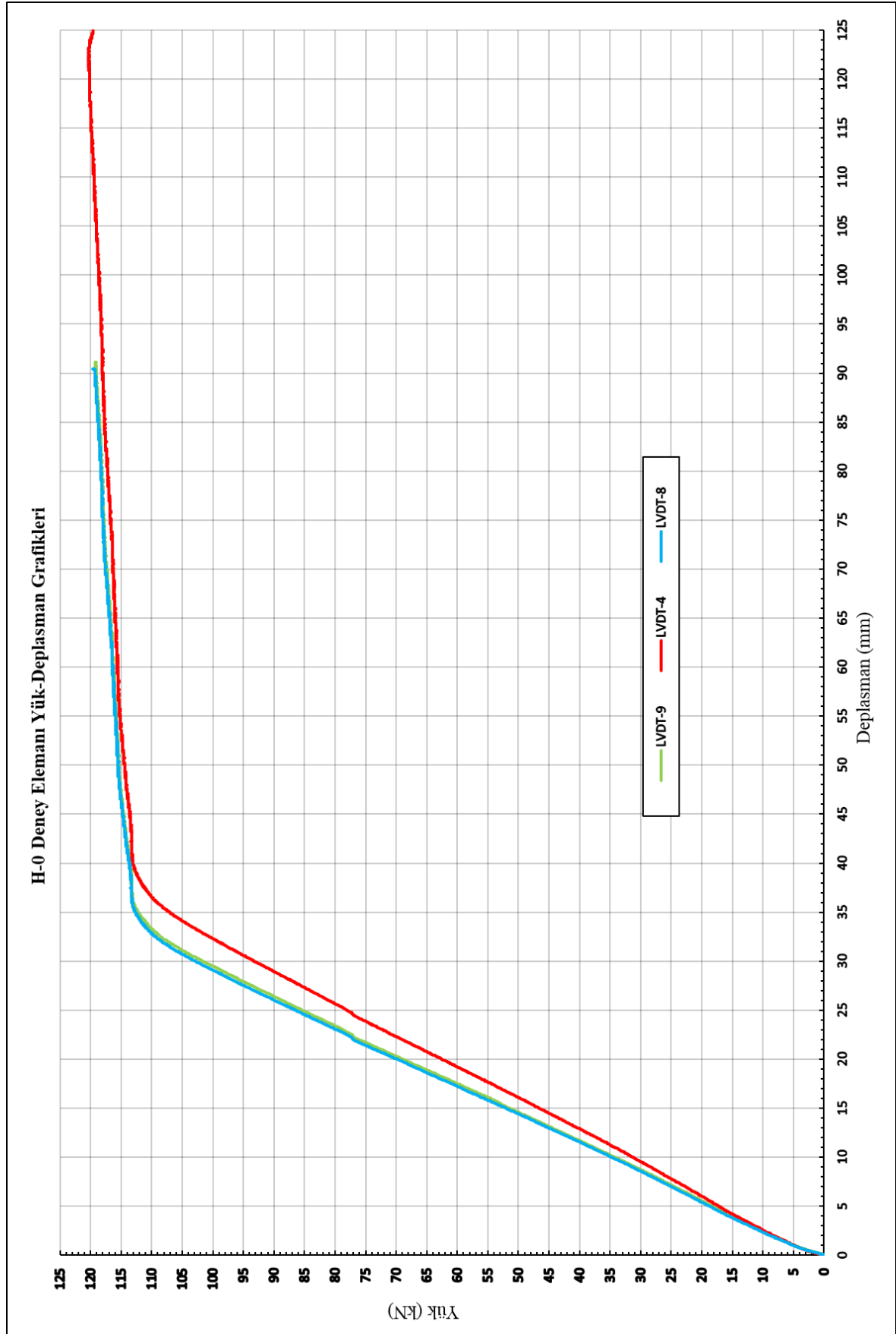
- Yük 6 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 1,4 mm seviyelerinde iken, kirişte herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlemlendi.
- Yük 15,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 4,4 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesi ortasında 0,05 mm'den daha küçük eğilme çatlakları oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 25,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 7,9 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesinde yaklaşık 10 cm ara ile 0,05 mm düzeyinde eğilme çatlakları oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 35 kN açıklık ortası deplasman değeri 11,3 mm seviyesinde iken, sağ ve sol kesme kolunda yük uygulama noktasına yakın bölgede 0,1 mm'den küçük eğilme çatlakları oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 54,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 17,4 mm seviyesinde iken, sol yük uygulama noktasının altında maksimum çatlak genişliği 0,2 mm ve sabit moment bölgesinde karakteristik çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 63,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 20,3 mm seviyesinde iken, sağ ve sol kesme kollarında da, eşit ve düzenli şekilde yaklaşık 10 cm aralıklarla eğilme çatlakları oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 83,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 26,7 mm seviyesinde iken maksimum çatlak genişliğinin 0,3 mm düzeyinde olduğu gözlemlendi.
- Yük 102,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 33,1 mm seviyesinde iken, tarafsız eksen derinliği yaklaşık 7 cm olarak gözlemlendi.
- Yük 112,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 38,8 mm seviyelerinde iken, çekme donatılarının akma sınırına ulaştığı ve maksimum çatlak genişliği 0,4 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 113,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 46 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,6 mm olarak gözlemlendi. Çatlaklar genel olarak sabit moment bölgesinde eşit sayılabilecek aralıklarla konumlanmış olarak gözlemlendi. Sağ ve sol kesme kollarında da

düzenli aralıklara eğilme çatlakları gözlemlendi ve maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi.

- Yük 115 kN açıklık ortası deplasman değeri 56 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,8 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 115,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 60 mm seviyesinde iken tarafsız eksen derinliği yaklaşık 5 cm olarak belirlendi.
- Yük 115,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 65 mm seviyesinde iken çatlakların dallanıp köklenmeye başladığı görüldü, bu tip çatlakların nervürlü donatı kullanılmasından ötürü olduğu bilinmektedir.
- Yük 117,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 80 mm seviyelerinde iken, kirişte herhangi bir ezilme belirtisi olmadığı ve maksimum çatlak genişliği değerinin 1 mm olduğu ve kesme kollarındaki çatlakların sınırlı kaldığı gözlemlendi.
- Yük 118 kN açıklık ortası deplasman değeri 91 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,2 mm tarafsız eksen derinliği 3,5 cm olarak gözlemlendi.
- Yük 119 kN açıklık ortası deplasman değeri 105 mm seviyesinde iken, açıklık ortası kiriş üst yüzünde çok hafif bir ezilme belirtisi gözlemlendi.
- Yük 119,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 110 mm seviyesinde iken maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 119,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 113 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktasından 15 cm içerde ezilme başladığı gözlemlendi.
- Yük 119,6 kN açıklık ortası deplasman 125 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,2 mm olarak gözlemlendi ve açıklık ortasındaki ezilme belirtisi sınırlı kaldı ve sağ yük uygulama noktası yakınındaki ezilme bir parça daha ilerledi.
- Yük 118,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 129,5 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 2 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 118 kN açıklık ortası deplasman değeri 139,3 mm seviyesinde iken, ezilme sağ yük uygulama noktasına yakın bölgede sınırlı kaldı, ezilen bölge genişliği yaklaşık 10 cm ve kiriş enine doğru yaklaşık 7 cm olarak belirlendi ve maksimum çatlak genişliği yaklaşık 2,5 mm olarak gözlemlendi. Kiriş tipik bir eğilme kirişi gibi davrandı.
- Deney sonucunda, yoğun donatılı referans kiriş numunesi H-0 için ölçülen akma başlangıç yükü 112,5 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 38,8 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında H-0 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 120,9 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 129,5 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.9. H-0 deney elemanı için deney düzeneği



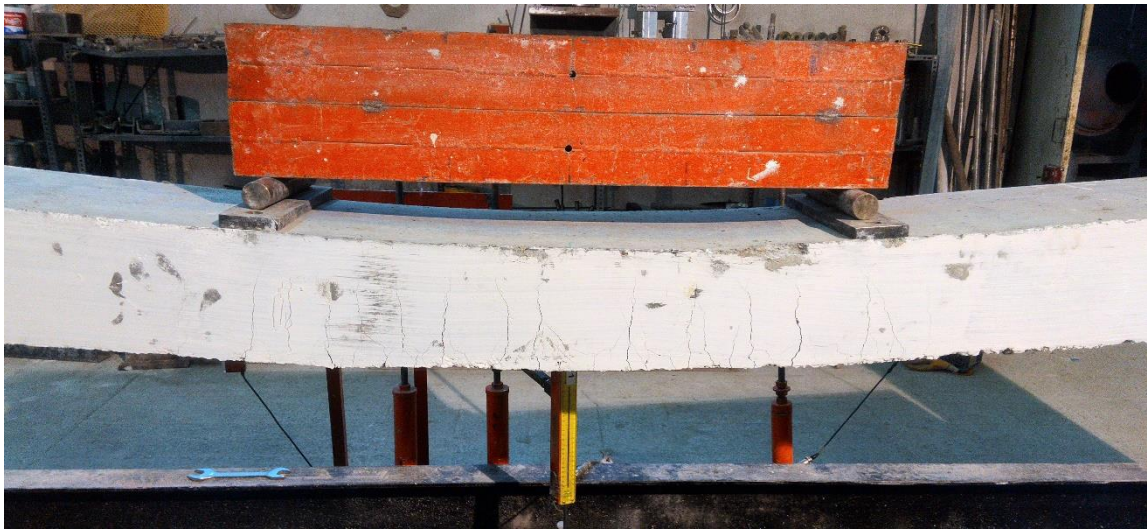
Şekil 3.10. H-0 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.7. H-0 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.8. H-0 deney elemanı deney sonu genel görünümü

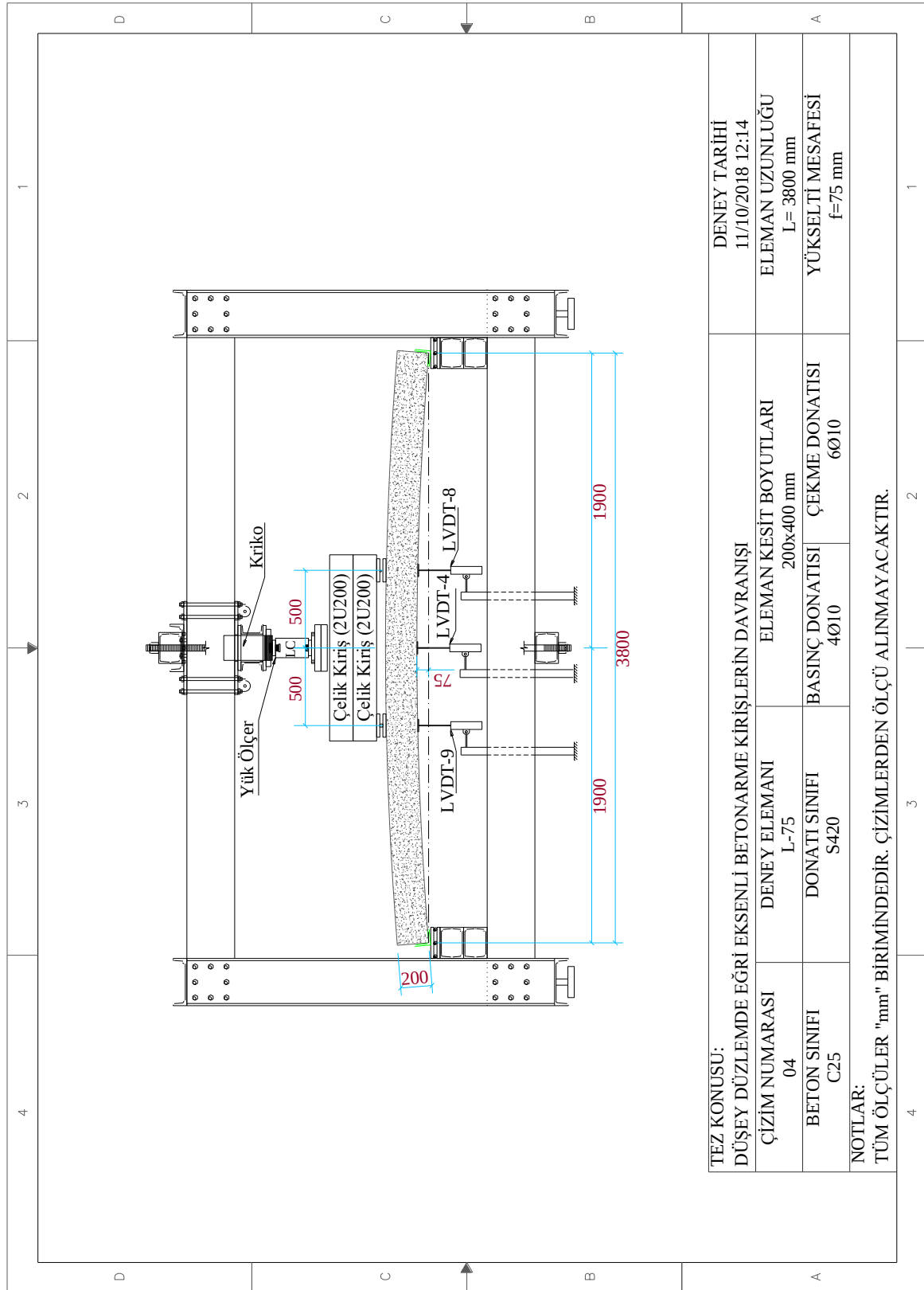


Resim 3.9. H-0 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

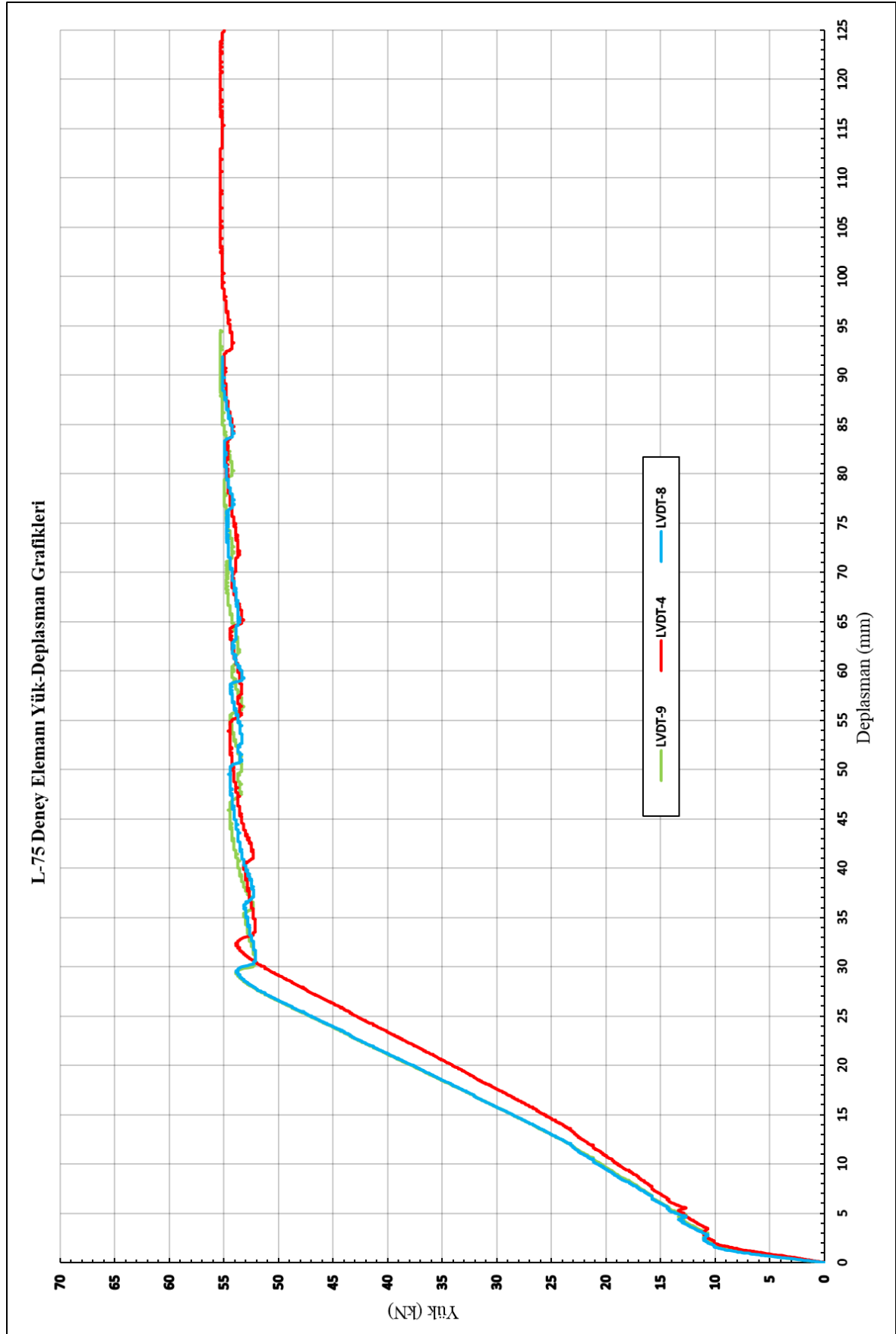
3.5. L -75 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=75$ mm olan, donatı yoğunluğu az eğri eksenli kiriş numunesi L-75 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekil 3.12’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

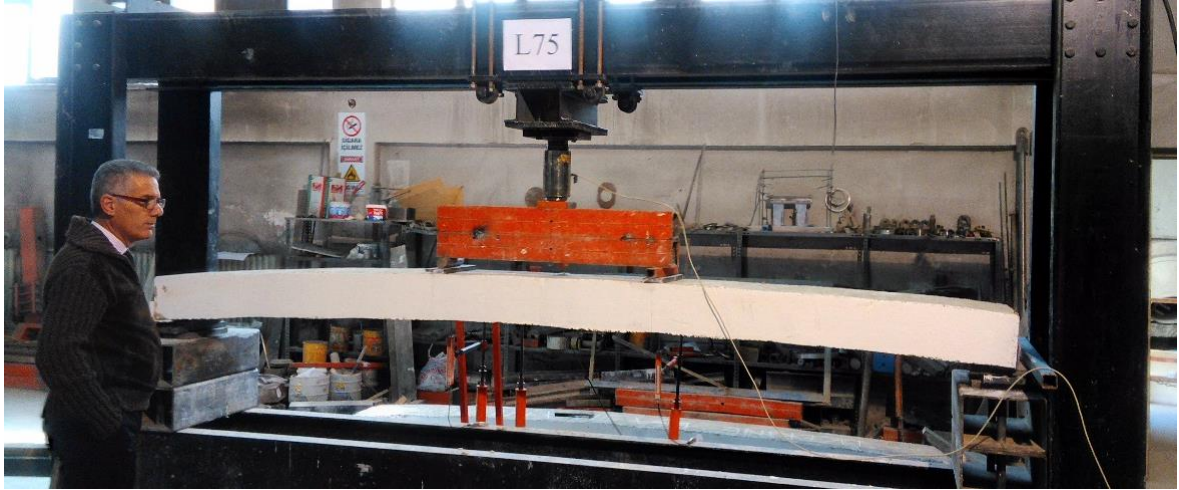
- Yük seviyesi 11,7 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 3,9 mm seviyesinde iken, çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 37,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 22 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 53,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 32,1 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladığı gözlemlendi.
- Yük seviyesi 54,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 50 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 55,32 kN açıklık ortası deplasman değeri 108 mm seviyesinde iken, kirişin açıklık ortasında kiriş üst yüzünde betonda ezilme başladığı gözlemlendi.
- Deney, açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 174 mm seviyesine gelene kadar sürdürüldü. Kirişin açıklık ortasında, kirişin üst yüzünde, beton ezilmesinin belirgin duruma geldiği görüldü.
- Deney sonucunda kesme kollarında herhangi bir çatlak gözlenmedi. Tüm eğilme tipi çatlakların, sabit moment bölgesinde, eşit aralıklarla oluştuğu gözlemlendi.
- Deney sonucunda, az donatılı yükselti mesafesi 75 mm olan kiriş numunesi L-75 için ölçülen akma başlangıç yükü 53,7 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 31,9 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında L-75 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 55,3 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 102,4 mm olarak ölçülmüştür.



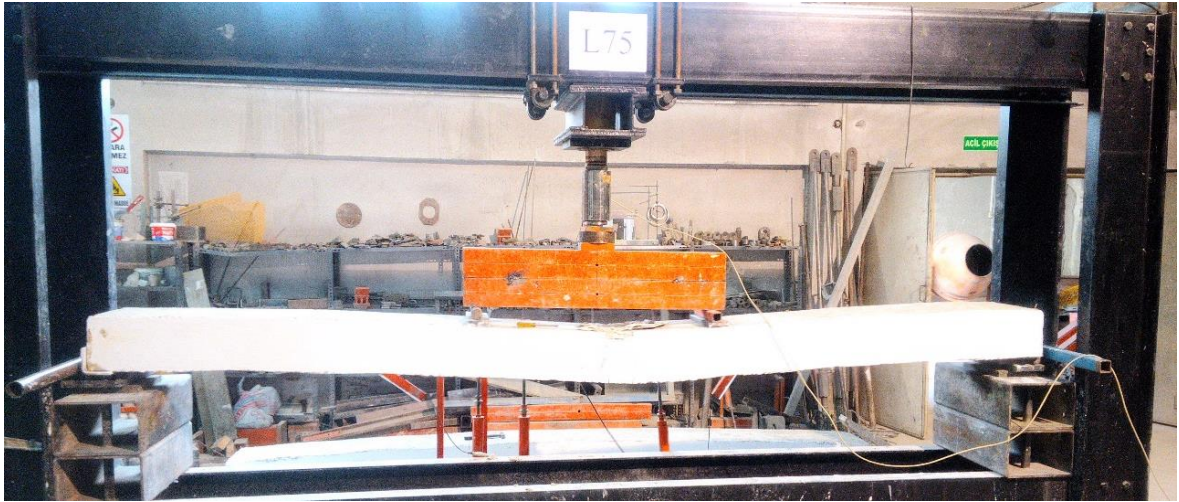
Şekil 3.11. L-75 deney elemanı için deney düzeneği



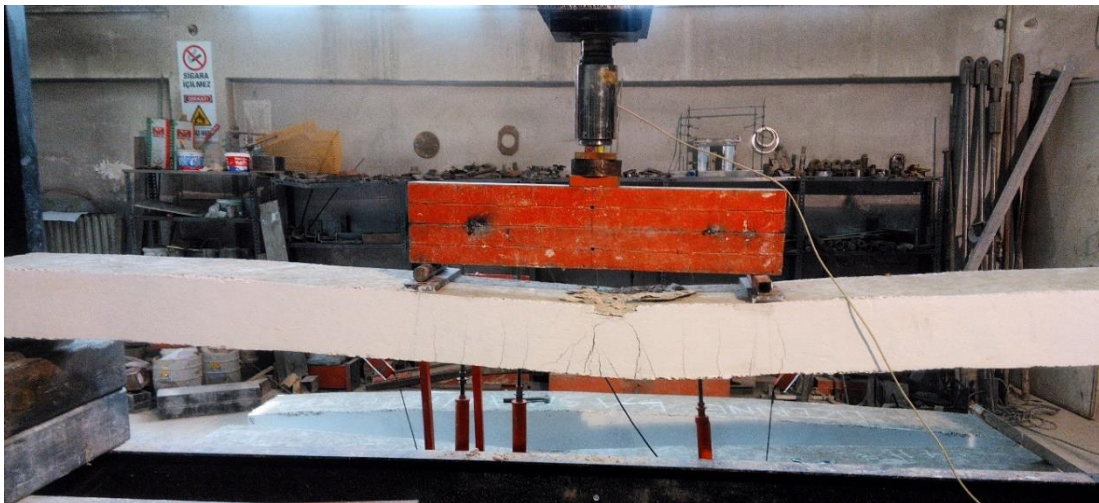
Şekil 3.12. L-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.10. L-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.11. L-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü

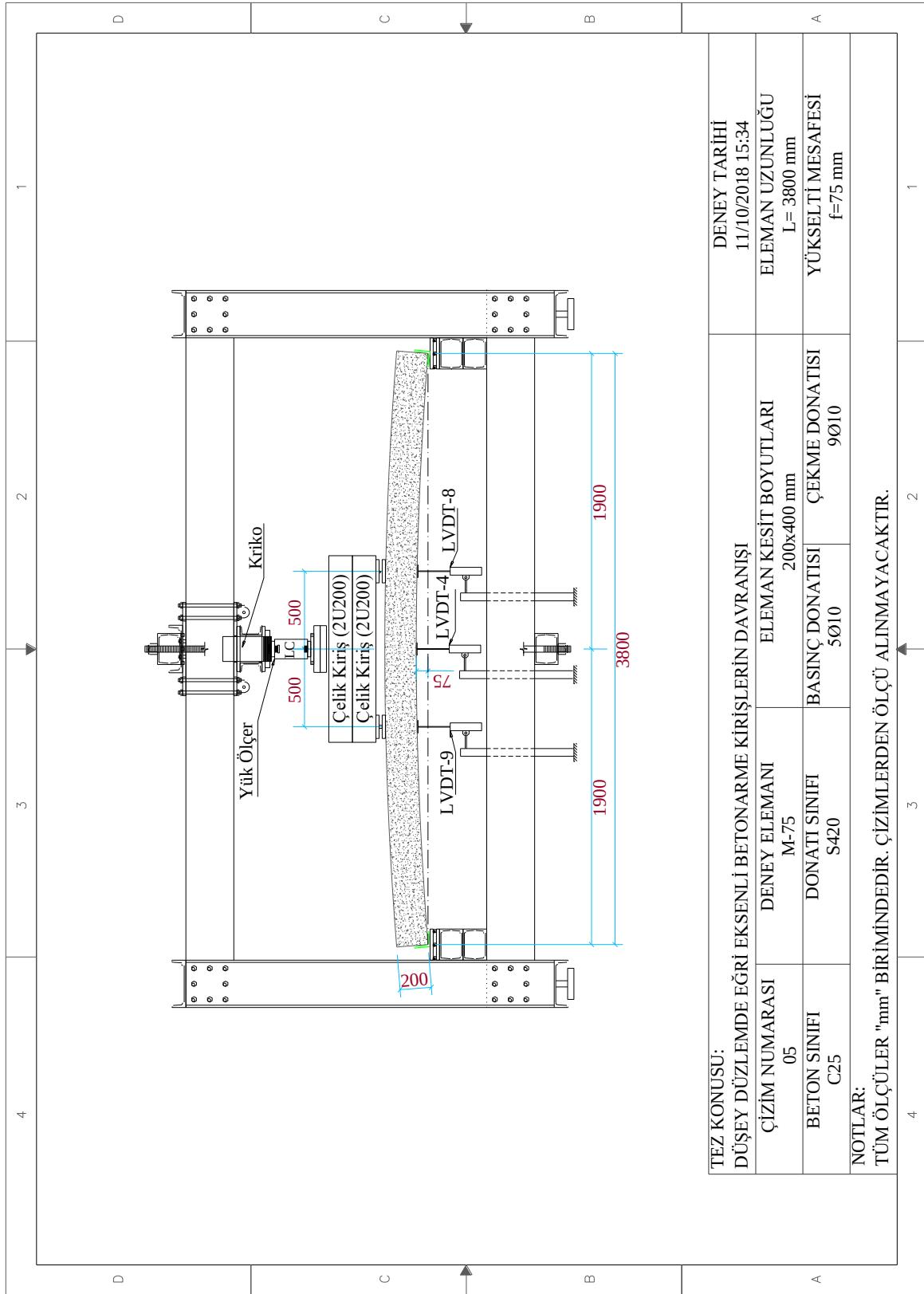


Resim 3.12. L-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

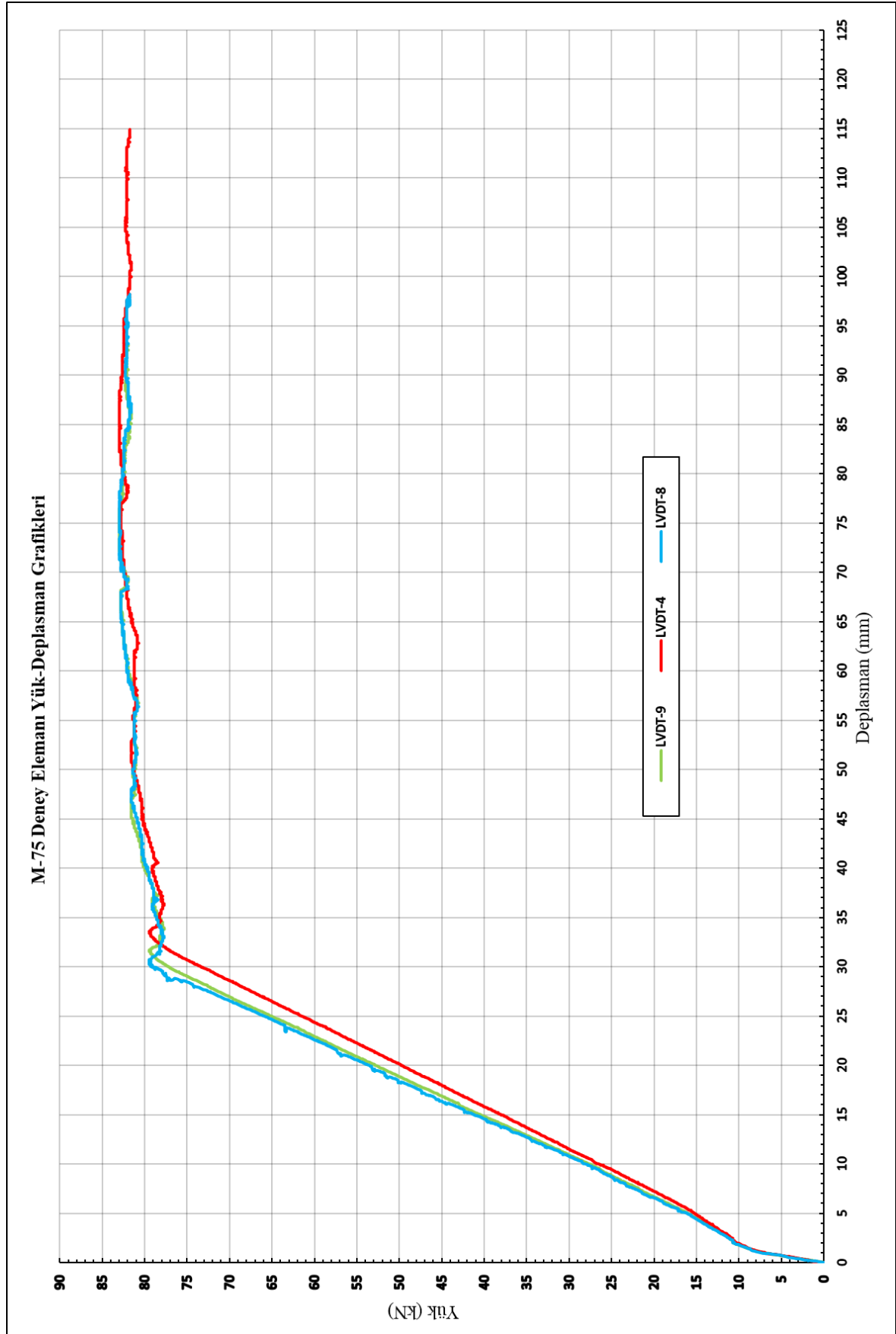
3.6. M-75 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=75$ mm olan, donatı yoğunluğu orta eğri eksenli kiriş numunesi M-75 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.13’de verilmiştir. Şekil 3.14’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

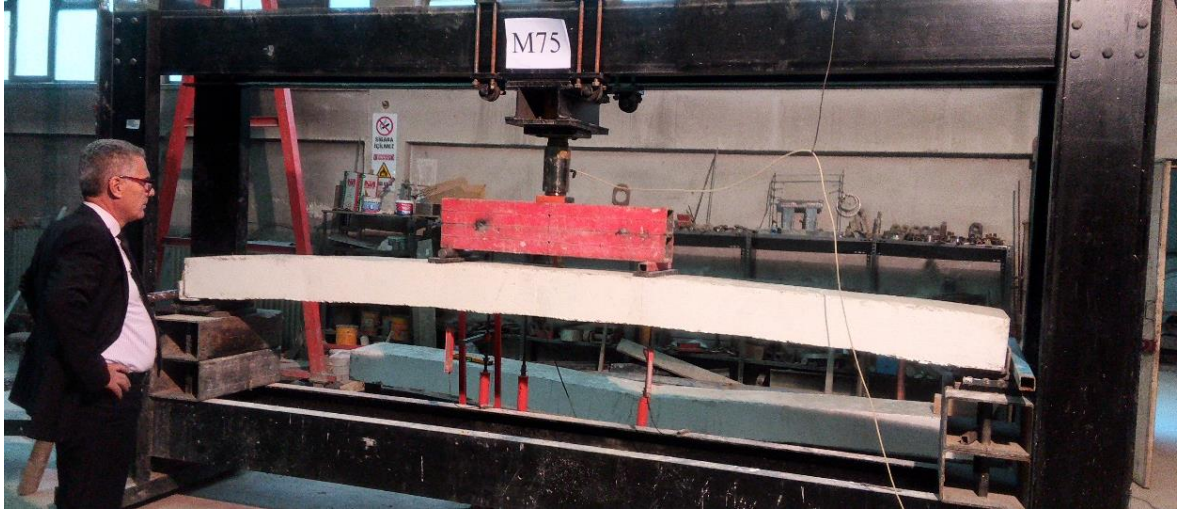
- Yük 19,87 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 7,17 mm seviyesinde iken, 0,05 mm genişliğinde ilk çatlak oluşumu gözlemlendi.
- Yük 47 kN açıklık ortası deplasman değeri 18,8 mm iken, sabit moment bölgesinde, düzenli aralıklarla eğilme çatlakları oluştu ve maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi. Ayrıca kesme kollarında 0,2 mm’den küçük çatlaklar gözlemlendi.
- Yük 79,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 33,08 mm seviyesinde iken, çekme donatılarının akma sınırına ulaştığı gözlemlendi ve maksimum çatlak genişliği 0,5 mm olarak belirlendi.
- Yük 81,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 50 mm seviyesinde iken, çatlak genişliğinin 0,8 mm olduğu ve sabit moment bölgesinin eğrilikliğini kaybederek düzleştiği gözlemlendi. Ayrıca kesme kollarındaki çatlakların 0,2 mm’den küçük olduğu gözlemlendi.
- Yük 82,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 70 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliğinin 1,5 mm olduğu ve sabit moment bölgesinde düzenli aralıklarla yaklaşık 8 tane 1,5 mm genişliğinde çatlak oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 82,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 80 mm seviyesinde iken, kirişin açıklık ortasında üst yüzünde betonda ezilme başladığı ve belirginleştiği gözlemlendi.
- Yük 81,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 114,5 mm seviyesinde iken, betonda ezilme kabuk dökülmesi şeklinde gözlemlendi.
- Deney açıklık ortası deplasman değeri 173 mm seviyesine kadar sürdürüldü ve kiriş açıklık ortası üst yüzünde beton ezilmesi kabuk dökülmesi şeklinde gerçekleşti. Beton üst kabuğu soyularak basınç donatısında burkulma olmadığı gözlemlendi.
- Deney sonucunda, orta donatılı yükselti mesafesi 75 mm olan kiriş numunesi M-75 için ölçülen akma başlangıç yükü 79,3 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 33,08 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında M-75 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 83 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 82,2 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.13. M-75 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.14. M-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.13. M-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.14. M-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü



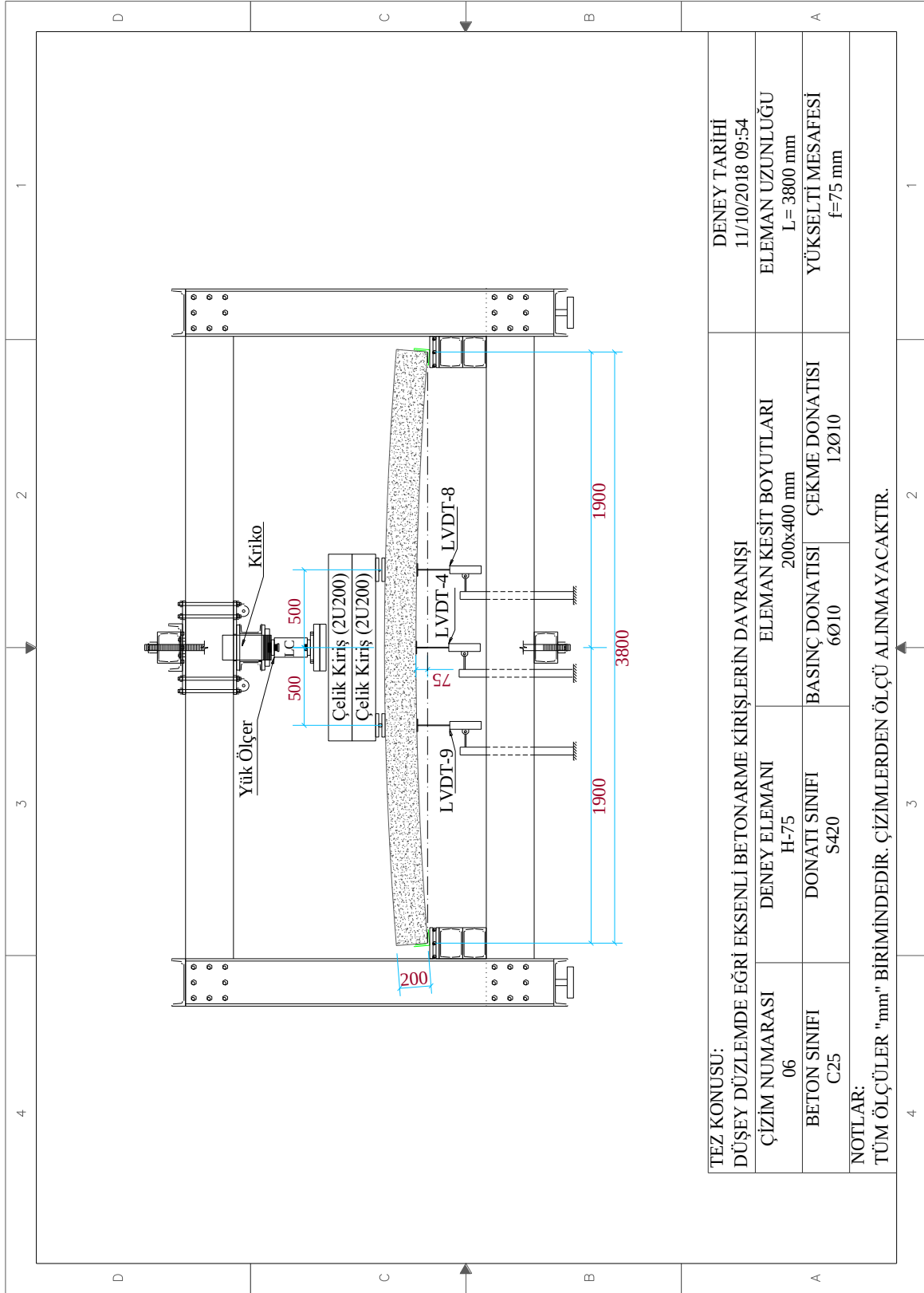
Resim 3.15. M-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.7. H-75 Elemanı Deneyi

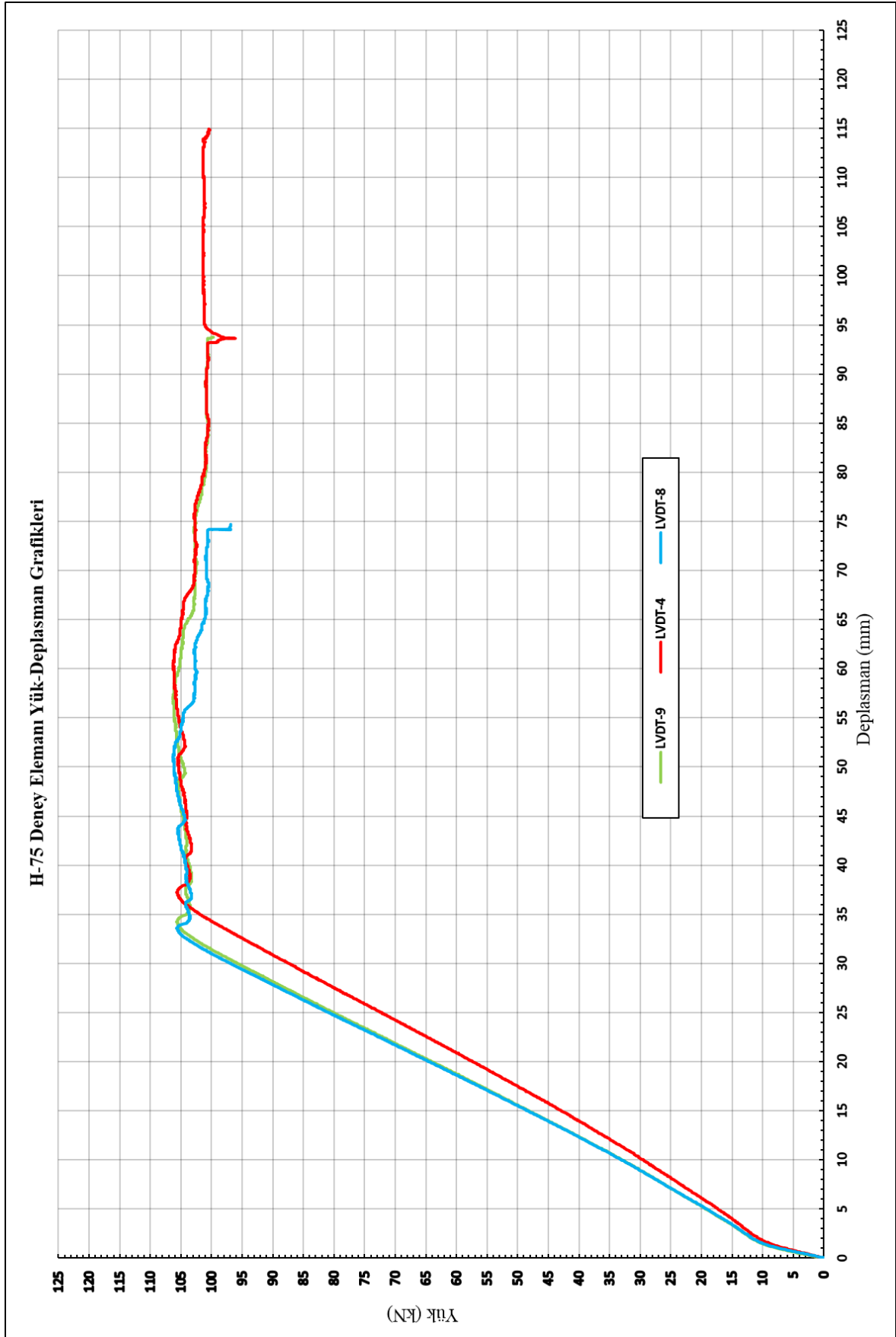
Yükselti mesafesi $f=75$ mm olan, donatı yoğunluğu çok eğri eksenli kiriş numunesi H-75 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.15’de verilmiştir. Şekil 3.16’da ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 21,7 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 6,9 mm seviyelerinde iken, çok küçük mertebede kılcal çatlaklar oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 31 kN açıklık ortası deplasman değeri 10,7 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 45,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 16,1 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 55,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 19,5 mm seviyelerinde iken, kesme kollarında kılcal çatlaklar olduğu gözlemlendi.
- Yük 79,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 27,5 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi.
- Yük 99,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 34 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,4 mm olarak belirlendi.
- Yük 105,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 36,9 mm seviyesinde iken, çekme donatıları akmaya başladı ve bu anda maksimum çatlak genişliği 0,9 mm olarak belirlendi.
- Çatlakların büyük oranda sabit moment bölgesinde yoğunlaştığı gözlemlendi.
- Yük 105,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 55 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,3 mm olarak gözlemlendi ve sabit moment bölgesinin düzleştiği görüldü. Aynı anda kesme kollarındaki çatlakların çok sınırlı kaldığı görüldü.
- Yük 105 kN açıklık ortası deplasman değeri 65 mm seviyesinde iken, sol yük uygulama noktasında (9 numaralı deplasman ölçerin bulunduğu noktanın üst tarafında) betonda ezilme meydana geldiği görüldü. Bu esnada maksimum çatlak genişliği 1,8 mm olarak belirlendi. Sol yük uygulama noktası altında beton ezilmesi meydana geldiği için (LVDT-9’un bulunduğu noktada) kirişin bu noktada diğer yük uygulama noktasına göre (LVDT-8’in bulunduğu yere göre) daha çok deplasman yaptığı gözlemlendi.

- Yük 104,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 160 mm seviyelerinde iken, sol yük uygulama noktası altındaki beton ezilmesi kabuk atması şeklinde çok belirgin bir duruma geldi ve kiriş sol tarafa doğru iyice eğildi.
- Açıklık ortası deplasman değeri 170 mm seviyesinde deneye son verildi. Sol yük uygulama noktası altında oluşan beton ezilmesi nedeni ile kopan beton parçası kaldırılarak basınç donatılarının burkulduğu belirlendi.
- Deney sonucunda, yoğun donatılı yükselti mesafesi 75 mm olan kiriş numunesi H-75 için ölçülen akma başlangıç yükü 105,6 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 36,9 mm olarak gözlendi. Deney esnasında H-75 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri, 111,6 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 122 mm olarak llmştur.



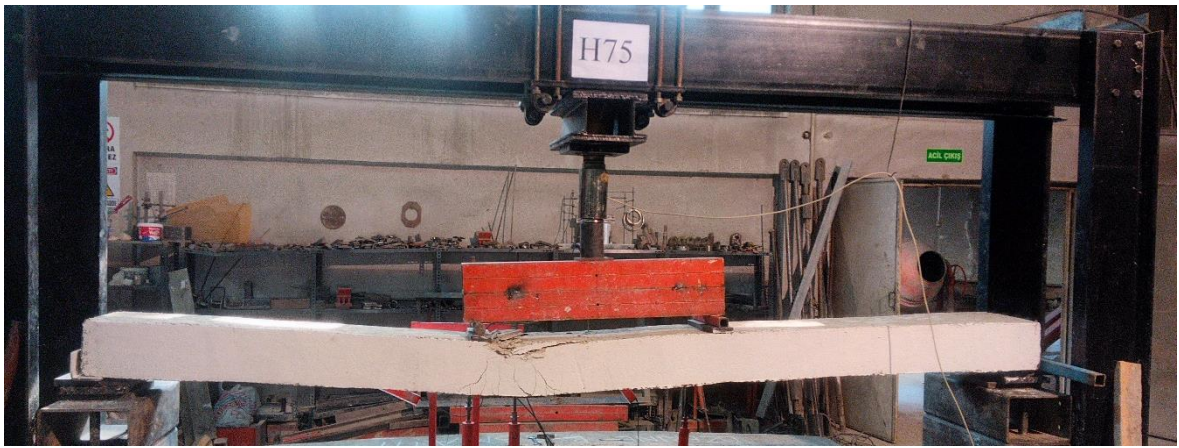
Şekil 3.15. H-75 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.16. H-75 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.16. H-75 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.17. H-75 deney elemanı deney sonu genel görünümü

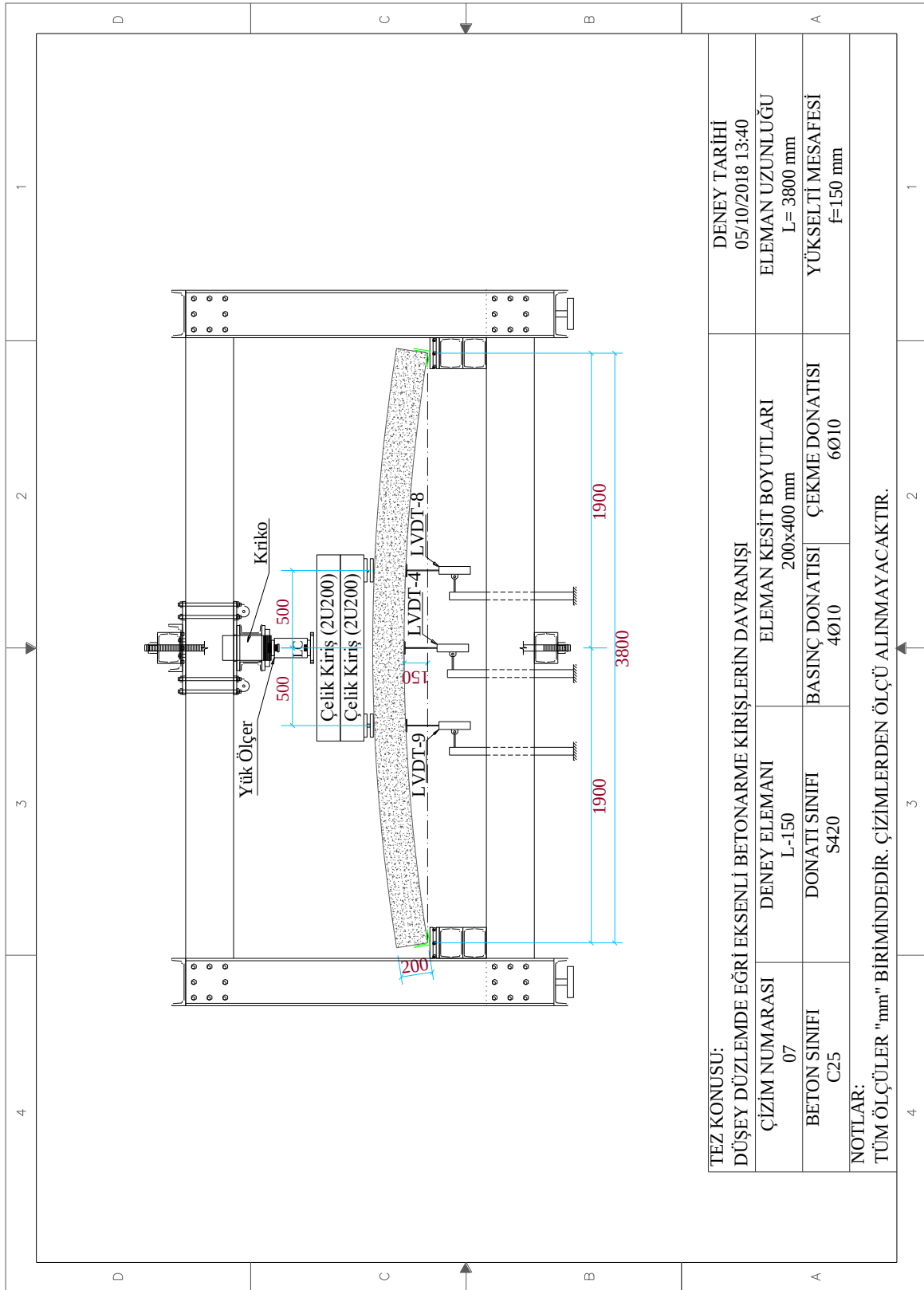


Resim 3.18. H-75 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

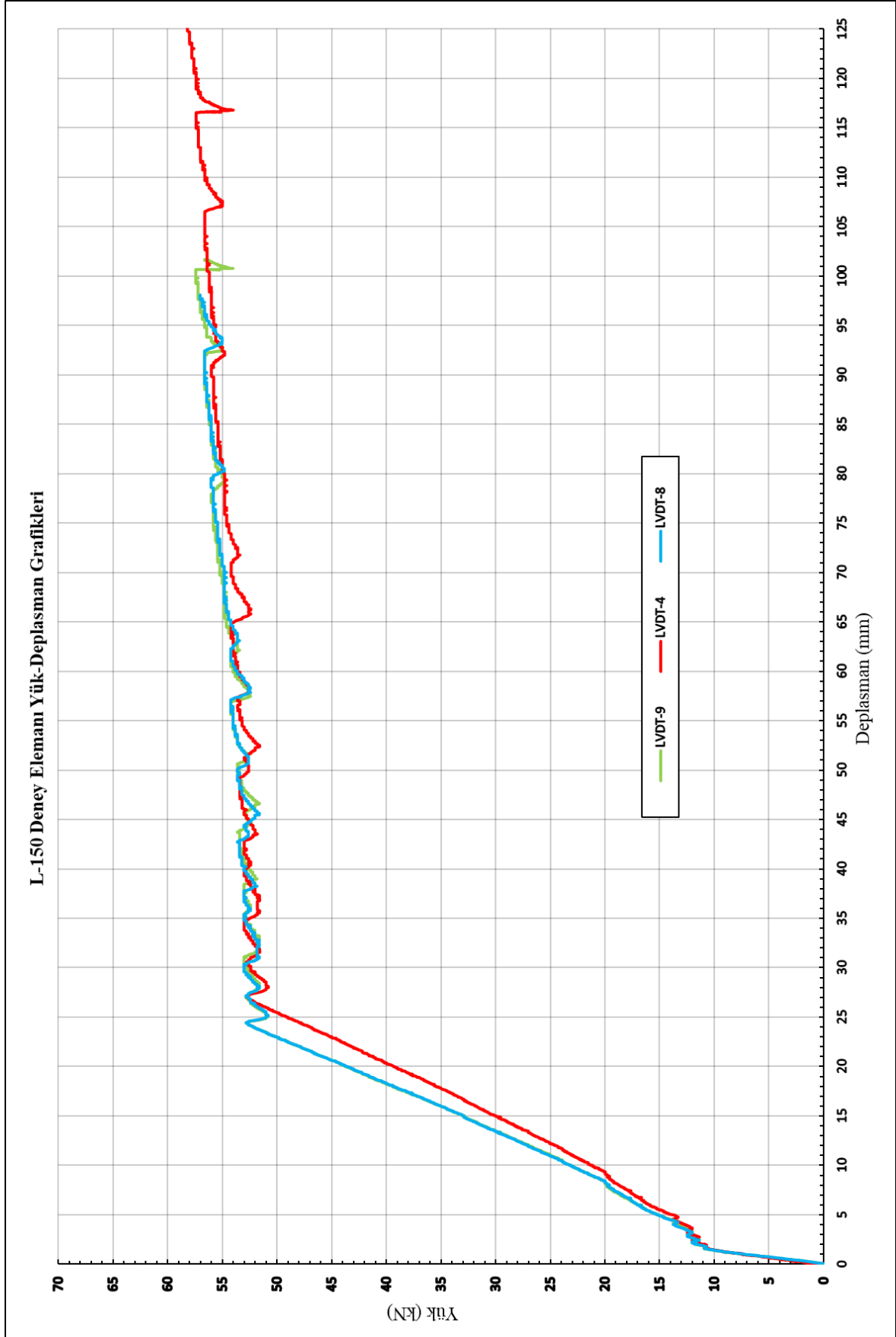
3.8. L-150 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=150$ mm olan, donatı yoğunluğu az eğri eksenli kiriş numunesi L-150 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekil 3.18’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 25,7 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 12,6 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 36 kN açıklık ortası deplasman değeri 18,3 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 52,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 27 mm seviyesinde iken, çekme donatılarının akma sınırına ulaştığı gözlemlendi. Bu anda maksimum çatlak genişliği 0,8 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 54,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 70 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde düzenli aralıklarla eğilme çatlaklarının oluştuğu ve maksimum çatlak genişliğinin yaklaşık 1 mm seviyesinde olduğu gözlemlendi.
- Yük 56 kN açıklık ortası deplasman değeri 90 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 1,8 mm, karakteristik çatlak genişliği 1,2 mm olarak gözlemlendi ve bu seviyede sabit moment bölgesinin düzleştiği görüldü.
- Yük 58,8 kN açıklık ortası deplasman 138 mm seviyelerinde iken, kiriş açıklık ortasına yakın bölgede beton üst yüzünde ezilme belirtisi görüldü.
- Açıklık ortası deplasman değeri 175 mm seviyesine gelene kadar deney sürdürüldü. Deney sonunda sabit moment bölgesinde yaklaşık 10 cm aralıklarla konumlanmış eğilme tipi çatlaklar ve sağ ve sol yük uygulama mesnetlerinin kesme kolunda kalan kısımlarında, ikişer adet eğilme tipi çatlaklar tespit edilmiştir. Yine açıklık ortası ve sol yük uygulama noktası arasında kalan kiriş üst yüzü bölgesinde betonun belirgin bir şekilde ezilmeye uğradığı görüldü.
- Deney sonucunda, az donatılı yükselti mesafesi 150 mm olan kiriş numunesi L-150 için ölçülen akma başlangıç yükü 52,8 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 27 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında L-150 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 58,8 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 135,5 mm olarak ölçülmüştür.



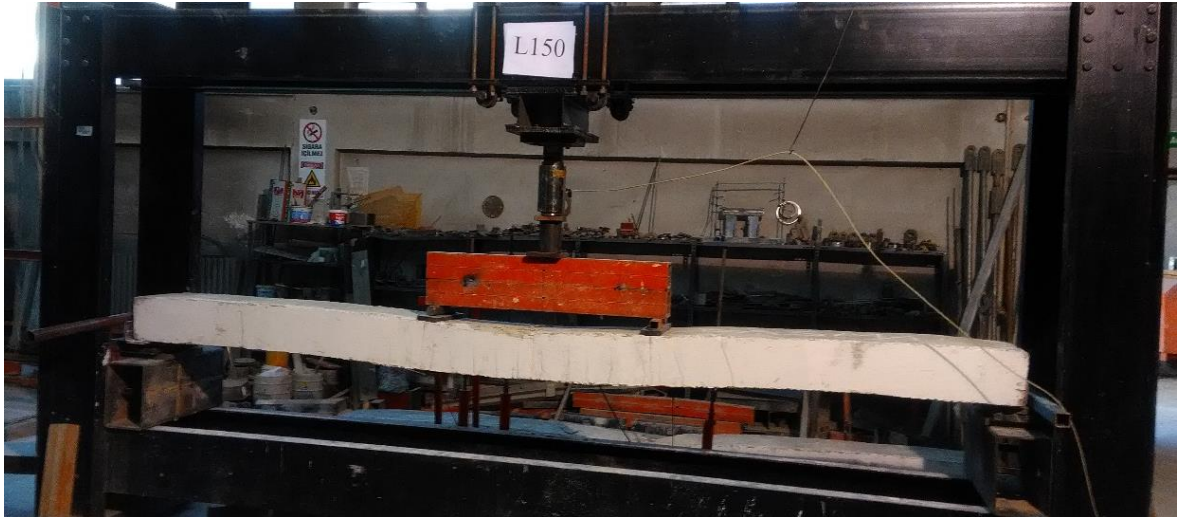
Şekil 3.17. L-150 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.18. L-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.19. L-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.20. L-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü



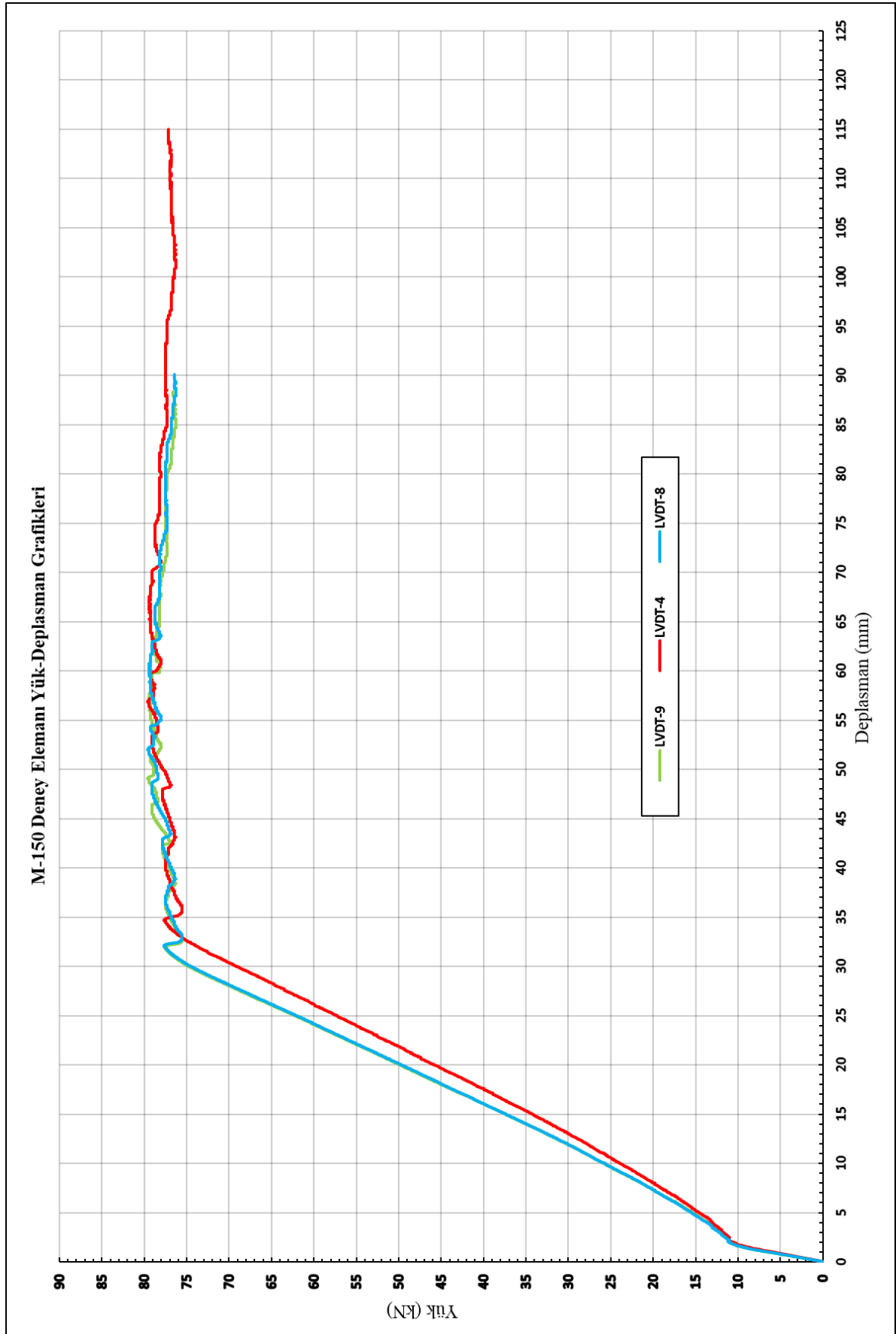
Resim 3.21. L-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.9. M-150 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=150$ mm olan, donatı yoğunluğu orta eğri eksenli kiriş numunesi M-150 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.19’da verilmiştir. Şekil 3.20’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 19,2 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 7,5 mm seviyesinde iken, çok küçük seviyede kılcal çatlaklar oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 23,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 9,7 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak belirlendi.
- Yük 32,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 14,1 mm seviyesinde iken, sağ ve sol kesme kollarında çatlak genişliği 0,2 mm olan çatlaklar gözlemlendi.
- Yük 41,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 18,3 mm seviyesinde iken, açıklık ortası çatlakları 0,2 mm olarak belirlendi.
- Yük 59,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 26 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,25 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 77,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 34,6 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladı ve maksimum çatlak genişliği 0,8 mm seviyesine yükseldi.
- Yük 77,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 48 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 79,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 56 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında maksimum çatlak genişliği 3 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 79,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 65 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinin düzeldiği görüldü.
- Yük 79,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 68 mm seviyesinde iken, açıklık ortası kiriş üst yüzünde ezilme belirtisi gözlemlendi.
- Yük 78,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 78 mm seviyesinde iken, betonda ezilmenin iyice belirginleştiği gözlemlendi.
- Yük 77,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 85 mm seviyesinde iken, betonda ezilme tam anlamıyla ortaya çıktı.
- Yük 76,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 100 mm seviyesinde iken, beton ezilmesinin basınç donatılarına ulaşmadığı görüldü.

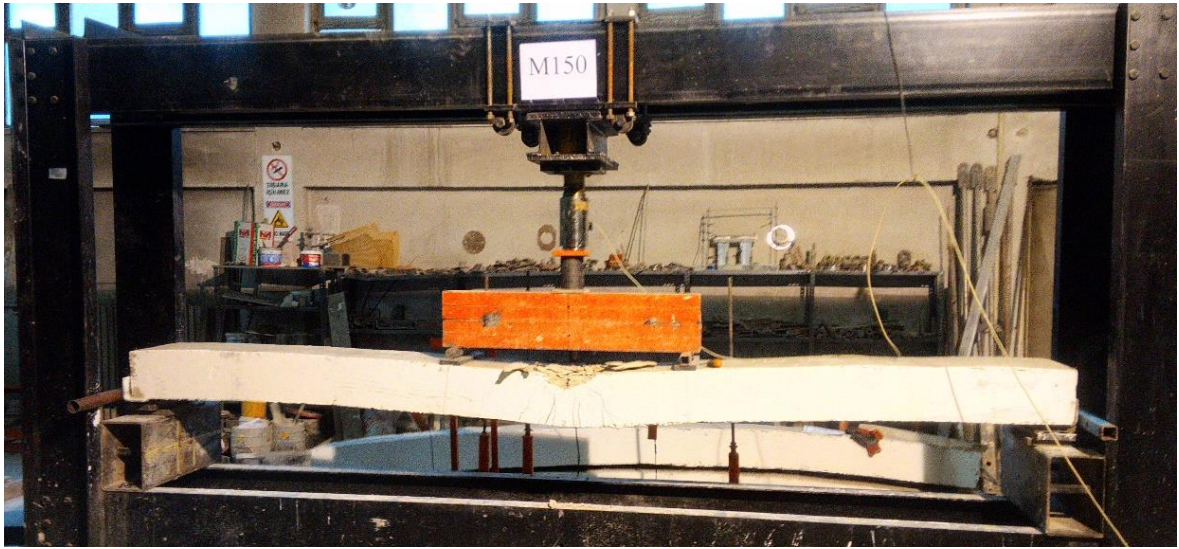
- Yük 74,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 150 mm seviyesinde iken, ezilen beton parçası kaldırıldı fakat ezilmenin boyuna donatıya ulaşmadığı görüldü.
- Yük 75,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 160 mm seviyesinde iken, ezilip kopan beton parçası altında etriyeler görüldü.
- Yük 76 kN açıklık ortası deplasman değeri 168 mm seviyesinde iken, deneye son verildi. Kiriş açıklık ortasında, kesit üst yüzünde, ezilme tam anlamıyla ortaya ıktı.
- Deney sonucunda, orta donatılı yükselti mesafesi 150 mm olan kiriş numunesi M-150 için ölçülen akma başlangıç yükü 77,7 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 34,6 mm olarak gözlendi. Deney esnasında M-150 kirişı için ölçülen maksimum yük değeri 79,6 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 56,8 mm olarak ölçülmüştür.



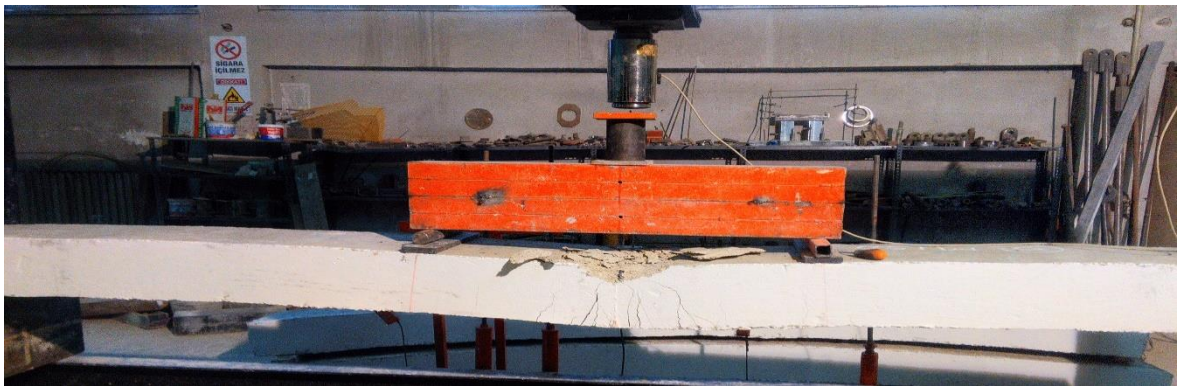
Şekil 3.20. M-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.22. M-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.23. M-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü



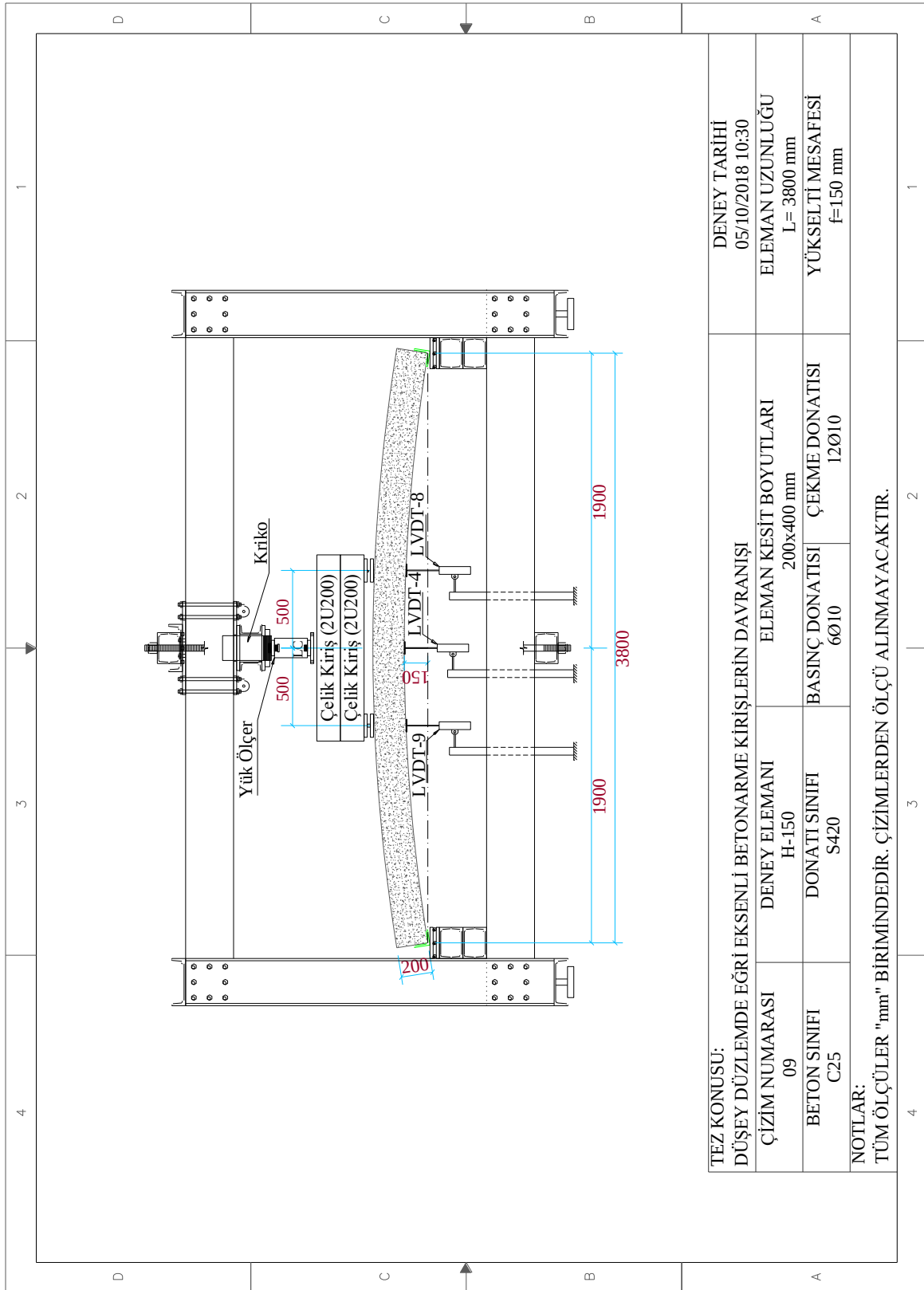
Resim 3.24. M-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.10. H-150 Elemanı Deneyi

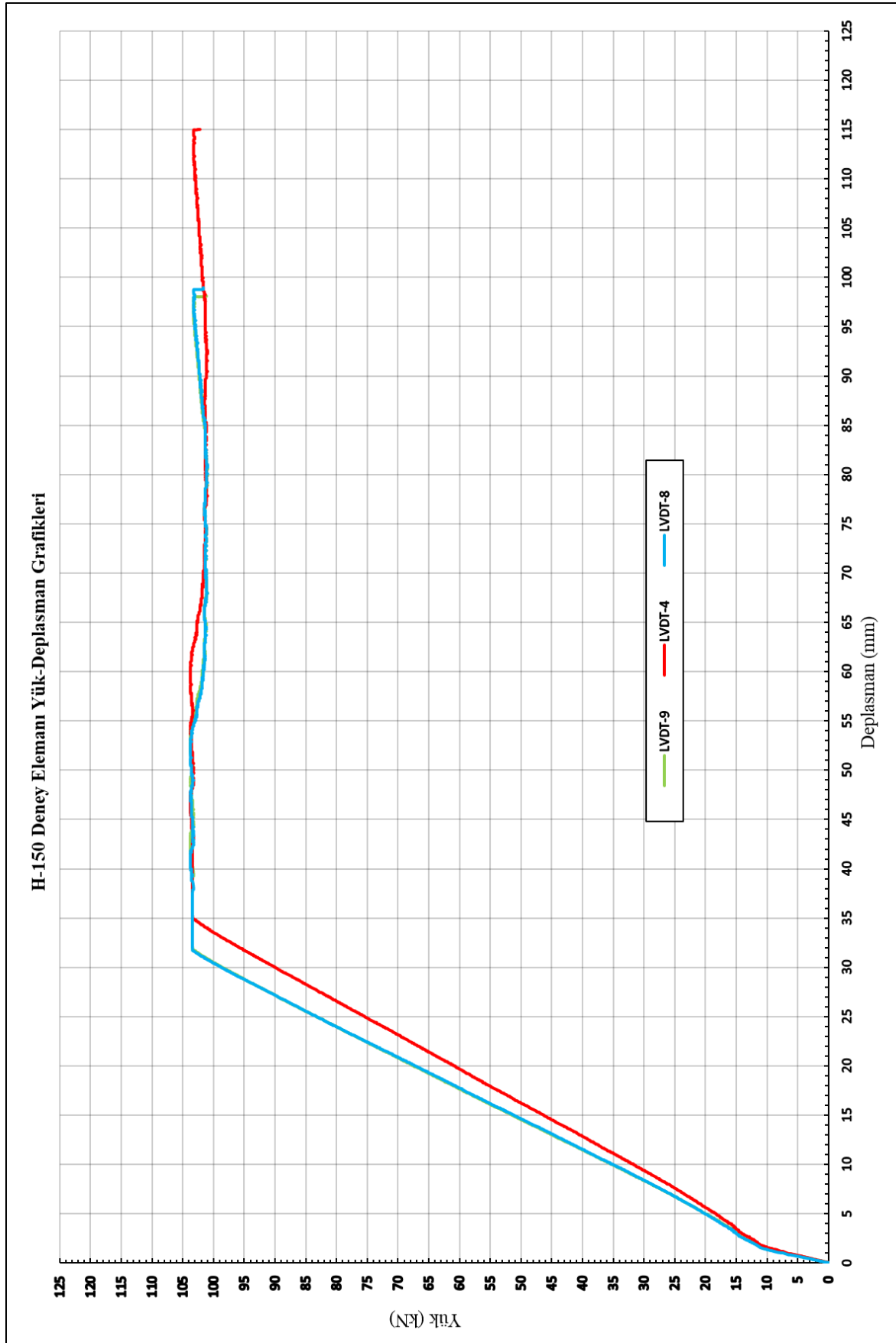
Yükselti mesafesi $f=150$ mm olan, donatı yoğunluğu çok eğri eksenli kiriş numunesi H-150 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.21’de verilmiştir. Şekil 3.22’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 26,7 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 8,2 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında 0,05 mm eğilme çatlakları ayrıca sağ yük mesnedinde 0,1 mm seviyesinde çatlaklar ve sağ ve sol kesme kolunda 0,1 mm’den küçük çatlaklar gözlemlendi.
- Yük 67,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 22,1 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde düzgün yayılı çatlak oluştuğu ve bu çatlakların karakteristik çatlak genişliğinin 0,2 mm olduğu gözlemlendi.
- Yük 94 kN açıklık ortası deplasman değeri 31,3 mm seviyesinde iken, sol kesme kolundaki çatlak genişliğinin 0,15 mm olduğu gözlemlendi. Yine bu yük ve deplasman seviyelerinde sabit moment bölgesindeki maksimum çatlak genişliği 0,3 mm, karakteristik çatlak genişliğinin ise 0,2 mm olduğu gözlemlendi.
- Yük 103,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 34,9 mm seviyesinde iken, çekme donatılarının akma sınırına ulaştığı gözlemlendi. Yine akma başlangıcında çatlak genişliğinin 0,8 mm seviyesine zıpladığı görüldü.
- Yük 103,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 45,4 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,2 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 101,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 71 mm seviyesinde iken, kiriş açıklık ortası kesit üst yüzünde betonda ezilme belirtisi görüldü. Yine bu yük ve deplasman seviyesinde sabit moment bölgesinin düzleştiği gözlemlendi.
- Yük 101,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 91 mm seviyesinde iken, betonda ezilme belirginleşti ve beton dökülmeye başladı.
- Yük 94,25 kN açıklık ortası deplasman değeri 145 mm seviyelerinde iken, sabit moment bölgesinde beton ezilmesinin yaygınlaşarak beton üst yüzünden parça kopartması nedeni ile yükte ani bir düşüş gözlenerek yük seviyesinin 79 kN değerine düştüğü görüldü.
- Deney açıklık ortası deplasman değeri 177 mm seviyesine gelene kadar sürdürüldü. Deney sonunda, betonda ezilme yaşanan bölge kopartılarak basınç donatılarının burkulduğu görüldü.

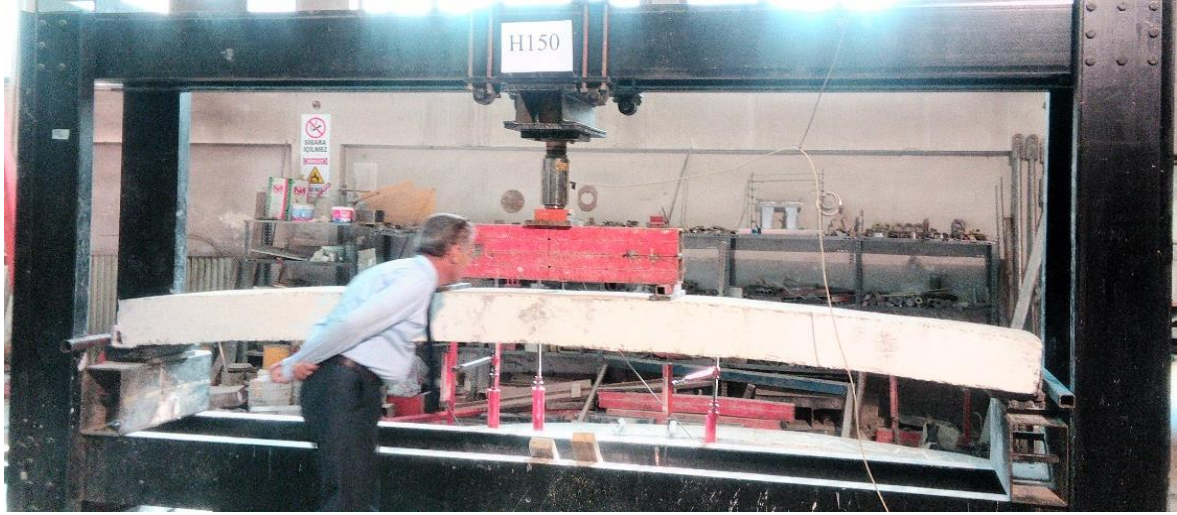
- Deney sonucunda, yoğun donatılı yükselti mesafesi 150 mm olan kiriş numunesi H-150 için ölçülen akma başlangıç yükü 103,5 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 34,9 mm olarak gözlendi. Deney esnasında H-150 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 103,8 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 45,4 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.21. H-150 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.22. H-150 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.25. H-150 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.26. H-150 deney elemanı deney sonu genel görünümü



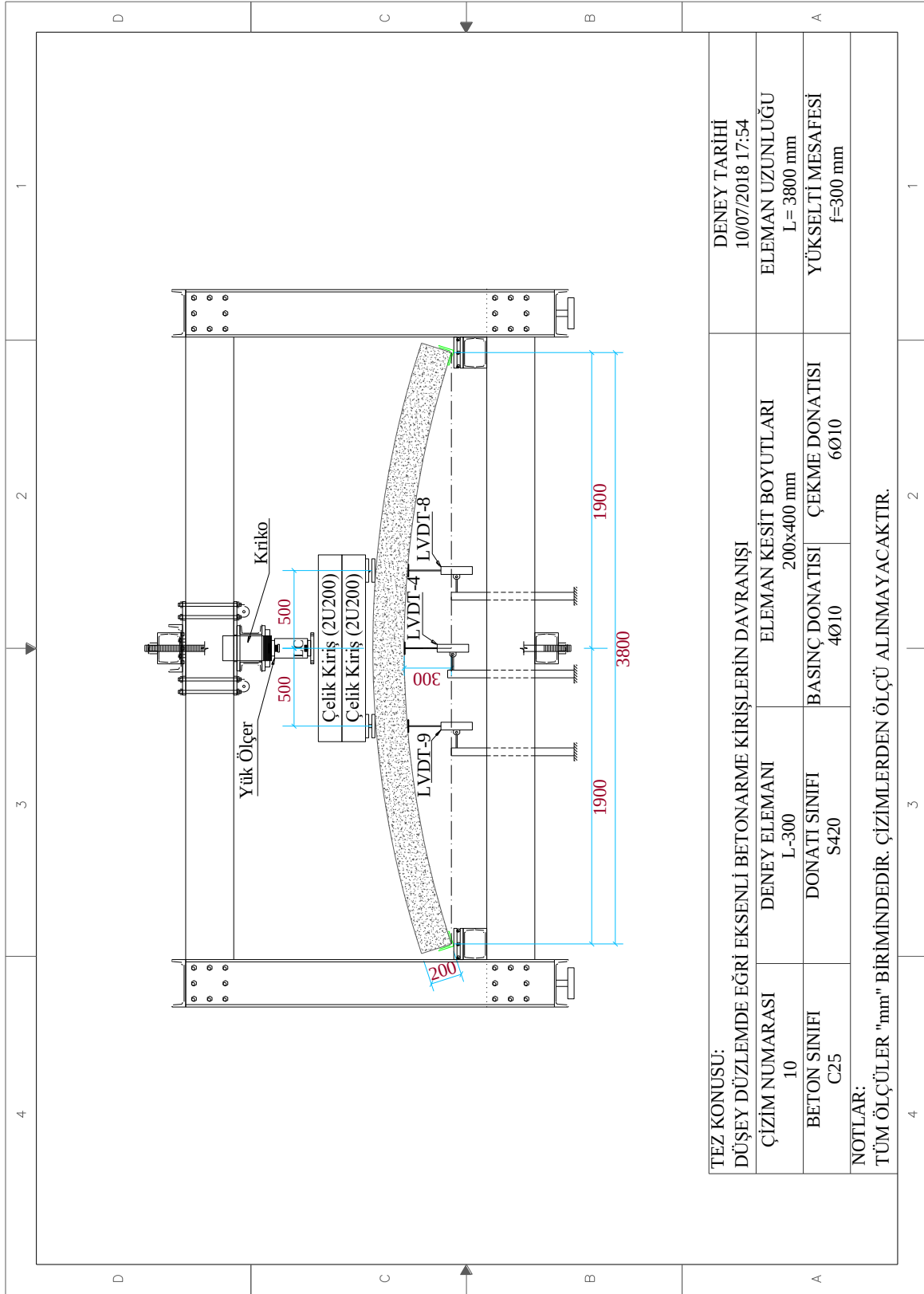
Resim 3.27. H-150 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.11. L-300 Elemanı Deneyi

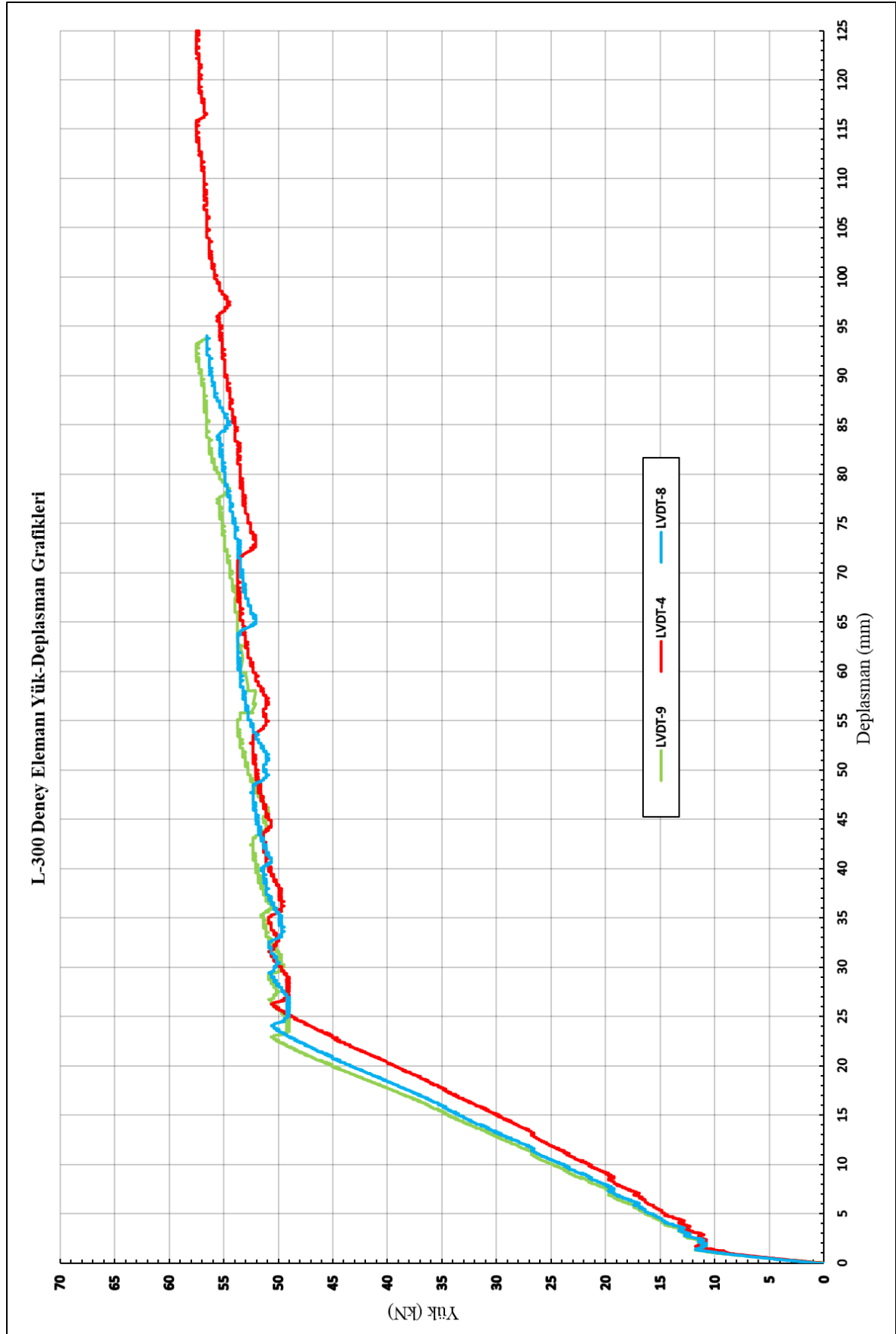
Yükselti mesafesi $f=300$ mm olan, donatı yoğunluğu az eğri eksenli kiriş numunesi L-300 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.23’de verilmiştir. Şekil 3.24’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 23,3 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 10,9 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında sabit moment bölgesinde, altı adet 0,2 mm genişliğinde çatlak oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 35,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 18 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi ve çatlakların eğilme tipinde olduğu görüldü. Aynı yük ve deplasman seviyesinde, kesme kollarında yük uygulama noktalarına yakın bölgede eğilme çatlakları gözlemlendi.
- Yük 50,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 26,2 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladığı görüldü.
- Yük 51,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 47,1 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde altı adet 1 mm genişliğinde çatlak gözlemlendi. Kiriş üzerindeki hasarların %99’unun sabit moment bölgesinde oluştuğu görüldü. Kesme kollarındaki hasarların çok az olduğu görüldü.
- Yük 52,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 61 mm seviyesinde iken, kiriş sabit moment bölgesinde oluşan çatlaklardan dolayı, sabit moment bölgesinin düze yakın bir konuma geldiği görüldü.
- Yük 54,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 91 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliğinin 2 mm olduğu gözlemlendi. Bu seviyede, sağ yük uygulama noktası (LVDT-8) altındaki çatlaklar daha fazla olduğu için, o bölgenin düze daha yakın olduğu görüldü.
- Yük 57 kN açıklık ortası deplasman değeri 111 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinin tam olarak düzleştiği görüldü ve maksimum çatlak genişliği 2,5 mm olarak belirlendi.
- Yük 58,21 kN açıklık ortası deplasman değeri 135 mm seviyelerinde iken, kiriş alt yüzünde çatlakların boydan boya devam ettiği fakat bir kabarma eğilimi olmadığı görüldü.

- Yük 48,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 171 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktası civarında (LVDT-8) maksimum çatlak genişliği 3 mm olarak gözlendi. Kesme kollarındaki hasarlar sıfır düzeyinde olmakla beraber yk mesnetlerine yakın bölgelerde çatlaklar olduğu görüldü.
- Yük 49,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 184 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktasına yakın bir noktada (LVDT-8) kiriş üst yüzünde betonda ezilme belirtisi görüldü. Bu seviyede maksimum çatlak genişliği 4 mm olarak belirlendi.
- Yük 50 kN açıklık ortası deplasman değeri 196 mm seviyesinde iken, betonda ezilme belirtisinin belirginleştiği görüldü. Bu seviyede maksimum çatlak genişliği 4 mm, sabit moment bölgesindeki eğilme tipi çatlakların karakteristik çatlak genişliği 3 mm olarak belirlendi.
- Yük 51,1 mm açıklık ortası deplasman değeri 226 mm seviyesinde iken, kiriş açıklık ortası üst yüzünde ve sol yük uygulama noktası (LVDT-9) civarında betonda ezilme belirtileri görüldü. Açıklık ortasında ve sağ yük uygulama noktasında konumlanan beton ezilmeleri sol yük uygulama noktasındaki ezilmeye göre daha belirgin olduğu görüldü.
- Yük 52 kN açıklık ortası deplasman değeri 251 mm seviyesinde iken, daha önce düzleşen sabit moment bölgesi artık i bükey bir görünüme kavuştu ve kirişin genel biçiminin “m” harfini andıran bir görüntüye kavuştuğu görüldü.
- Yük 52,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 271 mm seviyelerinde iken, beton üst yüzünde beliren ezilmeler sabit moment bölgesinin neredeyse tamamında kabuk atması şeklinde ortaya çıktığı için yükün aniden 47 kN seviyelerine düştüğü görüldü.
- Yük 50,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 312 mm seviyesinde deneye son verildi.
- Deney sonunda kiriş üst yüzündeki basınç donatılarının burkulduğu ve etriyelere dayandığı görüldü. Etriyeler 4 kollu olduğu için görevlerini yerine getirmiş olduğu gözlendi. Alt yüzde çekme donatıları az olduğu için kiriş alt yüzünde aderans çözülmeleri görülmedi. Bu kiriş numunesinde donatı az olduğu için çatlak genişliklerinin daha fazla olduğu ve dolayısı ile deformasyonun daha fazla olduğu görüldü. Bu nedenle deney numunesinin pekleşme deformasyonuna erken ulaştığı görüldü.
- Deney sonucunda, az donatılı yükselti mesafesi 300 mm olan kiriş numunesi L-300 için ölçülen akma başlangıç yükü 50,6 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 26,2 mm olarak gözlendi. Deney esnasında L-300 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 58,9 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 140,7 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.23. L-300 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.24. L-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.28. L-300 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.29. L-300 deney elemanı deney sonu genel görünümü



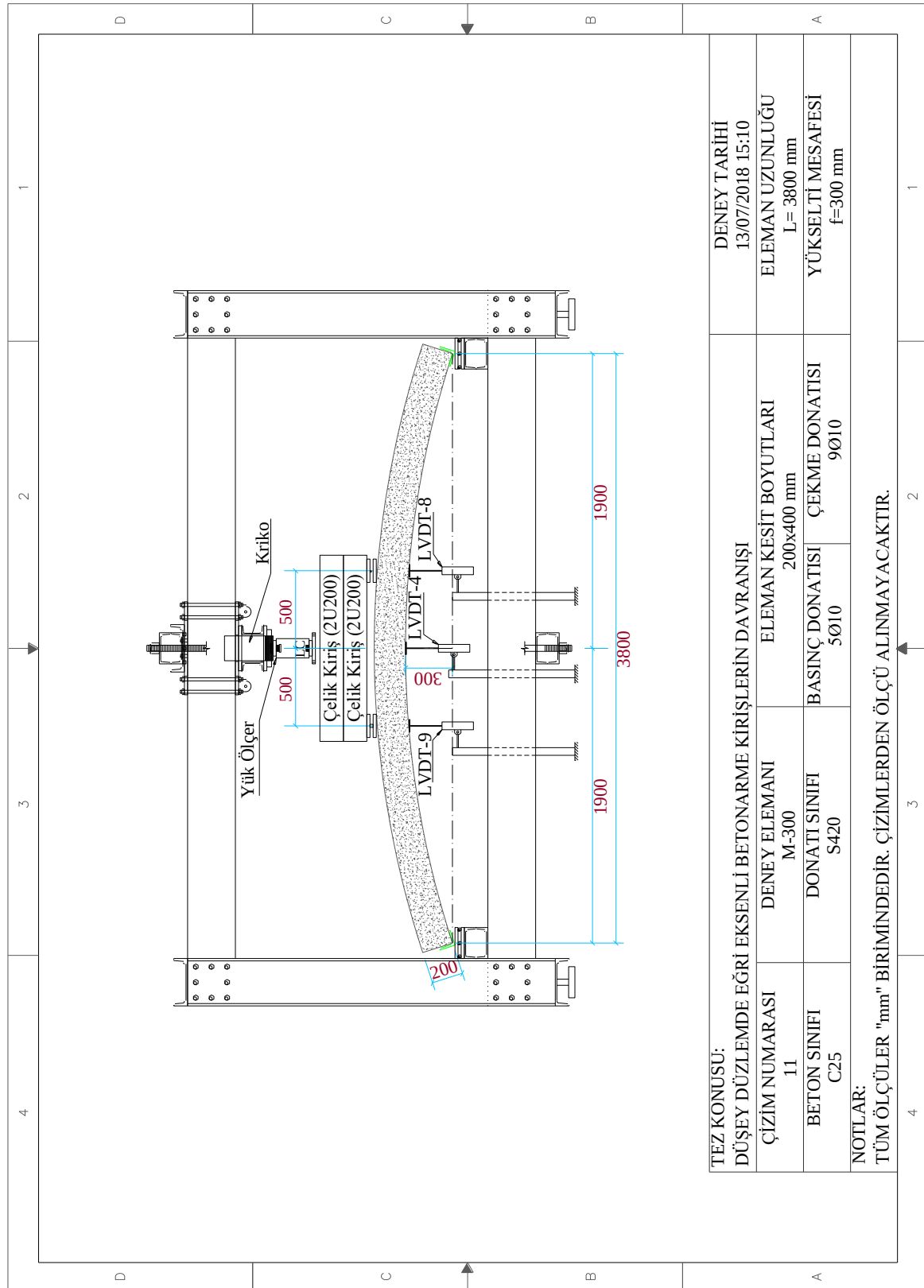
Resim 3.30. L-300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.12. M-300 Elemanı Deneyi

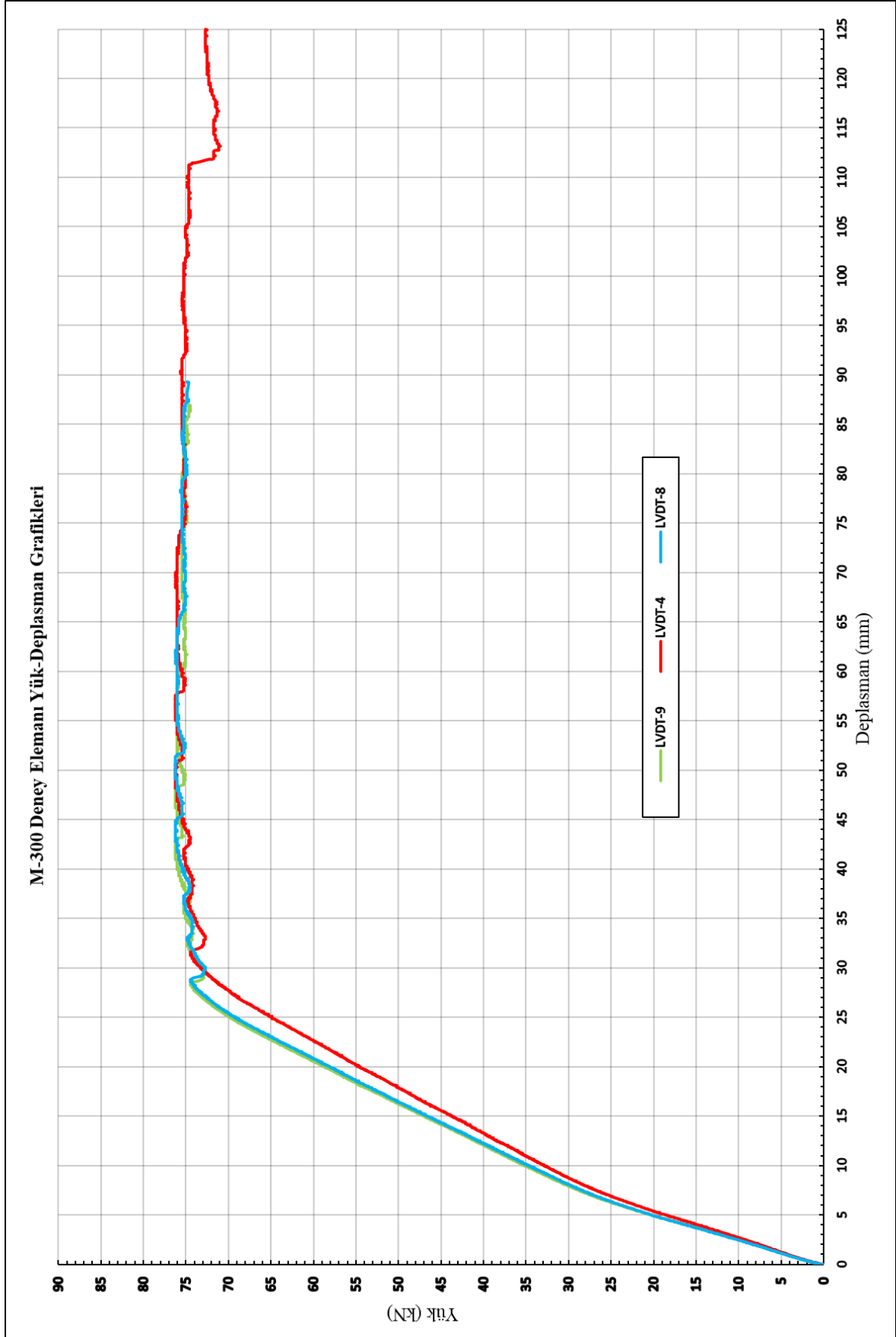
Yükselti mesafesi $f=300$ mm olan, donatı yoğunluğu orta eğri eksenli kiriş numunesi M-300 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.25’de verilmiştir. Şekil 3.26’da ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 30,6 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 9 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliğinin 0,2 mm sabit moment bölgesinde çok sayıda eğilme çatlağı olduğu görüldü.
- Yük 40,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 13,5 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 50,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 18,2 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,35 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 66 kN açıklık ortası deplasman değeri 25,57 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,4 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 74,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 31,3 mm seviyesinde iken, çekme donatılarının akmaya başladığı ve çatlak genişliğinin 0,8 mm seviyesine çıktığı gözlemlendi. Bu yük ve deplasman seviyelerinde açıklık ortasında bir adet 1,1 mm genişliğinde çatlak, hemen sağında 1 mm genişliğinde bir çatlak ve onun da sağında 0,7 mm genişliğinde bir çatlak olduğu gözlemlendi. Açıklık ortasının sol tarafında da çatlaklar olduğu ama en büyük çatlak genişliğinin 0,35 mm seviyelerinde olduğu gözlemlendi.
- Yük 76 kN açıklık ortası deplasman değeri 54 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,2 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 76 kN açıklık ortası deplasman değeri 64,2 mm seviyelerinde iken, maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlemlendi. Kesme kollarında her zaman olduğu gibi önemsiz düzeyde kılcal eğilme çatlakları mevcut.
- Yük 75,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 74 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında kiriş üst yüzünde kenara yakın bir bölgede ezilme başladığı ve içeri doğru devam ettiği görüldü. Betonda ezilmenin açıklık ortasındaki en büyük çatlağın hemen üzerinde boydan boya olduğu görüldü.
- Yük 75,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 99 mm seviyelerinde iken, kiriş alt yüzünde herhangi bir kabarma olmadığı görüldü.

- Yük 74,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 109 mm seviyesinde iken, daha önce düzleştiği görülen sabit moment bölgesinin artık aşağı doğru eğilmeye başladığı, ayrıca beton üst yüzünde görülen ezilmenin sabit moment bölgesinde yaklaşık 40 cm'lik bir bölgede tamamen paspayı atması şeklinde belirdiği görüldü.
- Yük 73 kN açıklık ortası deplasman değeri 144 mm seviyesinde iken, kiriş açıklık ortasındaki ezilen bölge temizlendi, ezilmenin boyuna donatılara kadar ulaştığı ama basınç donatılarında herhangi bir burkulmanın olmadığı görüldü. Bu noktadan sonraki deplasmanlarda ezilme sabit moment bölgesinde çok yaygınlaştı. Ezilme ve kirişin eğriliği sağ yük uygulama noktasına (LVDT-8) doğru kaydı. Basınç donatıları burkuldu ve ezilme açıklık ortası deplasman lerin olduğu bölgede kabuk atması şeklinde olduğu için LVDT-4'n kaydettiği değerlerde olağandışı değişimler görüldü. Ezilmeler ve donatı burkulması sebebi ile ykde düşüşler olduğu görüldü.
- Deney sonucunda, orta donatılı yükselti mesafesi 300 mm olan kiriş numunesi M-300 için ölçülen akma başlangıç yükü 74,5 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 31,3 mm olarak gözlendi. Deney esnasında M-300 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri, 78 kN olarak ölçülmüş ve bu esnada açıklık ortası deplasman değeri 159,4 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.25. M-300 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.26. M-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.31. M-300 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.32. M-300 deney elemanı deney sonu genel görünümü



Resim 3.33. M – 300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

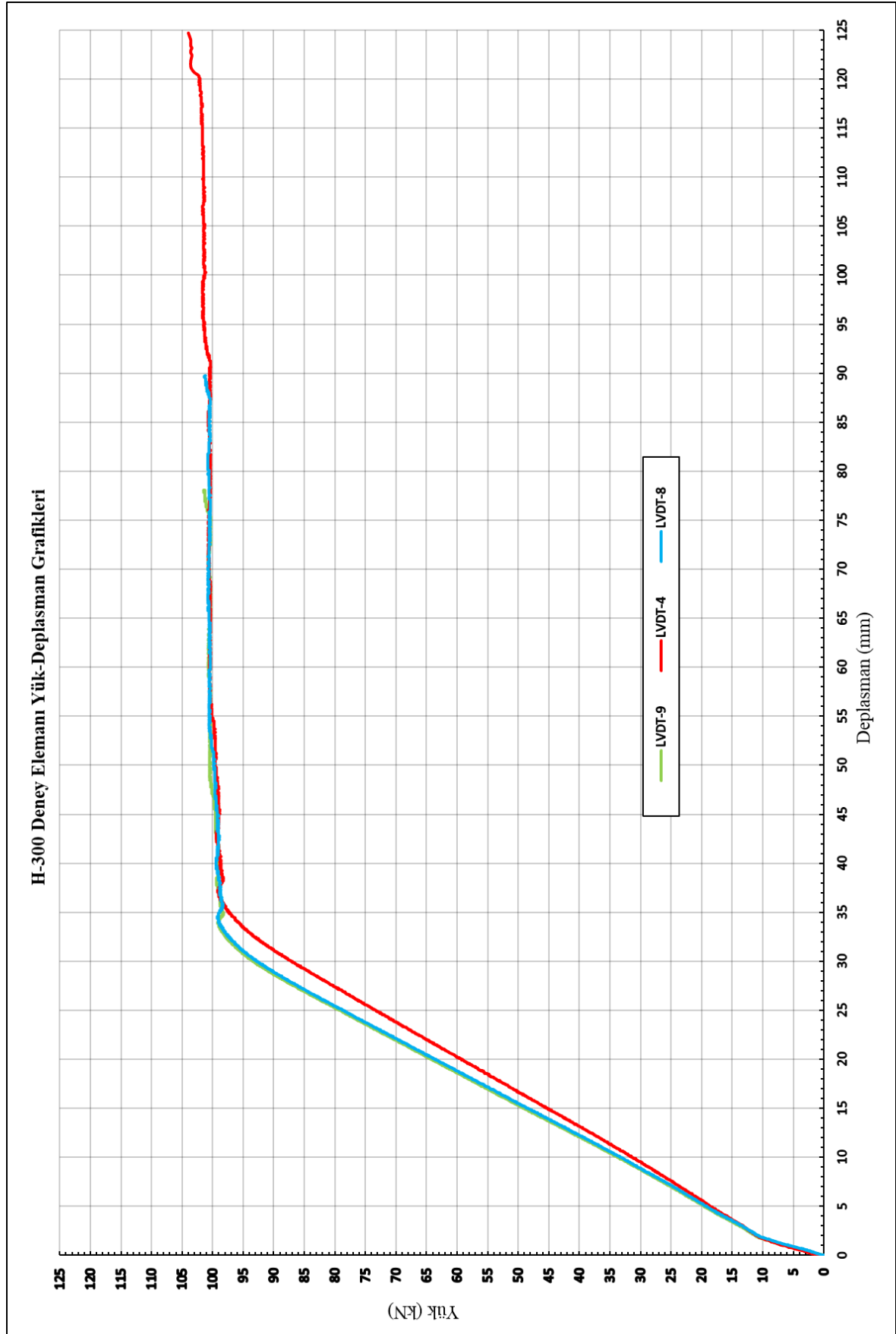
3.13. H-300 Elemanı Deneyi

Yükselti mesafesi $f=300$ mm olan, donatı yoğunluğu çok eğri eksenli kiriş numunesi H-300 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.27’de verilmiştir. Şekil 3.28’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 23,6 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 7 mm seviyelerine gelene kadar kirişte herhangi bir çatlak gözlenmedi.
- Yük 28,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 9 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktasının (LVDT-8) hemen dışında ve içinde 0,1 mm’den çok küçük eğilme çatlakları gözlemlendi.
- Yük 37,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 12,4 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında yaklaşık 0,05 mm değerinde eğilme çatlakları gözlemlendi ve bu çatlakların sabit moment bölgesinde düzgün aralıklarla konumlandığı görüldü.
- Yük 57,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 19,3 mm seviyesinde iken, tam açıklık ortasında maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak gözlemlendi. Yine bu aşamada kesme kollarında da 0,1 mm’den küçük eğilme çatlakları gözlemlendi.
- Yük 78,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 27 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 98,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 36,3 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladığı gözlemlendi. Bu aşamada maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi ve hasarların eğilme çatlakları görünümünde olduğu gözlemlendi. Eğilme elemanlarına göre belirgin bir fark gözlenmedi. Kesme kollarında maksimum çatlak genişliği 0,2 mm genişliğinde eğilme çatlakları olarak gözlemlendi.
- Yük 100,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 60 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği ve karakteristik çatlak genişliği, sabit moment bölgesinde, 0,7 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 100,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 70 mm seviyesinde iken, iki yük uygulama noktası arasında kalan sabit moment bölgesinde kirişin eğriliğinin kaybolduğu yani neredeyse düzleştiği görüldü.
- Yük 101,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 97 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktası (LVDT-8) altında beton ezilmesi görüldü. Bu aşamada ezilme görülen noktanın

altında bir bombeleşme olduğu görüldü. Yük 102,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 130 mm seviyesinde iken, sağ yük uygulama noktası altındaki beton ezilmesi iyice belirginleşti ve plastik mafsallık bu nokta etrafında oluştuğu için kiriş bu noktada daha belirgin deformasyonlar yapmaya başladı.

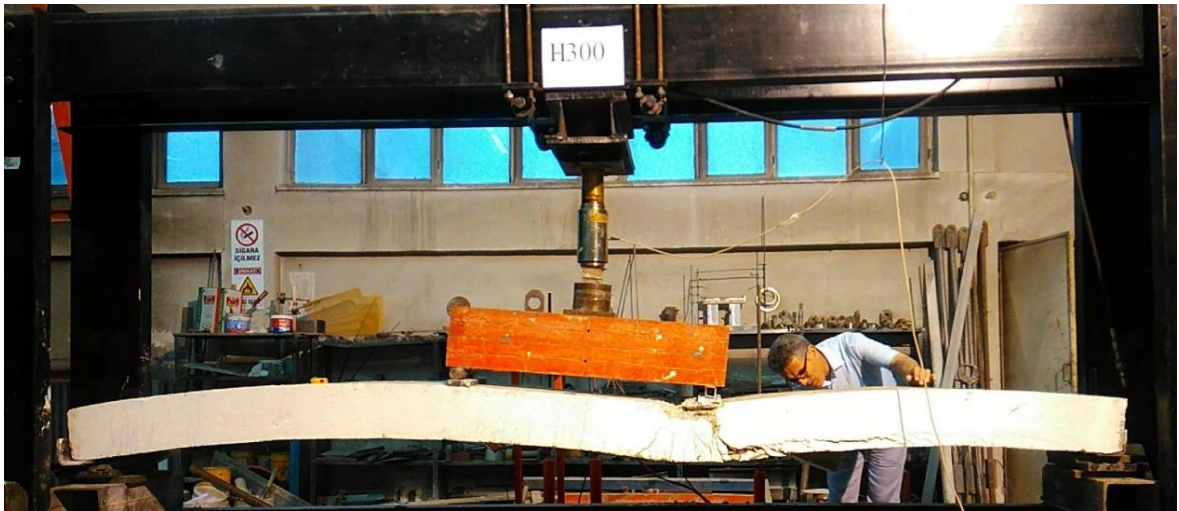
- Yük 102,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 138 mm seviyesinde iken, ezilen beton bölgesi temizlendi ve boyuna donatılarda bir burkulma belirtisi görülmedi. Açıklık ortası deplasman değeri yaklaşık 175 mm seviyesinde iken betonda ezilme boyuna donatılara ulaştı.
- Yük 99 kN açıklık ortası deplasman değeri 200 mm seviyesinde iken, sağ kesme kolu alt yüzünde büyük bir aderans çatlağı oluştuğu gözlemlendi. Deney sonunda sağ yük uygulama noktası altında oluşan beton ezilmesi, çok büyük bir bölgeye yayıldı. Plastik mafsallığın burada oluşması nedeni ile kiriş bu nokta altında büyük deplasmanlar yaptı. Yine bu nokta altından başlayarak, sağ kesme kolu alt yüzüne dağılan büyük bir aderans çözülmesi görüldü.
- Deney sonunda, basınç donatılarının tamamının burkulduğu görüldü. Aderans çözümlerinin momentin maksimum olduğu bölgede değil, sağ yük uygulama noktası altında eğrilik olduğu için aderans çözülmesi orada görüldü ve büyük deplasmanlar altında büyük aderans problemlerinin ortaya çıktığı görüldü.
- Deney sonucunda, yoğun donatılı yükselti mesafesi 300 mm olan kiriş numunesi H-300 için ölçülen akma başlangıç yükü 98,8 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 36,3 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında H-300 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 104 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 124,7 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.28. H-300 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.34. H-300 deney elemanı deney öncesi genel durumu



Resim 3.35. H-300 deney elemanı deney sonu genel durumu



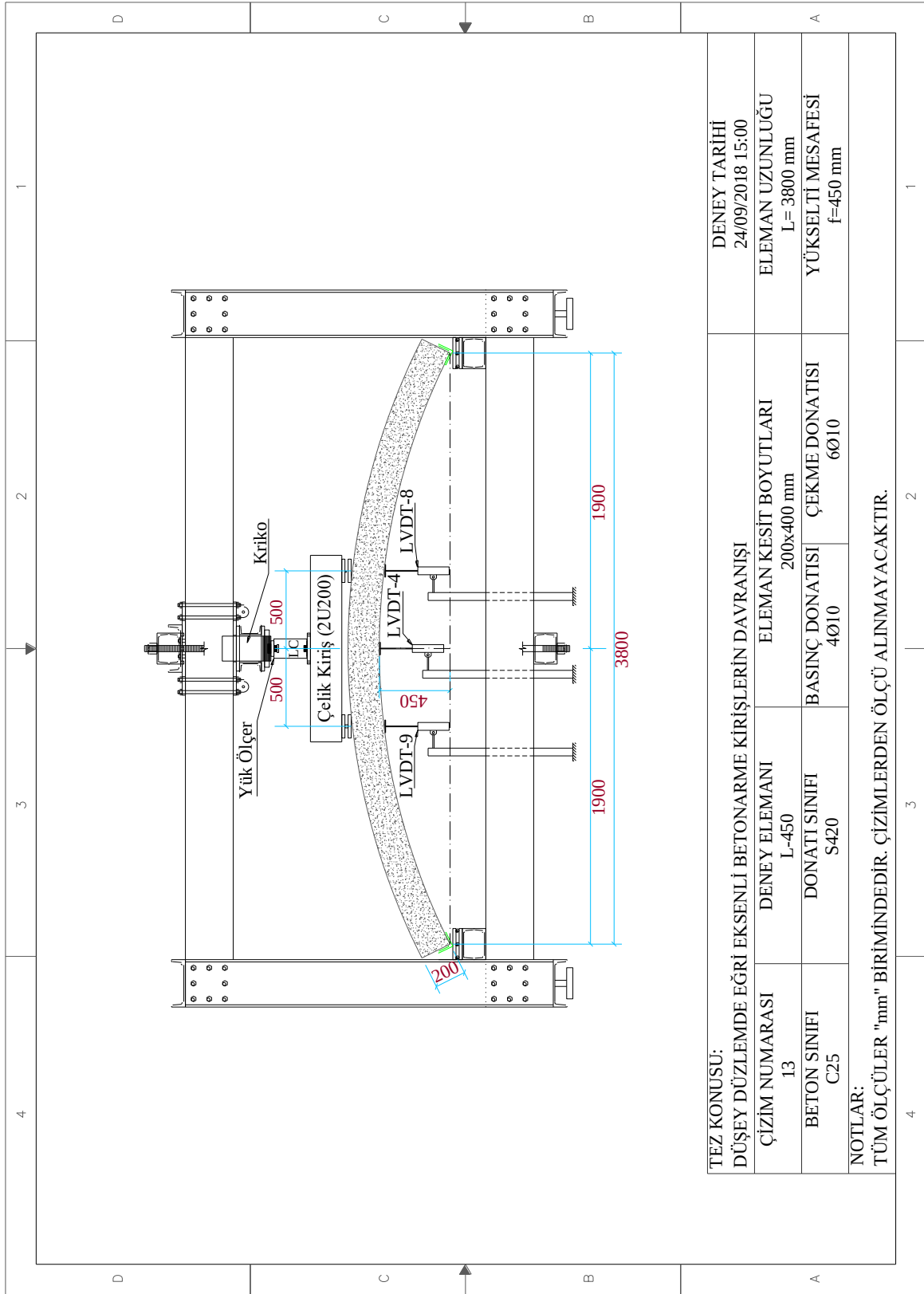
Resim 3.36. H-300 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.14. L-450 Elemanı Deneyi

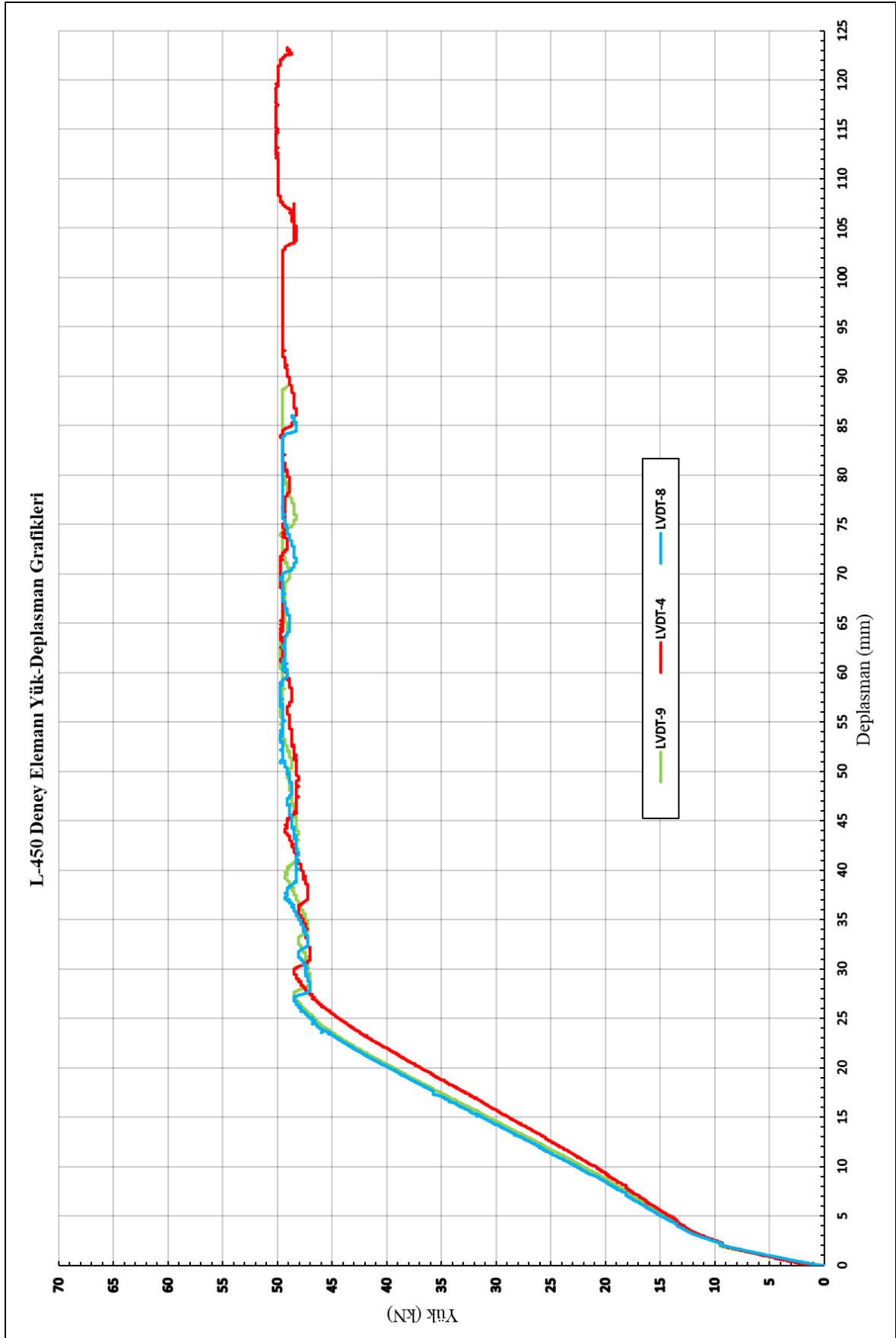
Yükselti mesafesi $f=450$ mm olan, donatı yoğunluğu az eğri eksenli kiriş numunesi L-450 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.29’da verilmiştir. Şekil 3.30’da ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 18,1 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 8 mm seviyesinde iken, 0,05 mm’den küçük kılcal çatlaklar olduğu görüldü.
- Yük 26,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 13,5 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi ve kesme kollarında kılcal çatlaklar oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 32 kN açıklık ortası deplasman değeri 17 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 0,2 mm ve karakteristik çatlak genişliği 0,1 mm olarak gözlemlendi. Bu aşamada tüm çatlakların sabit moment bölgesinde oluştuğu ve eğilme tipinde olan bu çatlakların sabit moment bölgesinde düzgün aralıklar ile konumlandığı görüldü.
- Yük 48,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 29,5 mm seviyesinde iken, çekme donatılarının akmaya başladığı görüldü ve bu aşamada maksimum çatlak genişliği 1 mm olarak gözlemlendi.
- Yük 48,27 kN açıklık ortası deplasman değeri 49 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 2 mm olarak gözlemlendi. Yine bu seviyede, kesme kollarının temiz denebilecek seviyede hasarsız olduğu sadece kılcal çatlaklar oluştuğu görüldü.
- Yük 49,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 60 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinin düzeldiği görüldü.
- Yük 49,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 80 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 3 mm ve karakteristik çatlak genişliği 2,5 mm olarak gözlemlendi. Bu seviyede çatlakların yaklaşık 10 cm ara ile sabit moment bölgesinde konumlandığı görüldü.
- Yük 49,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 100 mm seviyesinde iken, kiriş açıklık ortası üst yüzünde betonda ezilme başladığı görüldü.
- Yük 49 kN açıklık ortası deplasman değeri 123 mm seviyesinde iken, deney düzeneği beslenmek için destek yapılırken kiriş deney düzeneğinden fırladığı için deney sonlandırıldı.

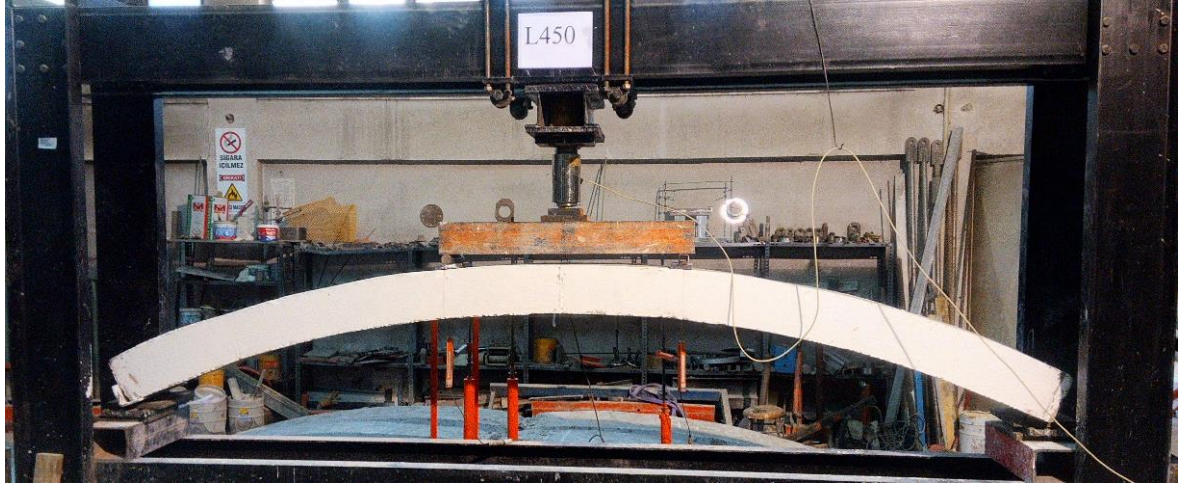
- İleri deplasmanlara ve yüklemelere maruz kalmış deney elemanı tekrar düzeneğe yerleştirilerek yüklendi. Bu ikinci yükleme altında 50 mm açıklık ortası deplasman seviyesinde ilk deneyde başlayan beton ezilmesi iyice belirginleşti. Açıklık ortası deplasman değeri 109 mm seviyesine gelene kadar numune tekrar yüklendi.
- Deney sonucunda, az yoğunlukta donatılı yükselti mesafesi 450 mm olan kiriş numunesi L – 450 için ölçülen akma başlangıç yükü 48,5 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 29,5 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında L-450 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 50,1 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 112 mm olarak ölçülmüştür.



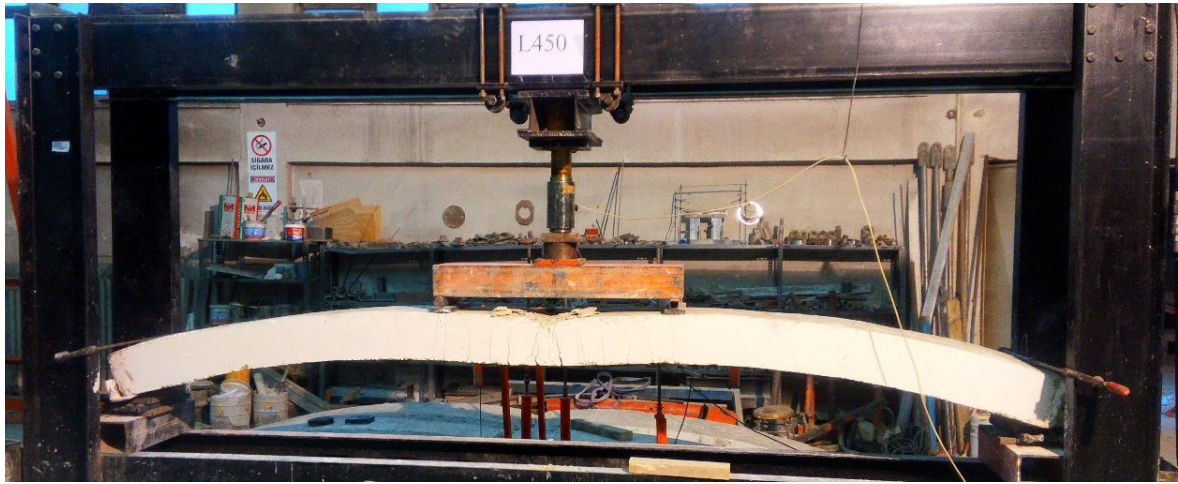
Şekil 3.29. L-450 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.30. L-450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.37. L-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.38. L-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü



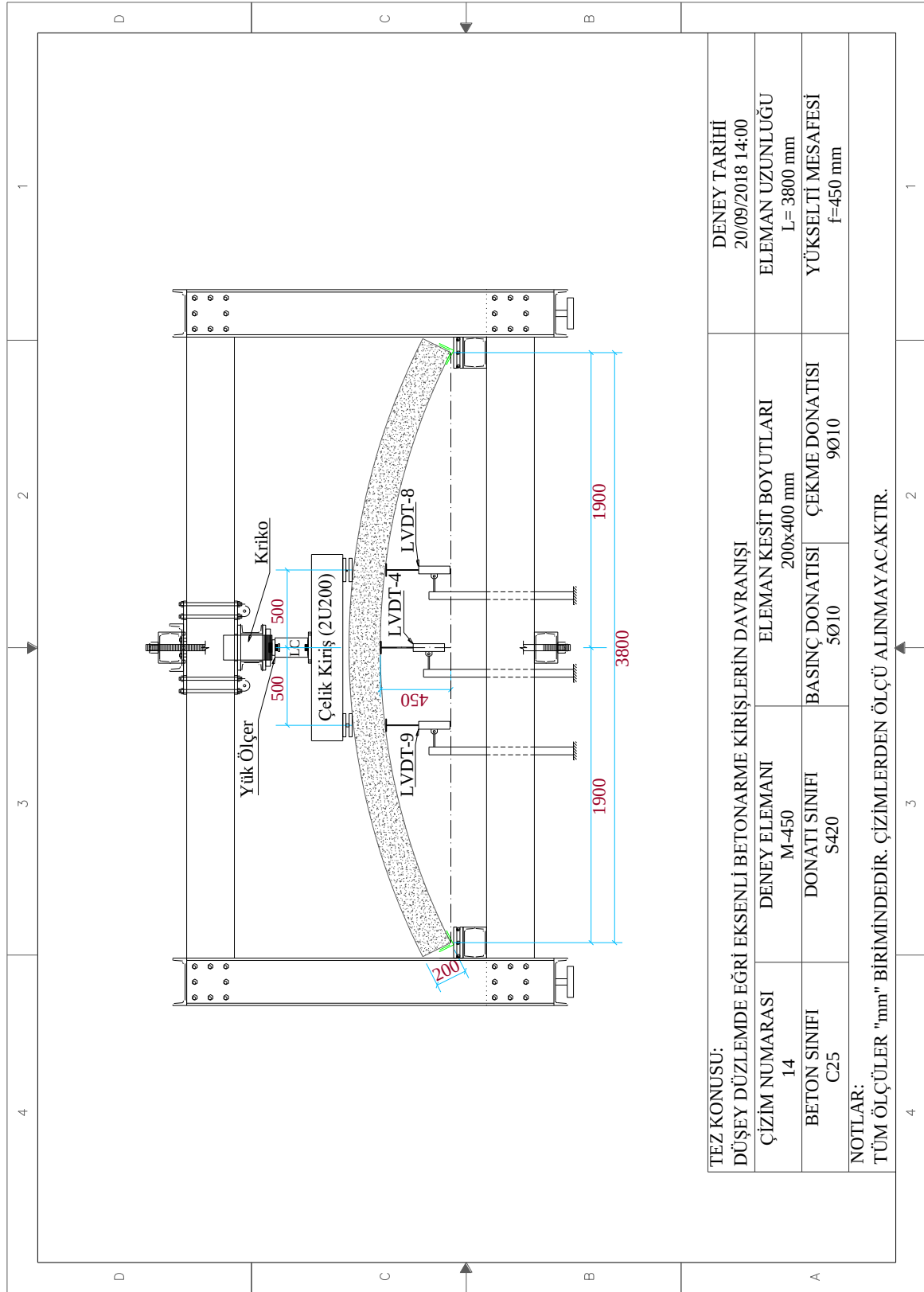
Resim 3.39. L-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.15. M-450 Elemanı Deneyi

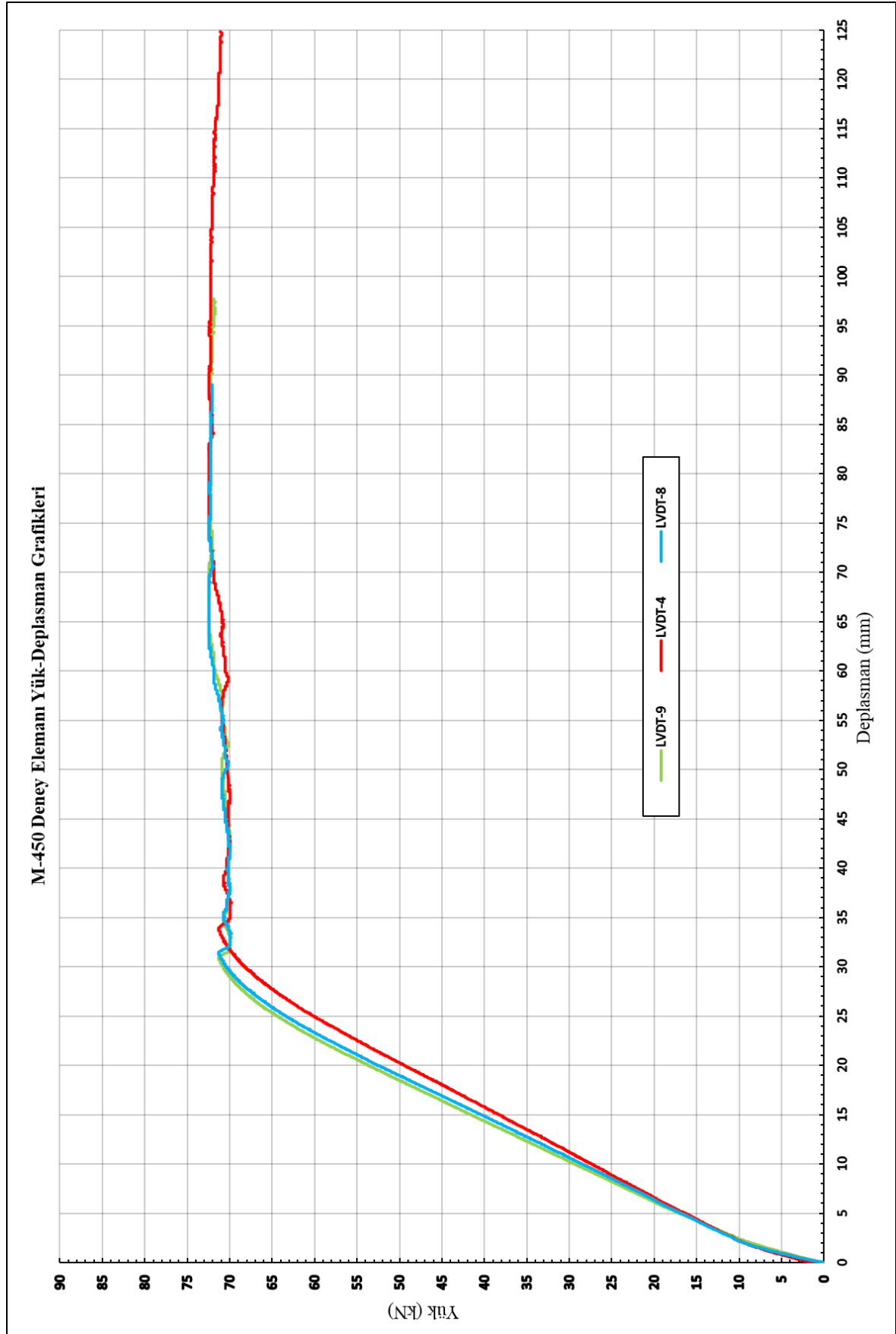
Yükselti mesafesi $f=450$ mm olan, donatı yoğunluğu orta eğri eksenli kiriş numunesi M-450 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.31’de verilmiştir. Şekil 3.32’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 16,5 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 5 mm seviyesinde iken, kiriş numunesinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir.
- Yük 22,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 7,6 mm seviyesinde iken, 0,05 mm boyutlarında ilk kılcal çatlak oluşumu sabit moment bölgesinde gözlemlendi.
- Yük 29 kN açıklık ortası deplasman değeri 10,7 mm seviyesinde iken, benzer kılcal çatlakların sabit moment bölgesinde birden fazla oluştuğu görüldü.
- Yük 36,1 kN açıklık ortası deplasman değeri 13,9 mm seviyesinde iken, sol kesme kolunun hasarsız olduğu sağ kesme kolunda ise 0,1 mm boyutlarında eğilme çatlağı oluştuğu gözlemlendi.
- Yük 41 kN açıklık ortası deplasman değeri 16,2 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,1 mm olarak belirlendi.
- Yük 57,7 kN açıklık ortası deplasman değeri 23,78 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,2 mm olarak belirlendi.
- Yük 65,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 27,95 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi.
- Yük 70,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 32 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak belirlendi ve sağ kesme kolunda düzenli aralıklarla oluşan 0,2 mm boyutlarında eğilme çatlakları belirlendi. Aynı eğilme çatlaklarından sol kesme kolunda da olduğu gözlemlendi fakat sağ kesme kolunda oluşan çatlaklar kadar fazla olmadığı görüldü.
- Yük 71,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 33,6 mm seviyesinde iken, kiriş çekme donatılarında akma başladığı belirlendi ve bu seviyede tam açıklık ortasında 0,8 mm boyutlarında eğilme çatlağı gözlemlendi.
- Yük 70,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 56 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde karakteristik çatlak genişliği 1 mm ve açıklık ortasında maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak belirlendi.

- Yük 70,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 65 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesindeki eğriliğin düze yakın bir konuma geldiği görüldü.
- Yük 71,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 70 mm seviyesinde iken, karakteristik çatlak genişliği 1,5 mm ve maksimum çatlak genişliği 2 mm olarak gözlemlendi. Bu aşamada oluşan çatlakların yüksek donatılı kiriş numunesine göre daha fazla olduğu gözlemlendi. Büyük genişlikli çatlakların tamamının sabit moment bölgesinde olduğu görüldü. Kesme kollarındaki çatlakların sabit kaldığı ve sağ kesme kolunda maksimum çatlak genişliğinin 0,2 mm olduğu ve daha fazla ilerlemediği, sol kesme kolunda ise maksimum çatlak genişliğinin 0,1 mm olduğu görüldü.
- Yük 72,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 90 mm seviyesinde iken, kiriş açıklık ortası beton üst yüzünde ezilme belirtisi ortaya çıktı.
- Yük 71,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 110 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesi eğriliği tam olarak düzleşti.
- Yük 71,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 120 mm seviyesinde iken, betonda ezilmenin iyice belirginleştiği görüldü.
- Yük 63,5 kN açıklık ortası deplasman değeri 155 mm seviyesinde iken, beton üst yüzündeki ezilme yaklaşık 50 cm'lik bir bölgeye kiriş boyunca yayıldı. Ezilmeden ötürü yük düşüşü gözlemlendi.
- Yük 66,3 kN açıklık ortası deplasman değeri 218,5 mm seviyesinde ezilen beton parçaları temizlendi ve ezilmenin etriyelere kadar ulaştığı görüldü. Açıklık ortası deplasman değeri 245 mm seviyesinde iken tüm basınç donatılarının burkulduğu görüldü ve deneye son verildi.
- Deney sonucunda, orta yoğunlukta donatıya sahip yükselti mesafesi 450 mm olan kiriş numunesi M-450 için ölçülen akma başlangıç yükü 71,3 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 33,6 mm olarak gözlemlendi. Deney esnasında M-450 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 72,5 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 73,3 mm olarak ölçülmüştür.



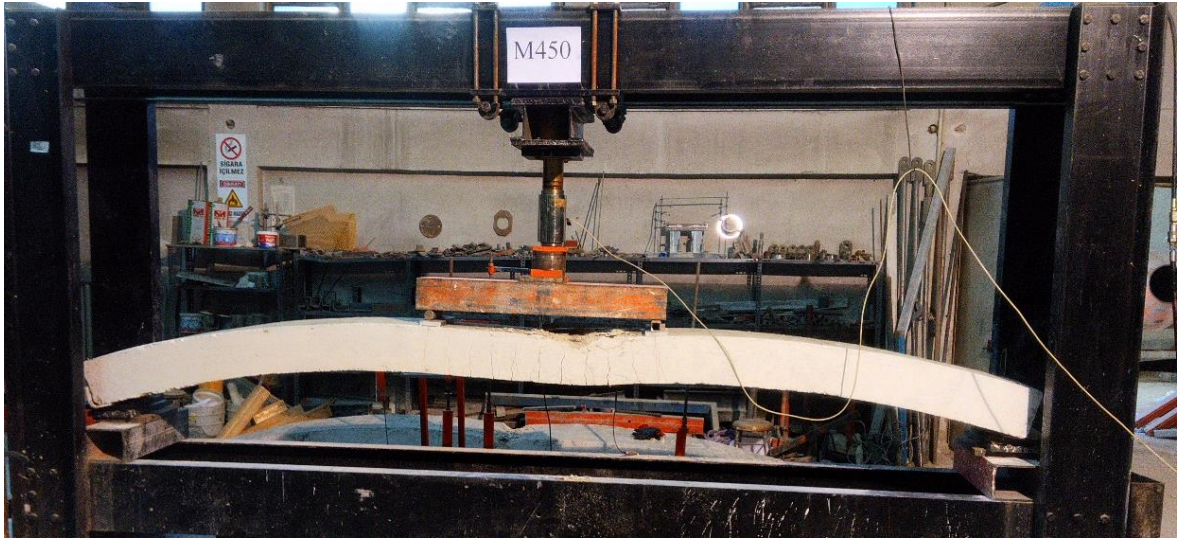
Şekil 3.31. M-450 deney elemanı deney düzeneği ve eleman özellikleri



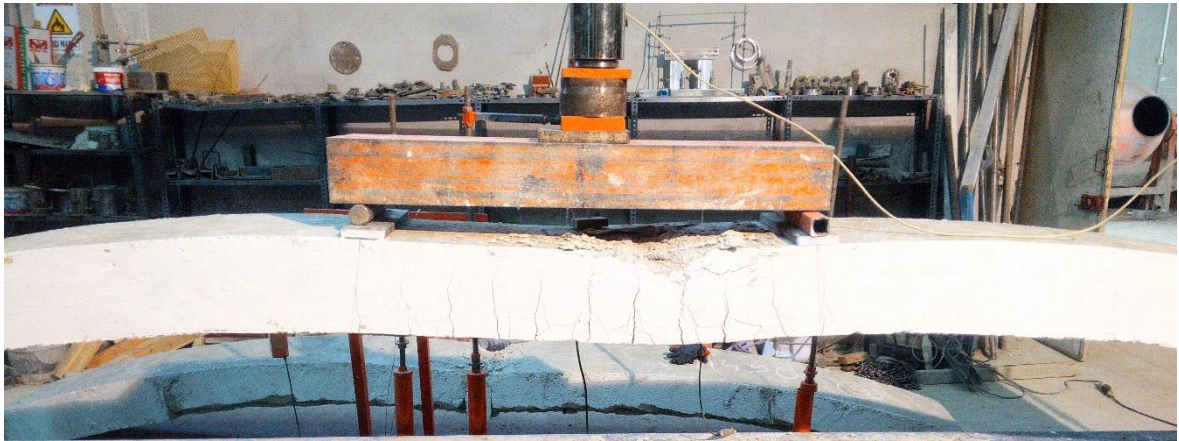
Şekil 3.32. M – 450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.40. M-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.41. M-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü



Resim 3.42. M-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

3.16. H-450 Elemanı Deneyi

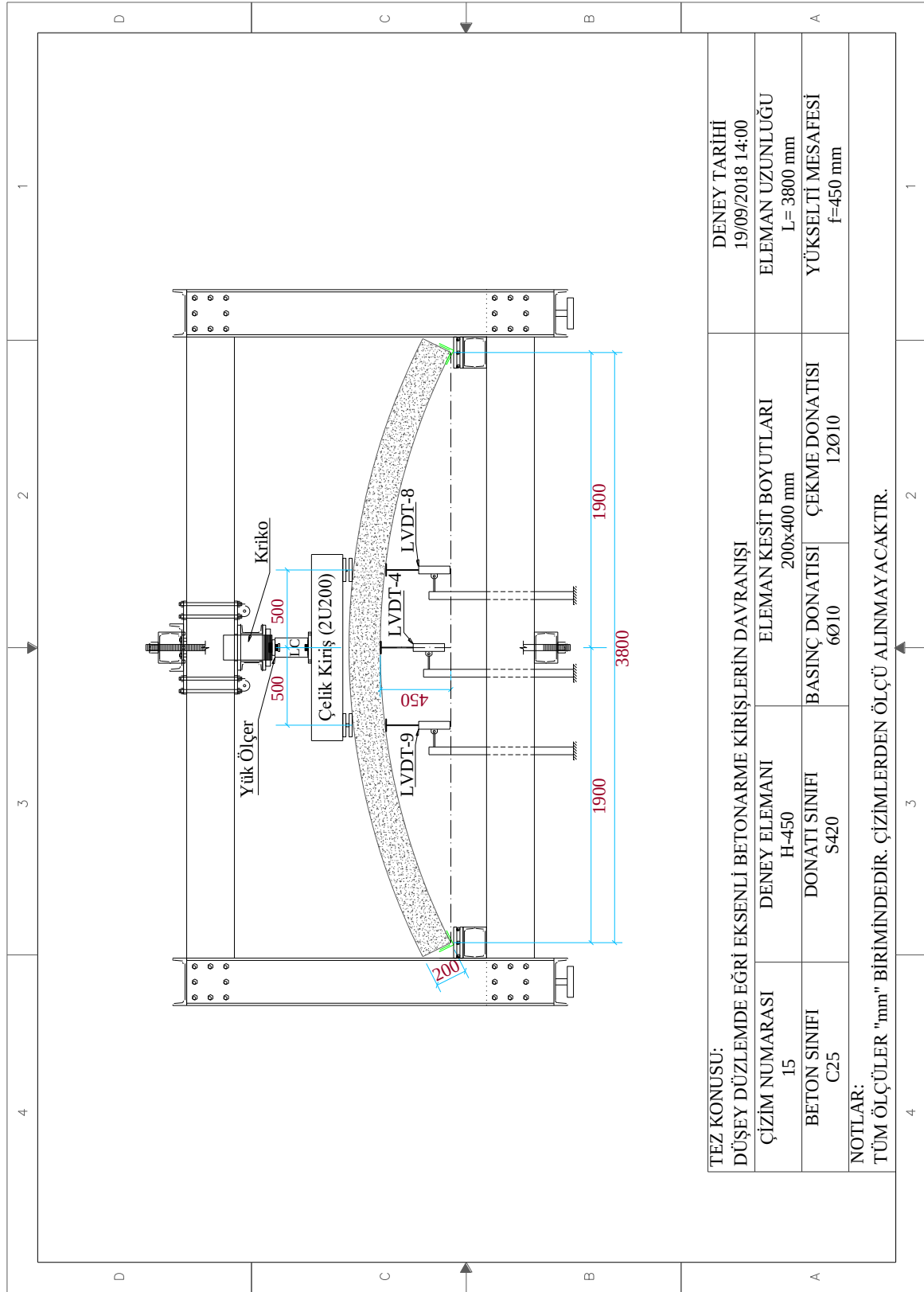
Yükselti mesafesi $f=450$ mm olan, donatı yoğunluğu çok eğri eksenli kiriş numunesi H-450 için, deney süresince belirli yük ve deplasman altında ortaya çıkan durumlar aşağıda anlatılmıştır. Deney elemanının özellikleri ve deney düzeneği Şekil 3.33’de verilmiştir. Şekil 3.34’de ise deney sonuçlarına ait grafikler gösterilmiştir.

- Yük 22,3 kN açıklık ortası deplasman değeri (LVDT-4) 7 mm seviyesinde iken, kirişte herhangi bir hasar gözlenmedi.
- Yük 34,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 11,9 mm seviyesinde iken, kirişte 0,1 mm’den küçük boyutlarda ilk eğilme çatlakları gözlemlendi.
- Yük 47,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 16,8 mm seviyesinde iken, boyutları yaklaşık 0,05 mm olan kesme kollarında daha önce olduğu düşünülen eğilme çatlakları gözlemlendi ve bu seviyede açıklık ortası eğilme çatlaklarının boyutu 0,1 mm olarak belirlendi.
- Yük 61,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 22,2 mm seviyesinde iken, genellikle sabit moment bölgesinde yaklaşık 10 cm ara ile oluşan eğilme çatlaklarının olduğu ve maksimum çatlak genişliğinin 0,1 mm olduğu görüldü.
- Yük 66 kN açıklık ortası deplasman değeri 24 mm seviyesinde iken, kiriş alt yüzünde çatlak genişliği 0,2 mm olarak belirlendi.
- Yük 70,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 25,9 mm iken, iki yük uygulama noktası arasında kalan bölgenin düze yakın bir konuma geldiği görüldü.
- Yük 76,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 28 mm seviyesinde iken, sabit moment bölgesinde maksimum çatlak genişliği 0,3 mm ve karakteristik çatlak genişliği 0,2 mm olarak gözlemlendi. Yine bu aşamada kesme kollarının temiz sayılabilecek ölçüde hasarsız olduğu görüldü.
- Yük 85,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 32,2 mm seviyesinde iken, iki yük uygulama noktası arasında kalan bölge düz bir konuma gelmiş durumda olduğu gözlemlendi. Bu tip eğri eksenli kirişlerde, tipik olarak yükleme ile birlikte iki yük noktası arasında kalan bölgenin düzeldiği gözlemlendi.
- Yük 90,8 kN açıklık ortası deplasman değeri 35 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği ve karakteristik çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlemlendi. Çatlakların büyük bir kısmının, iki yük noktası arasında kalan bölgede, eğilme tipinde ve 10 cm aralıklarla

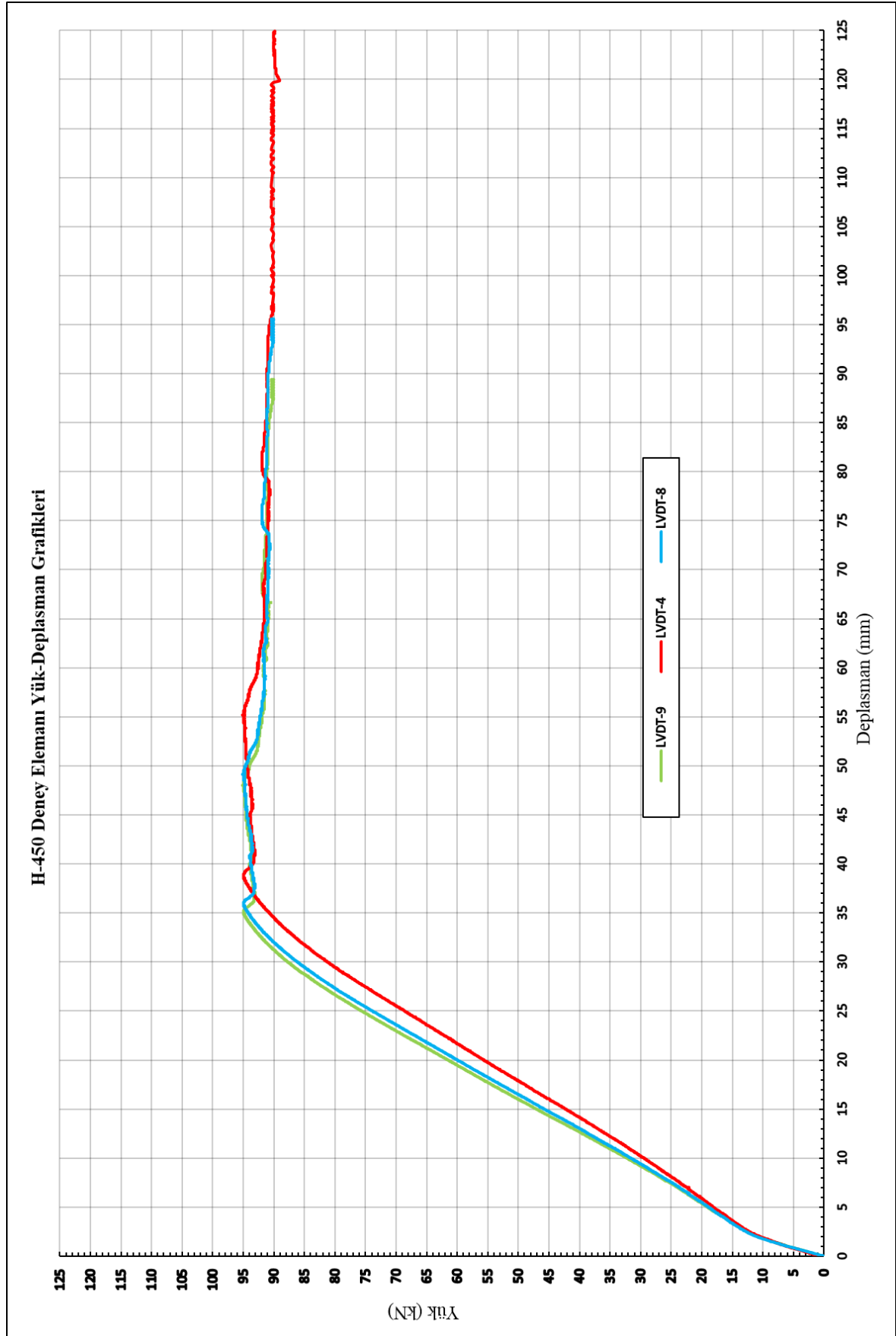
oluştugu gözlemlendi. Yine bu seviyede kesme kollarının temiz sayılabilecek düzeyde hasarsız olduğu gözlemlendi.

- Yük 95 kN açıklık ortası deplasman değeri 38,5 mm seviyesinde iken, çekme donatılarında akma başladığı görüldü. Maksimum çatlak genişliğinin 0,9 mm olduğu görüldü.
- Yük 94,6 kN açıklık ortası deplasman değeri 52 mm seviyesinde iken, iki yük noktası arasında kalan bölgenin tam olarak düz konuma geldiği ve kesme kollarında yer alan çatlakların aynı şekilde kaldığı görüldü. Yine aynı seviyede maksimum çatlak genişliği 1,4 mm olarak belirlendi. Bu seviyede üç adet büyük sayılabilecek eğilme çatlağı belirlendi. Bunlardan ilki tam açıklık ortasında ve diğer ikisinin bu çatlağın 10 cm sağında ve solunda konumlandığı gözlemlendi.
- Yük 91,94 kN açıklık ortası deplasman değeri 63 mm seviyesinde iken, açıklık ortasında beton üst yüzünde ezilme başladığı görüldü.
- Yük 91,4 kN açıklık ortası deplasman değeri 70 mm seviyesinde iken, maksimum çatlak genişliği 3 mm olarak belirlendi. Bu durumda üç adet büyük sayılabilecek eğilme çatlaklarından ortada konumlanan çatlağın genişliği 4 mm, hemen 10 cm sağındaki çatlağın genişliği 2 mm, 10 cm solundaki çatlağın genişliği ise 1,2 mm olarak belirlendi. İki yük uygulama noktası arasındaki bölgenin tam olarak düz kaldığı görüldü. Kesme kollarındaki çatlakların ilerlemediği ve hasarsız sayılabilecek konumda kaldığı görüldü. Kiriş alt yüzünde herhangi bir kabarma problemi görülmedi.
- Yük 91 kN açıklık ortası deplasman değeri 93 mm seviyesinde iken, beton ezilmesinden ötürü açıklık ortası deplasman ölçme aygıtının (LVDT-4) altında kabarmalar meydana geldiği için deplasman değerlerinde sapmalar olabileceği öngörüldü. Bu seviyede ezilme basınç donatısına kadar ilerlemediği için, basınç donatısında herhangi bir burkulma gözlemlenmedi. Deney bu noktada durduruldu, deplasman ölçme aygıtının altındaki ezilmeden ötürü kabarmalar temizlendi.
- Yük 90,2 kN açıklık ortası deplasman değeri 131 mm seviyesinde iken, kiriş alt yüzünde kabarma olmadığı görüldü ve daha önce düzleşen iki yük uygulama noktası arasının ters yönde eğilmeye başladığı görüldü.
- Yük 81,9 kN açıklık ortası deplasman değeri 161 mm seviyelerinde iken, sağ kesme kolunda kiriş alt yüzünde boydan boya aderans çözülmesi ortaya çıktı ve bunun yükte belirgin bir düşüşe sebep olduğu görüldü. Deney sonunda sol kesme kolunda da aderans çözümlerinin ortaya çıktığı ve basınç donatılarının burkulduğu görüldü.

- Deney sonucunda, deney elemanlarının yükselti mesafesi arttıkça aderans problemlerinin ortaya çıktığı görüldü. Ayrıca, yoğun donatılı yükselti mesafesi 450 mm olan kiriş numunesi H-450 için ölçülen akma başlangıç yükü 95 kN ve açıklık ortası deplasman değeri 38,5 mm olarak gözlendi. Deney esnasında H-450 kirişi için ölçülen maksimum yük değeri 95,2 kN olmuştur ve bu esnada kiriş açıklık ortası deplasman değeri 55 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.33. H-450 deney elemanı için deney düzeneği



Şekil 3.34. H-450 deney elemanı yük-deplasman grafikleri



Resim 3.43. H-450 deney elemanı deney öncesi genel görünümü



Resim 3.44. H-450 deney elemanı deney sonu genel görünümü



Resim 3.45. H-450 deney elemanı deney sonu hasar görünümü

4. ANALİTİK YAKLAŞIM

Bu bölümde, öncelikle yükselti mesafesi $f=0$ mm olan referans elemanların (L-0, M-0, H-0) teorik taşıma kapasiteleri hesaplanmış, ardından eğri eksenli kirişlerin deneysel çalışma sonuçlarının referans elemanların deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için açıklık düzeltme faktörünün teorik hesabı gösterilmiştir.

4.1. Referans Deney Elemanlarının Teorik Taşıma Kapasiteleri

Şekil 3.1’de referans deney elemanlarına ait serbest cisim diyagramı verilmiştir. Teorik moment taşıma kapasitesi (M_r) ve bu momenti oluşturan deney kuvveti ($2P$) bu serbest cisim diyagramı esas alınarak hesaplanmıştır.

4.1.1. L-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı

Bu bölümde, mesnet ortasından mesnet ortasına açıklığı $L_1=3680$ mm olan, L-0 deney elemanının teorik taşıma kapasitesi hesaplanmıştır.

Malzeme özellikleri

Beton Sınıfı: C25

Donatı Sınıfı: S420

A_s : 6 Φ 10

A_s' : 4 Φ 10

Hesap parametreleri

$d=186,7$ mm

$d'=13,3$ mm

$f_{cd} = 27,7$ MPa

$f_{yd} = 450$ MPa

$E_s = 200\,000$ MPa

$A_s = 471,24$ mm²

$$A_s' = 314,16 \text{ mm}^2$$

Çekme ve basınç donatı oranlarının belirlenmesi

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \times d} = \frac{471,24}{400 \times 186,7} = 0,0063 \quad (4.1)$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_w \times d} = \frac{314,16}{400 \times 186,7} = 0,0042 \quad (4.2)$$

Dengeli donatı oranının bulunması

$$\rho_b = 0,85 \times k_1 \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$k_1 = 0,85 \text{ (C25 için } k_1 \text{ değeri)}$$

$$\rho_b = 0,85 \times 0,85 \times \frac{27,7}{450} \times \frac{600}{600 + 450} = 0,025 \quad (4.3)$$

Çekme donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

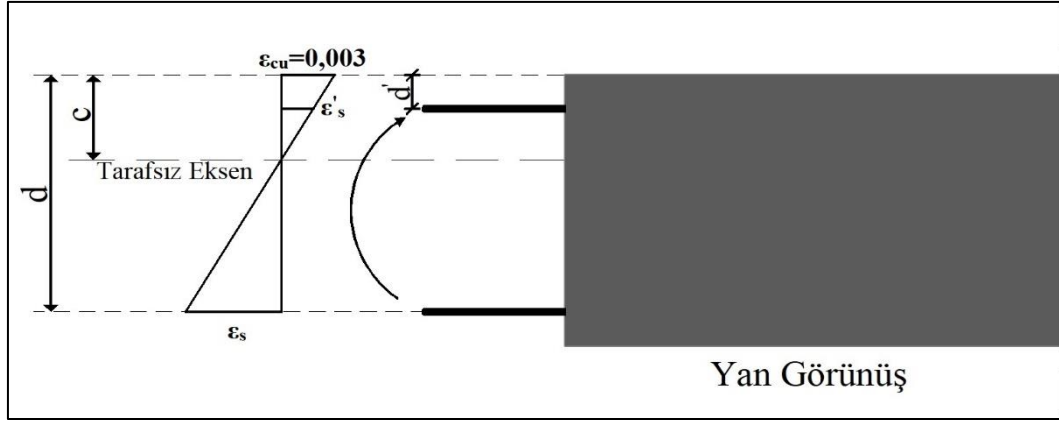
$$\rho - \rho' = 0,0063 - 0,0042 = 0,0021 \quad (4.4)$$

$\rho - \rho' = 0,0020 < \rho_b = 0,025$ olduğu için, kiriş taşıma gücüne ulaştığında çekme donatısı gerilmesi akma dayanımına eşittir.

$$\sigma_s = f_{yd} = 450 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

Basınç donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

Birim şekil değiştirme diyagramındaki benzerlikten uygunluk şartı aşağıdaki denklemler türetilerek basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü yapılır.



Şekil 4.1. Birim şekil değiştirme diyagramı

$$\frac{c-d'}{c} = \frac{\epsilon'_s}{0.003} \quad (4.6)$$

Donatı çeliği gerilme şekil değiştirme ilişkisine göre, elastik davranış sergilediği bölgede donatı gerilmesi, şekil değiştirme ile elastisite modülünün çarpımına eşittir.

$$\sigma'_s = \epsilon'_s \times E_s \text{ Buna göre;} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{c-d'}{c} &= \frac{\frac{\sigma'_s}{E_s}}{0.003} \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \quad (a = k_1 \times c) \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

$$\Sigma F_{\text{basınç}} = \Sigma F_{\text{çekme}} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} 0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a + A_s' \times \sigma'_s &= A_s \times \sigma_s \\ 0,85 \times 27,7 \times 400 \times a + 314,16 \times 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{a}\right) &= 471,24 \times 450 \\ 9418 a^2 - 23\,561,9 a - 2\,130\,942,3 &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{b^2 - 4ac} = \sqrt{(-23\ 561,9)^2 - (4 \times 9418 \times -2\ 130\ 942,3)} = 284\ 309,7 \quad (4.11)$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (4.12)$$

$$x_1 = \frac{23\ 561,9 + 284\ 309,7}{2 \times 9418} = 16,34 \text{ mm ve } x_2 = \frac{23\ 561,9 - 284\ 309,7}{2 \times 9418} = -13,84 \text{ mm}$$

$$a = 16,34 \text{ mm}$$

$$\sigma'_s = 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) = 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{16,34}\right) = 185 \text{ MPa} \quad (4.13)$$

$\sigma'_s < f_{yd} = 420 \text{ MPa}$ olduğu için kiriş taşıma gücüne ulaştığında basınç donatısı gerilmesi akma dayanımına erişmemiştir ve değeri yukarıda hesaplanan değerdir.

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

Çekme donatısı ağırlık merkezine göre;

$$\begin{aligned} M_r &= 0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a \times (d - 0,5 \times a) + A_s' \times \sigma'_s \times (d - d') \\ M_r &= [0,85 \times 27,7 \times 400 \times 16,34 \times (186,7 - 0,5 \times 16,34) + 314,16 \times 185 \times (186,7 - 13,3)] \times 10^{-6} \\ M_r &= 37,56 \text{ kN} \times \text{m} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$M_r = P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{L_1 - 1 \text{ m}}{2}\right) \quad (4.15)$$

$$37,56 \text{ kN} \times \text{m} = P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{3,68 \text{ m} - 1,00 \text{ m}}{2}\right)$$

$$P_{1\text{teorik}} = \frac{37,56 \text{ kN} \times \text{m}}{1,34 \text{ m}} = 28,03 \text{ kN}$$

$$2P_{1\text{teorik}} = 56,06 \text{ kN} \quad (4.16)$$

4.1.2. M-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı

Beton Sınıfı: C25

Donatı Sınıfı: S420

A_s : 9Φ10

$$A_s': 5\Phi 10$$

Hesap parametreleri

$$d=186,7 \text{ mm}$$

$$d'=13,3 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 27,7 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 450 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 706,86 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 392,70 \text{ mm}^2$$

Çekme ve basınç donatı oranlarının belirlenmesi

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \times d} = \frac{706,86}{400 \times 186,7} = 0,0095$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_w \times d} = \frac{392,70}{400 \times 186,7} = 0,0053 \quad (4.17)$$

Dengeli donatı oranının bulunması

$$\rho_b = 0,85 \times k_1 \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$k_1 = 0,85 \text{ (C25 için } k_1 \text{ değeri)}$$

$$\rho_b = 0,85 \times 0,85 \times \frac{27,7}{450} \times \frac{600}{600 + 450} = 0,025 \quad (4.18)$$

Çekme donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

$$\rho - \rho' = 0,0095 - 0,0053 = 0,0042 \quad (4.19)$$

$\rho - \rho' = 0,0042 < \rho_b = 0,025$ olduğu için, kiriş taşıma gücüne ulaştığında çekme donatısı gerilmesi akma dayanımına eşittir.

$$\sigma_s = f_{yd} = 450 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

Basınç donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

Şekil 4.1'deki birim şekil değiştirme diyagramındaki benzerlikten uygunluk şartı aşağıdaki denklemler türetilerek basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü yapılır.

$$\frac{c-d'}{c} = \frac{\epsilon'_s}{0.003} \quad (4.21)$$

Donatı çeliği gerilme şekil değiştirme ilişkisine göre, elastik davranış sergilediği bölgede donatı gerilmesi, şekil değiştirme ile elastisite modülünün çarpımına eşittir.

$\sigma'_s = \epsilon'_s \times E_s$ Buna göre;

$$\begin{aligned} \frac{c-d'}{c} &= \frac{\frac{\sigma'_s}{E_s}}{0.003} \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \quad (a = k_1 \times c) \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

$$\Sigma F_{\text{basınç}} = \Sigma F_{\text{çekme}}$$

$$0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a + A'_s \times \sigma'_s = A_s \times \sigma_s$$

$$0,85 \times 27,7 \times 400 \times a + 392,70 \times 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{a}\right) = 706,86 \times 450$$

$$9418 a^2 - 82 466,81 a - 2 663 677,87 = 0 \quad (4.23)$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{b^2 - 4ac} = \sqrt{(-82 466,81)^2 - (4 \times 9418 \times -2 663 677,87)} = 327 332,93$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$x_1 = \frac{82 466,81 + 327 332,93}{2 \times 9418} = 21,76 \text{ mm ve } x_2 = \frac{82 466,81 - 327 332,93}{2 \times 9418} = -13,0 \text{ mm}$$

$$a=21,76 \text{ mm}$$

$$\sigma'_s = 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) = 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{21,76}\right) = 288,23 \text{ MPa} \quad (4.24)$$

$\sigma'_s < f_{yd} = 420 \text{ MPa}$ olduğu için kiriş taşıma gücüne ulaştığında basınç donatısı gerilmesi akma dayanımına erişmemiştir ve değeri yukarıda hesaplanan değerdir.

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

Çekme donatısı ağırlık merkezine göre;

$$\begin{aligned} M_r &= 0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a \times (d - 0,5 \times a) + A_s' \times \sigma'_s \times (d - d') \\ M_r &= [0,85 \times 27,7 \times 400 \times 21,76 \times (186,7 - 0,5 \times 21,76) + 392,70 \times 288,23 \times (186,7 - 13,3)] \times 10^{-6} \\ M_r &= 55,65 \text{ kN} \times \text{m} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} M_r &= P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{L_1 - 1 \text{ m}}{2}\right) \\ 55,65 \text{ kN} \times \text{m} &= P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{3,68 \text{ m} - 1,00 \text{ m}}{2}\right) \\ P_{1\text{teorik}} &= \frac{55,65 \text{ kN} \times \text{m}}{1,34 \text{ m}} = 41,53 \text{ kN} \\ 2P_{1\text{teorik}} &= 83,06 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.26)$$

4.1.3. H-0 deney elemanının teorik taşıma gücü hesabı

Beton Sınıfı: C25

Donatı Sınıfı: S420

A_s : 12Φ10

A_s' : 6Φ10

Hesap parametreleri

$$d=186,7 \text{ mm}$$

$$d'=13,3 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 27,7 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 450 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 942,48 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 471,24 \text{ mm}^2$$

Çekme ve basınç donatı oranlarının belirlenmesi

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \times d} = \frac{942,48}{400 \times 186,7} = 0,0126$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_w \times d} = \frac{471,24}{400 \times 186,7} = 0,0063 \quad (4.27)$$

Dengeli donatı oranının bulunması

$$\rho_b = 0,85 \times k_1 \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$k_1 = 0,85 \text{ (C25 için } k_1 \text{ değeri)}$$

$$\rho_b = 0,85 \times 0,85 \times \frac{27,7}{450} \times \frac{600}{600 + 450} = 0,025 \quad (4.28)$$

Çekme donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

$$\rho - \rho' = 0,0126 - 0,0063 = 0,0063 \quad (4.29)$$

$\rho - \rho' = 0,0063 < \rho_b = 0,025$ olduğu için, kiriş taşıma gücüne ulaştığında çekme donatısı gerilmesi akma dayanımına eşittir.

$$\sigma_s = f_{yd} = 450 \text{ MPa} \quad (4.30)$$

Basınç donatısının akıp akmadığının belirlenmesi

Şekil 4.1'deki birim şekil değiştirme diyagramındaki benzerlikten uygunluk şartı aşağıdaki denklemler türetilerek basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü yapılır.

$$\frac{c-d'}{c} = \frac{\epsilon'_s}{0.003} \quad (4.31)$$

Donatı çeliği gerilme şekil değiştirme ilişkisine göre, elastik davranış sergilediği bölgede donatı gerilmesi, şekil değiştirme ile elastisite modülünün çarpımına eşittir.

$\sigma'_s = \epsilon'_s \times E_s$ Buna göre;

$$\begin{aligned} \frac{c-d'}{c} &= \frac{\frac{\sigma'_s}{E_s}}{0.003} \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \quad (a = k_1 \times c) \\ \sigma'_s &= 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

$$\Sigma F_{\text{basınç}} = \Sigma F_{\text{çekme}}$$

$$0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a + A'_s \times \sigma'_s = A_s \times \sigma_s$$

$$0,85 \times 27,7 \times 400 \times a + 471,24 \times 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{a}\right) = 942,48 \times 450$$

$$9418 a^2 - 141 371,67 a - 3 196 413,45 = 0 \quad (4.33)$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{b^2 - 4ac} = \sqrt{(-141 371,67)^2 - (4 \times 9418 \times -3 196 413,45)} = 374 701,53$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$x_1 = \frac{141 371,67 + 374 701,53}{2 \times 9418} = 27,40 \text{ mm ve } x_2 = \frac{141 371,67 - 374 701,53}{2 \times 9418} = -12,39 \text{ mm}$$

$$a = 27,40 \text{ mm}$$

$$\sigma'_s = 600 \times \left(1 - k_1 \times \frac{d'}{a}\right) = 600 \times \left(1 - 0,85 \times \frac{13,3}{27,40}\right) = 352,43 \text{ MPa} \quad (4.34)$$

$\sigma'_s < f_{yd} = 420 \text{ MPa}$ olduğu için kiriş taşıma gücüne ulaştığında basınç donatısı gerilmesi akma dayanımına erişmemiştir ve değeri yukarıda hesaplanan değerdir.

Taşıma gücü durumunda kesitte kuvvet denge denklemi

Çekme donatısı ağırlık merkezine göre;

$$M_r = 0,85 \times f_{cd} \times b_w \times a \times (d - 0,5 \times a) + A_s' \times \sigma_s' \times (d - d')$$

$$M_r = [0,85 \times 27,7 \times 400 \times 27,4 \times (186,7 - 0,5 \times 27,4) + 471,24 \times 352,43 \times (186,7 - 13,3)] \times 10^{-6}$$

$$M_r = 73,44 \text{ kN} \times \text{m} \quad (4.35)$$

$$M_r = P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{L_1 - 1 \text{ m}}{2} \right)$$

$$73,44 \text{ kN} \times \text{m} = P_{1\text{teorik}} \times \left(\frac{3,68 \text{ m} - 1,00 \text{ m}}{2} \right)$$

$$P_{1\text{teorik}} = \frac{73,44 \text{ kN} \times \text{m}}{1,34 \text{ m}} = 54,80 \text{ kN}$$

$$2P_{1\text{teorik}} = 109,61 \text{ kN} \quad (4.36)$$

4.2. Eğri Eksenli Elemanlar İçin Açıklık Düzeltme Faktörü

Deney düzeneğine kiriş elemanları oturabilmek için düz eksenli referans elemanlar ile eğri eksenli elemanlar için farklı mesnetlenme biçimleri uygulanmıştır. Uygulamadaki bu farklılık mesnet açıklığında farklı iki durum ortaya çıkarmıştır. Düz eksenli referans kiriş elemanlar için hesap açıklığı L_1 Şekil 3.1'de eğri eksenli kiriş elemanlar için hesap açıklığı L_2 Şekil 3.2'de açıkça gösterilmiştir. Bu açıklıklardan doğan fark, deney elemanlarının test sonuçları karşılaştırmada problem oluşturacağı için, düz eksenli referans elemanların deney sonuçlarına açıklık düzeltme faktörü uygulanacaktır. Bu faktör ayrıca teorik olarak hesaplanan düz eksenli kiriş taşıma kapasitesi ile çarpılarak eğri eksenli kirişlerin teorik taşıma kapasitesinin tahmininde de kullanılacaktır.

$$M_r = P_{1\text{teorik}} \times a_1 \quad \text{Düz kirişler için moment taşıma kapasitesi} \quad (4.37)$$

$$M_r = P_{2\text{teorik}} \times a_2 \quad \text{Eğri eksenli kirişler için moment taşıma kapasitesi} \quad (4.38)$$

$$a_1 = \frac{L_1 - 100 \text{ cm}}{2} \quad (4.39)$$

$$a_2 = \frac{L_2 - 100 \text{ cm}}{2} \quad (4.40)$$

$$P_{1\text{teorik}} = \frac{2 \times M_r}{L_1 - 100}$$

$$2P_{1\text{teorik}} = \frac{4 \times M_r}{L_1 - 100} = \frac{4 \times M_r}{368 - 100} = 0,014925373 \times M_r \quad \text{referans kirişler için taşıma kapasitesi yükü}$$

$$2P_{2\text{teorik}} = \frac{4 \times M_r}{L_2 - 100} = \frac{4 \times M_r}{380 - 100} = 0,014285714 \times M_r \quad \text{eğri eksenli kirişler için taşıma kapasitesi yükü}$$

$$SF = \frac{2P_{2\text{teorik}}}{2P_{1\text{teorik}}} = \frac{0,014285714}{0,014925373} = 0,957 \quad \text{referans kiriş sonuçlarına uygulanacak açıklık düzeltme faktörü} \quad (4.41)$$

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin karşılaştırılması ve yorumlanması amaçlanmaktadır.

5.1. Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Deney numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar ışığında, akma kapasitelerinin karşılaştırılması ve aradaki ilişkinin analitik olarak ortaya koyulması amacı ile aşağıda çizelgeler hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında deney elemanlarının akma başlangıç anından itibaren deney bitene kadar yük seviyesinde önemli artış ve azalışlar yakalanamadığı için deney numunelerinin akma yükleri, yük taşıma kapasiteleri olarak kabul edilmiştir.

5.1.1. L serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması

Az yoğunlukta donatıya sahip, L serisi olarak adlandırılan, 5 adet deney numunesine ait yük taşıma kapasiteleri aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

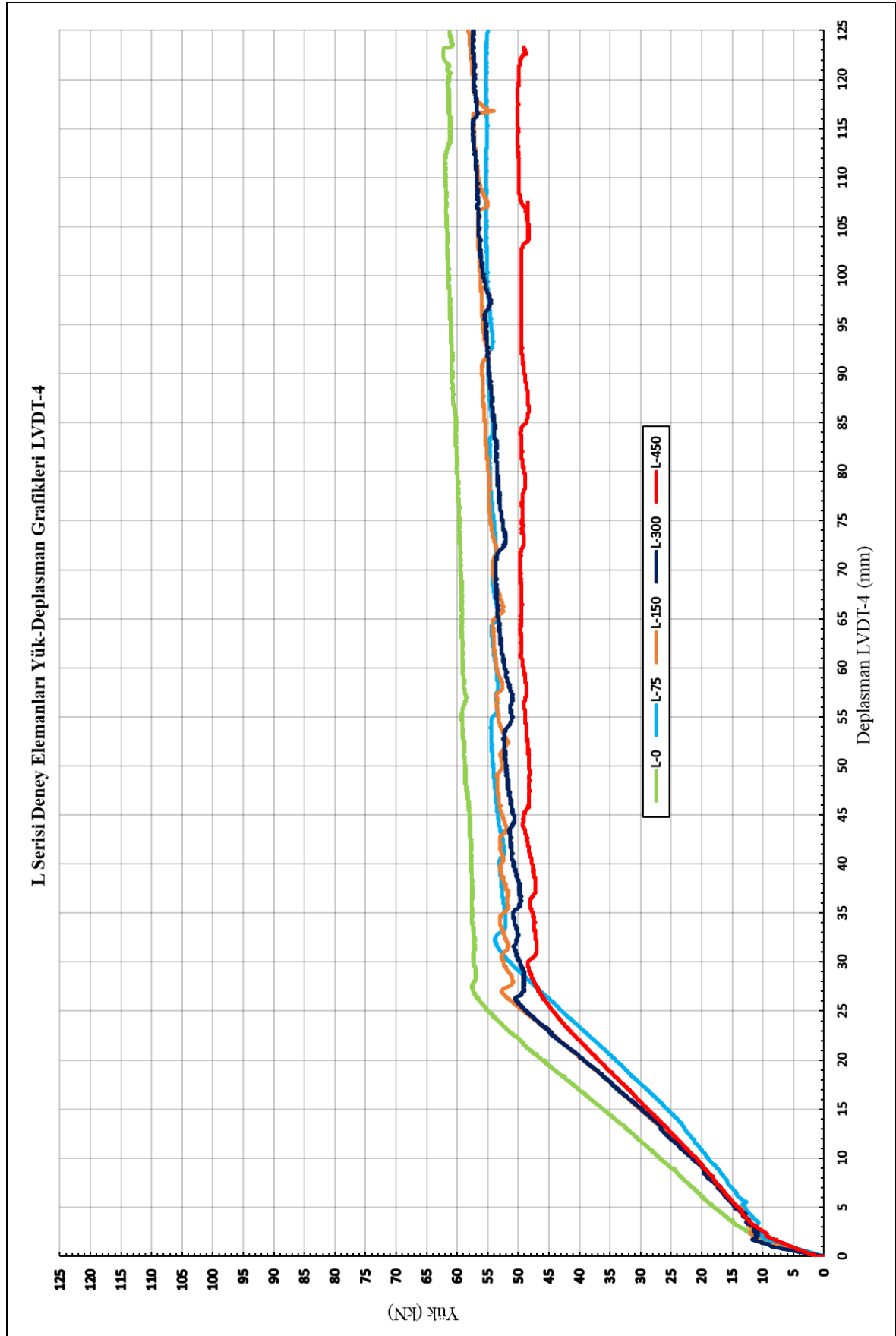
Çizelge 5.1. L serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki

Eleman Adı	f (mm)	L _{1,2} (mm)	2P (kN)	$\frac{2P_{\text{numune}}}{2P_{\text{referans}}}$	$\frac{f}{L_{1,2}}$	$1 - \left(\frac{f}{L_{1,2}} \right)$
L-0 (referans)	0	3680	57,6×0,957=55,1*	1,000	0,00	1,000
L-75	75	3800	53,7	0,974	0,020	0,980
L-150	150	3800	52,8	0,958	0,039	0,961
L-300	300	3800	50,6	0,918	0,079	0,921
L-450	450	3800	48,5	0,880	0,118	0,882

* L-0 referans deney numunesinin, deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan akma yük kapasitesi, bölüm 4.2'de anlatılan nedenlerden ötürü açıklık faktörü SF ile çarpılarak düzeltilmiştir.

Çizelge 5.1'e bakılarak L serisi deney elemanları için, yükselti mesafesi arttıkça (f) akma yük kapasitesinin düştüğü ve bu düşüşün deney elemanının yükselti mesafesinin mesnetler arası açıklık mesafesine oranı ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 5.1'de L serisi deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. L serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği

5.1.2. M serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması

Orta yoğunlukta donatıya sahip, M serisi olarak adlandırılan, 5 adet deney numunesine ait yük taşıma kapasiteleri aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

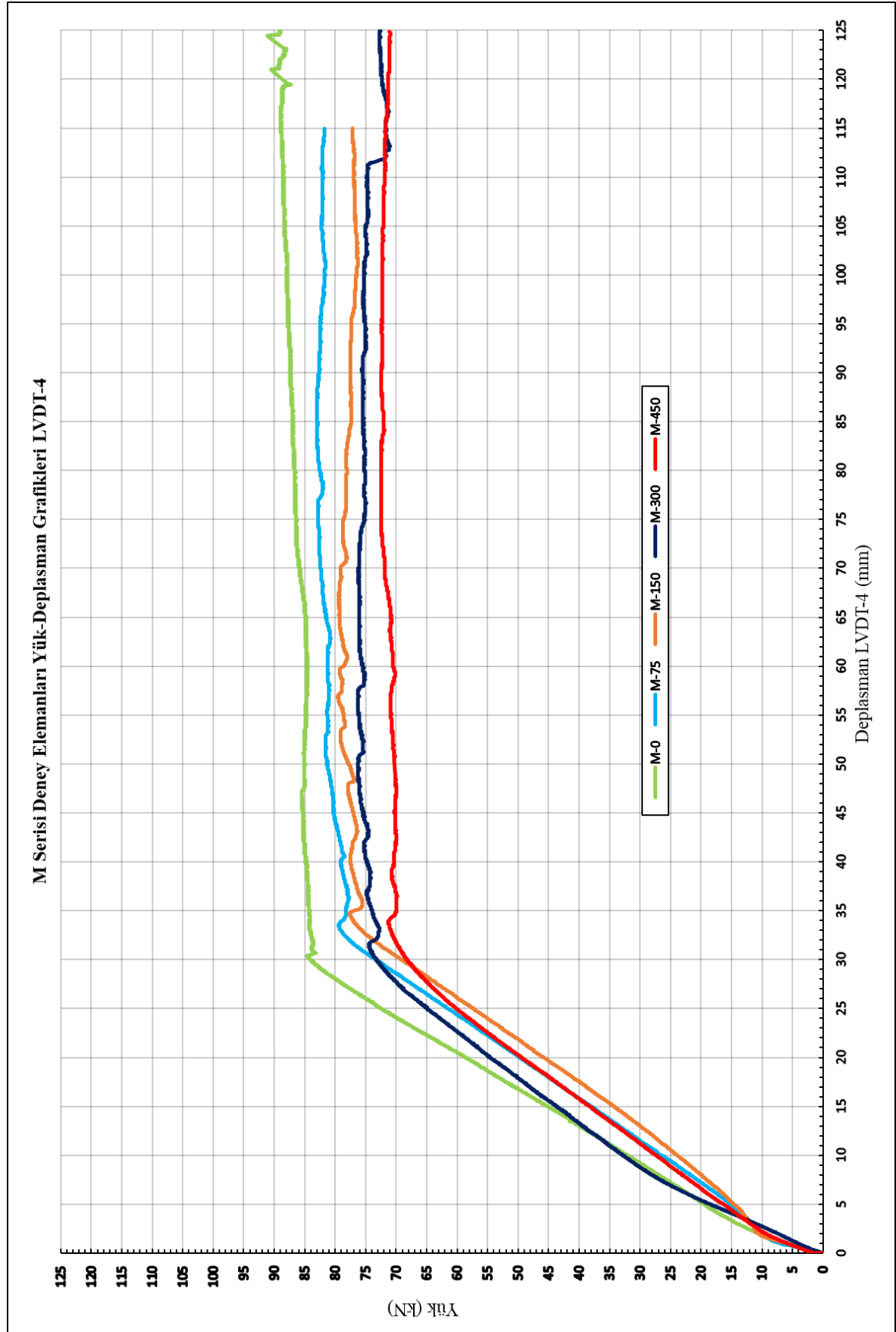
Çizelge 5.2. M serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki

Eleman Adı	f (mm)	L _{1,2} (mm)	2P (kN)	$\frac{2P_{\text{numune}}}{2P_{\text{referans}}}$	$\frac{f}{L_{1,2}}$	$1 - \left(\frac{f}{L_{1,2}} \right)$
M-0 (referans)	0	3680	84,5×0,957=80,9*	1,000	0,000	1,000
M-75	75	3800	79,5	0,983	0,020	0,980
M-150	150	3800	77,7	0,961	0,039	0,961
M-300	300	3800	74,5	0,921	0,079	0,921
M-450	450	3800	71,3	0,882	0,118	0,882

* M-0 referans deney numunesinin, deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan akma yük kapasitesi, bölüm 4.2'de anlatılan nedenlerden ötürü açıklık faktörü ile çarpılarak düzeltilmiştir.

Çizelge 5.2'ye bakılarak M serisi deney elemanları için, yükselti mesafesi (f) arttıkça, akma yük kapasitesinin düştüğü ve bu düşüşün deney elemanının yükselti mesafesinin mesnetler arası açıklık mesafesine oranı ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 5.2'de M serisi deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.2. M serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği

5.1.3. H serisi deney elemanlarının deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yoğun donatı oranına sahip, H serisi olarak adlandırılan, 5 adet deney numunesine ait yük taşıma kapasiteleri aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

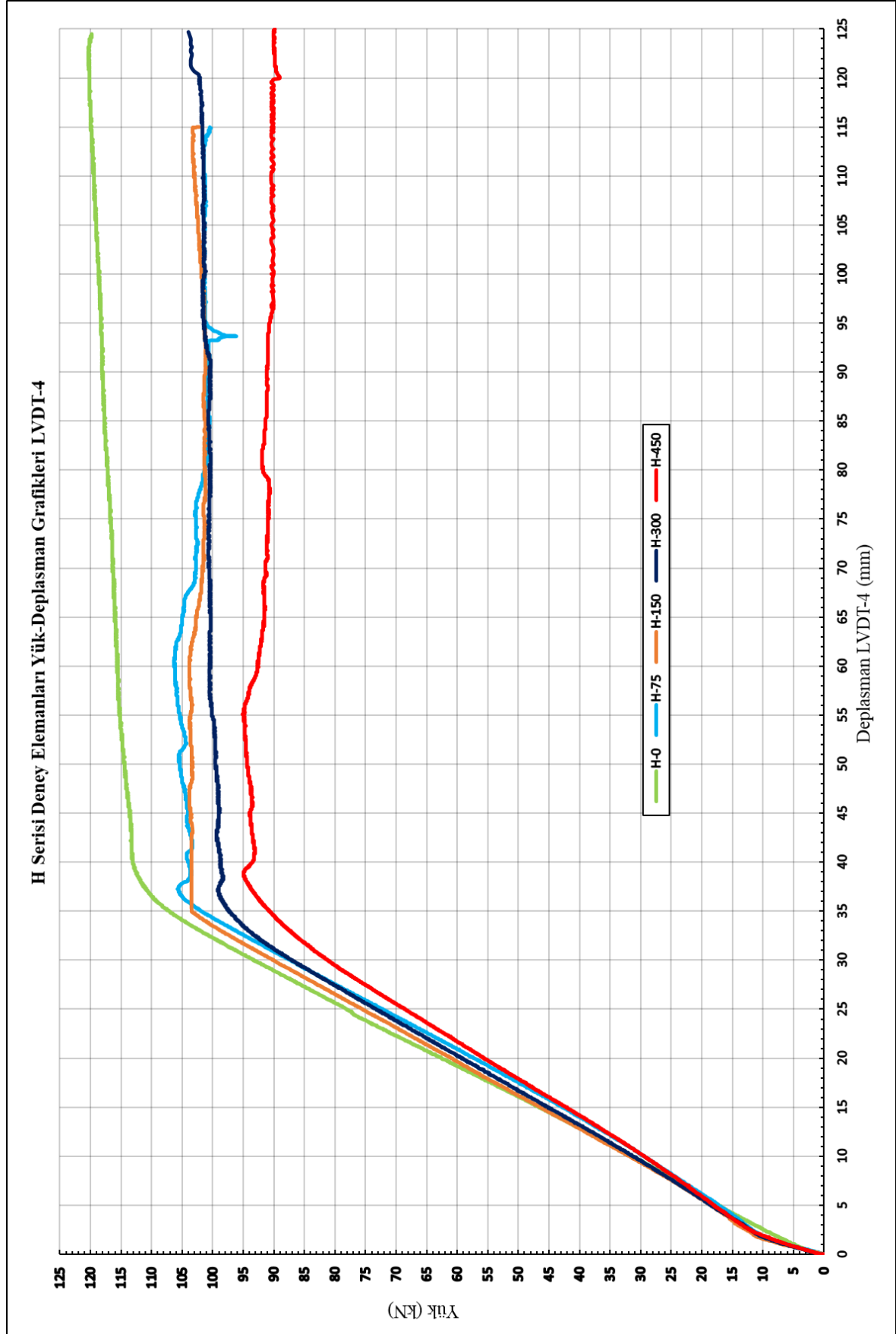
Çizelge 5.3. H serisi deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri ve analitik ilişki

Eleman Adı	f (mm)	L _{1,2} (mm)	2P (kN)	$\frac{2P_{\text{numune}}}{2P_{\text{referans}}}$	$\frac{f}{L_{1,2}}$	$1 - \left(\frac{f}{L_{1,2}} \right)$
H-0 (referans)	0	3680	112,5×0,957=107,7*	1,000	0,00	1,000
H-75	75	3800	105,6	0,981	0,020	0,980
H-150	150	3800	103,5	0,961	0,039	0,961
H-300	300	3800	98,8	0,918	0,079	0,921
H-450	450	3800	95,0	0,882	0,118	0,882

* H-0 referans deney numunesinin, deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan akma yük kapasitesi, bölüm 4.2'de anlatılan nedenlerden ötürü açıklık faktörü ile çarpılarak düzeltilmiştir.

Çizelge 5.3'e bakılarak H serisi deney elemanları için, yükselti mesafesi arttıkça (f) akma yük kapasitesinin düştüğü ve bu düşüşün deney elemanının yükselti mesafesinin mesnetler arası açıklık mesafesine oranı ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 5.3'de H serisi deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.3. H serisi deney elemanlarının karşılaştırmalı yük-deplasman grafiği

5.2. Tüm Deney Elemanlarının Teorik Yük Taşıma Kapasiteleri İle Deneysel Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

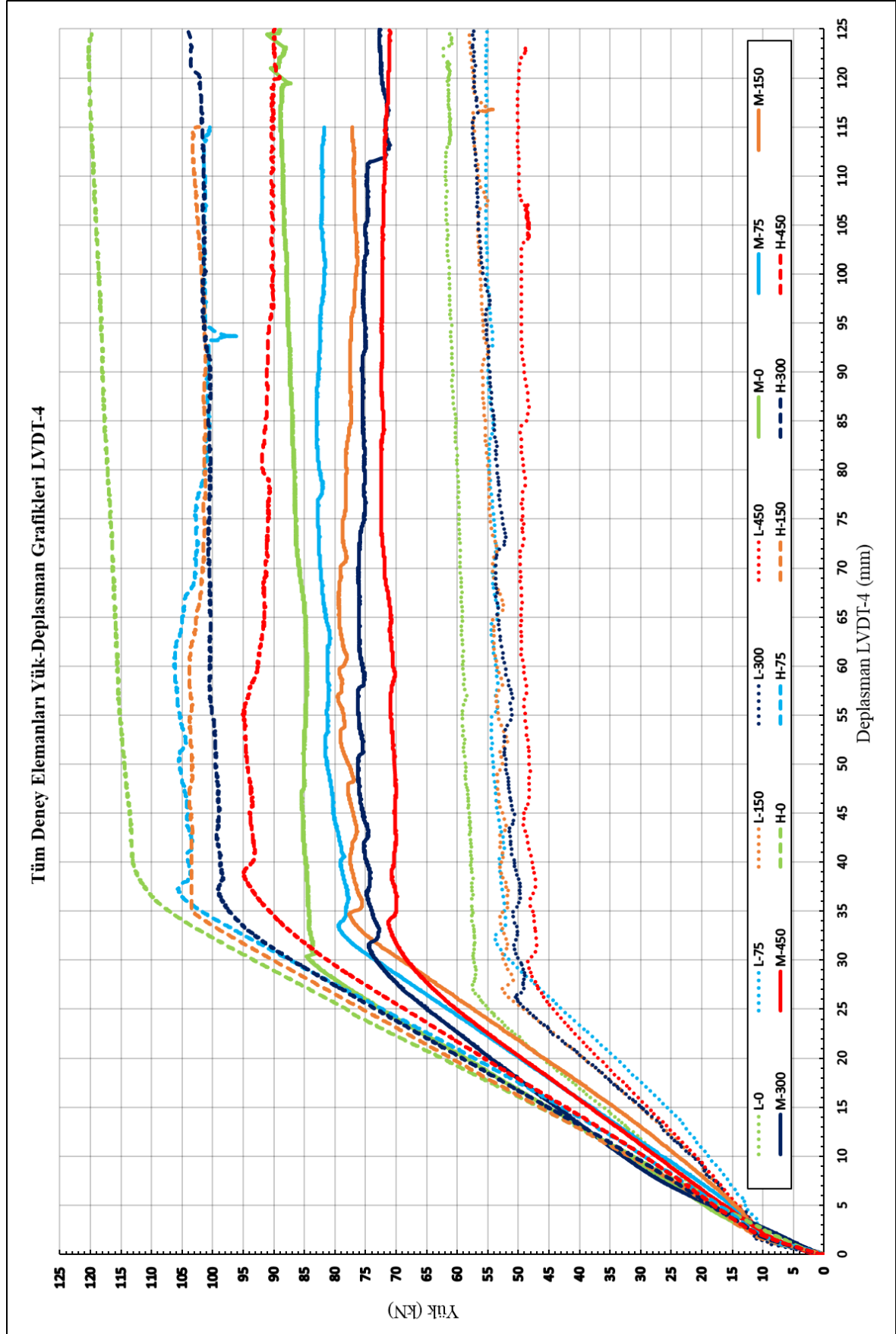
Çizelge 5.4'de referans deney elemanlarının (L-0, M-0, H-0) bölüm 4.1'de hesaplanan teorik taşıma kapasiteleri ve bölüm 5.1'de bulunan analitik ilişki ışığında, eğri eksenli elemanların teorik taşıma kapasiteleri hesaplanmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 5.4'de tüm deney elemanları için yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.4. Tüm deney elemanlarının teorik yük taşıma kapasiteleri ve deneysel taşıma kapasiteleri karşılaştırması

Eleman Adı	f (mm)	L _{1,2} (mm)	$\frac{f}{L_{1,2}}$	$RF=1-\left(\frac{f}{L_{1,2}}\right)$	SF	2P _{teorik} (kN)	2P _{deneysel} (kN)	$\frac{2P_{teorik}}{2P_{deneysel}}$
L-0 (referans)	0	3680	0,000	1,000	1	56,1	57,6	0,97
L-75	75	3800	0,020	0,980	0,957	56,1×0,957×0,980=52,6	53,7	0,98
L-150	150	3800	0,039	0,961	0,957	56,1×0,957×0,961=51,5	52,8	0,98
L-300	300	3800	0,079	0,921	0,957	56,1×0,957×0,921=49,4	50,6	0,98
L-450	450	3800	0,118	0,882	0,957	56,1×0,957×0,882=47,3	48,5	0,98
M-0 (referans)	0	3680	0,000	1,000	1	83,1	84,5	0,98
M-75	75	3800	0,020	0,980	0,957	83,1×0,957×0,980=77,9	79,5	0,98
M-150	150	3800	0,039	0,961	0,957	83,1×0,957×0,961=76,4	77,7	0,98
M-300	300	3800	0,079	0,921	0,957	83,1×0,957×0,921=73,2	74,5	0,98
M-450	450	3800	0,118	0,882	0,957	83,1×0,957×0,882=70,1	71,3	0,98
H-0 (referans)	0	3680	0,000	1,000	1	109,6	112,5	0,97
H-75	75	3800	0,020	0,980	0,957	109,6×0,957×0,980=102,8	105,6	0,97
H-150	150	3800	0,039	0,961	0,957	109,6×0,957×0,961=100,8	103,5	0,97
H-300	300	3800	0,079	0,921	0,957	109,6×0,957×0,921=96,6	98,8	0,98
H-450	450	3800	0,118	0,882	0,957	109,6×0,957×0,882=92,5	95,0	0,97

Çizelge 5.4'de açıkça görüleceği üzere düz ve eğri eksenli kirişlerin deneyler sonucu bulunan taşıma kapasitelerinin, teorik olarak hesaplanan değerler ile oldukça uyumlu olduğu gözükmemektedir. Hata oranları %2 ile % 3 arasında değişmektedir.

Aşağıda verilen Şekil 5.4'de üç deney grubu içinde (L, M ve H serisi) yükselti mesafesi (f) arttıkça taşıma gücü dayanımının azaldığı açıkça gözükmemektedir.



Şekil 5.4. Tüm deneç elemanlarının karşılaştırmalı y¼k-deplasman grafiği

5.3. Akma Rijitliği

“Betonarme kesitlerde çatlamış kesite ait etkin kesit rijitlikleri (EI_e), Moment-Eğrilik ilişkisi göz önüne alınarak, akma momenti; M_y ve akma eğriliğine karşı gelen ϕ_y oranı ile belirlenir ve ilk eğrinin eğimi etkin kesit rijitliğini verir” [14]. Eğrilik ile moment ilişkisi, yük deplasman grafiği ile doğrudan ilişkili olduğu için, betonarme kiriş elemanların yük deplasman grafiklerinin akmaya kadar olan kısımlarının doğrusal olduğu varsayımı ile akma anındaki yük değerinin, akma anındaki deplasman değerine bölünmesi ile akma rijitliği değerleri aşağıda tanımlanarak karşılaştırılmıştır.

5.3.1. L serisi deney elemanlarının akma rijitliği

Çizelge 5.5’ten görüldüğü gibi, az yoğunlukta donatılı kirişlerin yükselti mesafesi (f) arttıkça akma rijitliğinde düşmeler görülmüştür.

Çizelge 5.5. L serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	P_y (kN)	LVDT-4 (mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)	$\frac{\text{Akma rijitliği (numune)}}{\text{Akma rijitliği (referans)}}$
L-0 (referans)	0,000	57,6	27,3	2,11	1,00
L-75	0,020	53,7	31,9	1,68	0,80
L-150	0,039	52,8	27,0	1,96	0,93
L-300	0,079	50,6	26,2	1,93	0,92
L-450	0,118	48,5	29,5	1,64	0,78

5.3.2. M serisi deney elemanlarının akma rijitliği

Çizelge 5.6’dan görüldüğü üzere, orta yoğunlukta donatılı kirişlerin yükselti mesafesi (f) arttıkça akma rijitliklerinde düşmeler görülmüştür.

Çizelge 5.6. M serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	P_y (kN)	LVDT-4 (mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)	$\frac{\text{Akma rijitliği (numune)}}{\text{Akma rijitliği (referans)}}$
M-0 (referans)	0,000	84,5	30,2	2,80	1,00
M-75	0,020	79,5	33,4	2,38	0,85
M-150	0,039	77,7	34,6	2,25	0,80
M-300	0,079	74,5	31,3	2,38	0,85
M-450	0,118	71,3	33,6	2,12	0,76

5.3.3. H serisi deney elemanlarının akma rijitliği

Çizelge 5.7’den görüldüğü üzere, çok yoğun donatılı kirişlerin yükselti mesafesi (f) arttıkça akma rijitliklerinde düşmeler görülmüştür.

Çizelge 5.7. H serisi deney elemanlarının akma rijitliği karşılaştırması

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	P_y (kN)	LVDT-4 (mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)	$\frac{\text{Akma rijitliği (numune)}}{\text{Akma rijitliği (referans)}}$
H-0 (referans)	0,000	112,5	38,8	2,90	1,00
H-75	0,020	105,6	36,9	2,86	0,99
H-150	0,039	103,5	34,9	2,97	1,02
H-300	0,079	98,8	36,3	2,72	0,94
H-450	0,118	95,0	38,5	2,47	0,85

5.4. Enerji Sönümleme

Her bir deney elemanının yük-deplasman grafiği altında kalan alanlar hesaplanarak enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Enerji sönümleme kapasiteleri, akma anına kadar olan enerji sönümleme kapasitesi (E_r) ve 115 mm deplasman seviyesine kadar olan enerji sönümleme kapasitesine (E_{115}) göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

5.4.1. L serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Çizelge 5.8’den görüldüğü üzere az yoğunlukta donatıya sahip olan L serisi kirişlerde, yükselti mesafesi (f) arttıkça, kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri azalmaktadır. Tüm deneyler eşit deplasman seviyelerine kadar sürdürülemediği için deney sonu enerji sönümleme kapasitelerini karşılaştırmak mümkün olmamıştır fakat bunun yerine 115 mm deplasman seviyesindeki enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.8. L serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Eleman Adı	E_r (Joule)	E_{115} (Joule)	$\frac{E_r \text{ numune}}{E_r \text{ referans}}$	$\frac{E_{115mm} \text{ numune}}{E_{115mm} \text{ referans}}$
L-0 (referans)	916	6145	1,00	1,00
L-75	911	5416	0,99	0,88
L-150	766	5546	0,84	0,90
L-300	728	5450	0,79	0,89
L-450	836	5023	0,91	0,82

5.4.2. M serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Çizelge 5.9'dan görüldüğü üzere orta yoğunlukta donatıya sahip olan M serisi kirişlerde, yükselti mesafesi (f) arttıkça, kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri azalmaktadır. Tüm deneyler eşit deplasman seviyelerine kadar sürdürülemediği için deney sonu enerji sönümleme kapasitelerini karşılaştırmak mümkün olmamıştır fakat bunun yerine 115 mm deplasman seviyesindeki enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.9. M serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Eleman Adı	E_r (Joule)	E_{115} (Joule)	$\frac{E_r \text{ numune}}{E_r \text{ referans}}$	$\frac{E_{115\text{mm numune}}}{E_{115\text{mm referans}}}$
M-0 (referans)	1379	8694	1,00	1,00
M-75	1411	8068	1,02	0,93
M-150	1407	7653	1,02	0,88
M-300	1356	7650	0,98	0,88
M-450	1396	7214	1,01	0,83

5.4.3. H serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Çizelge 5.10'da görüldüğü üzere yoğun donatı oranına sahip olan H serisi kirişlerde, yükselti mesafesi (f) arttıkça, kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri azalmaktadır. Tüm deneyler eşit deplasman seviyelerine kadar sürdürülemediği için deney sonu enerji sönümleme kapasitelerini karşılaştırmak mümkün olmamıştır fakat bunun yerine 115 mm deplasman seviyesindeki enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.10. H serisi deney elemanlarının enerji sönümleme kapasiteleri

Eleman Adı	E_r (Joule)	E_{115} (Joule)	$\frac{E_r \text{ numune}}{E_r \text{ referans}}$	$\frac{E_{115\text{mm numune}}}{E_{115\text{mm referans}}}$
H-0 (referans)	2339	11242	1,00	1,00
H-75	1999	10023	0,85	0,89
H-150	1884	10086	0,81	0,90
H-300	1955	9867	0,84	0,88
H-450	2042	9066	0,87	0,81

5.5. Süneklik

“Genel anlamda süneklik, dayanımda önemli bir azalma olmadan, büyük deformasyona yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Süneklik, bir kesitin taşıma kapasitesinde önemli bir düşme olmadan deformasyon yapabilme özelliğidir. Genelde kapasitede kabul edilebilecek düşme %15’i geçmemelidir” [15].

“Betonarmede kesit sünekliği, eğrilik süneklik katsayısı ile tanımlanır. Eğrilik süneklik katsayısı, kırılma anındaki eğriliğin (veya dayanımın %15 düştüğü noktaya karşı gelen eğriliğin), çekme donatısının aktığı andaki eğriliğe oranı olarak tanımlanır” [15].

Bu çalışmada, süneklik oranı yük-deplasman eğrisinin üzerinde ulaşılan en büyük yükün %15 dayanım kaybettiği noktadaki deplasman değerinin, akma anındaki deplasman değerine oranı alınarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Deney süresince maksimum yük değerinin %15 oranında düşüş gözlenmeyen numuneler için, maksimum yük değerindeki deplasman değeri alınmıştır.

5.5.1. L serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

L serisi deney elemanlarının hiçbirinde deney süresi boyunca maksimum yükün %15’i kadar yükte düşme yakalanamamıştır. L-300 deney kirişinde 300 mm deplasman seviyelerine kadar çıkılmasına rağmen yükte büyük bir düşüş gözlenmemiştir. L-450 deney elemanı 123 mm deplasman seviyelerinde deney düzeneğinden fırladığı için deney ileri deplasmanlara kadar gidememiştir. Tüm deney elemanları eşit deplasman seviyelerine kadar zorlanabilseydi eğrilik süneklik katsayılarında çok büyük değişiklikler olmayacağı öngörülmektedir.

Çizelge 5.11. L serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	Akma anındaki deplasman LVDT-4 (mm)	Maksimum yük ya da %85'ine karşı gelen deplasman LVDT-4 (mm)	Eğrilik süneklik katsayısı (μ_c)	$\frac{\mu_{cnumune}}{\mu_{creferans}}$
L-0 (referans)	0,000	27,3	135,0	4,95	1,00
L-75	0,020	31,9	124,0	3,89	0,79
L-150	0,039	27,0	135,5	5,02	1,01
L-300	0,079	26,2	131,9	5,03	1,01
L-450	0,118	29,5	119,1	4,03	0,81

5.5.2. M serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

M serisi deney elemanlarının hiçbirinde deney süresi boyunca maksimum yükün %15'i kadar yükte düşme yakalanamamıştır. Tüm deney elemanları eşit deplasman seviyelerine kadar zorlanabilseydi eğrilik süneklik katsayılarında çok büyük değişiklikler olmayacağı öngörülmektedir.

Çizelge 5.12. M serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	Akma anındaki deplasman LVDT-4 (mm)	Maksimum yük ya da %85'ine karşı gelen deplasman LVDT-4 (mm)	Eğrilik süneklik katsayısı (μ_c)	$\frac{\mu_{cnumune}}{\mu_{creferans}}$
M-0 (referans)	0,000	30,2	124,4	4,12	1,00
M-75	0,020	33,4	111,1	3,33	0,81
M-150	0,039	34,6	115,1	3,33	0,81
M-300	0,079	31,3	129,0	4,12	1,00
M-450	0,118	33,6	138,0	4,10	0,99

5.5.3. H serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

H serisi deney elemanlarında yalnızca H-75, H-150 ve H-450 isimli deney elemanlarında maksimum yükün %15 düştüğü yük seviyesi yakalanabilmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere, deney elemanları eşit deplasman seviyelerine kadar denenebilseydi, süneklik oranlarında çok büyük değişiklikler olmayacağı öngörülmektedir.

Çizelge 5.13. H serisi deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları

Eleman Adı	$\frac{f}{L_{1,2}}$	Akma anındaki deplasman LVDT-4 (mm)	Maksimum yük ya da %85'ine karşı gelen deplasman LVDT-4 (mm)	Eğrilik süneklik katsayısı (μ_c)	$\frac{\mu_{crumune}}{\mu_{creferans}}$
H-0 (referans)	0,000	38,8	129,5	3,34	1,00
H-75	0,020	36,9	170,8	4,63	1,39
H-150	0,039	34,9	146,2	4,19	1,25
H-300	0,079	36,3	124,7	3,44	1,03
H-450	0,118	38,5	162,1	4,21	1,26

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 3 tip farklı donatı oranı ve 5 tip farklı eğrilğe sahip toplam 15 adet betonarme kiriş, iki noktadan monotonik düşey yükleme maruz bırakılarak dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Bu deneyler, düşeyde eğri eksenli, eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen ve mesnetlerinde yatayda serbestçe hareket edebilen betonarme kirişlerin davranış ve dayanımlarını belirleyebilmek amacı ile yapılmıştır. Deneyler sonucunda, bu tip kirişlerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, akma rijitlikleri, enerji sönümleme kapasiteleri ve eğrilik süneklik katsayıları hakkında bilgiler elde edilmiş ve bu bilgiler ışığında karşılaştırma ve analizler yapılmıştır. Aşağıda deneyler ve araştırmalar sırasında elde edilen bu sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca çalışma sonuçları ışığında, yapılacak benzer çalışmalar için araştırmacılara öneriler sunulmuştur.

- Tüm deney numuneleri deney esnasında bir eğilme elemanı gibi davranmış, numune üzerindeki hasarlar sabit moment bölgesinde eğilme çatlağı tipinde görülmüş, kesme kollarının hasarsız denebilecek düzeyde olduğu görülmüştür.
- Her üç deney serisi için (L-M-H) referans deney elemanından yükselti mesafesi en fazla olan $f=450$ mm kirişine doğru taşıma kapasitesinde %12 oranında düşme gözlenmiştir. Buradan da açıkça anlaşılabileceği üzere aynı donatı oranına sahip kirişlerde yükselti mesafesi (f) arttıkça maksimum yük taşıma kapasitesinin azaldığı açıkça söylenebilir.
- Tüm deney serilerinde yükselti mesafesi (f) arttıkça akma rijitliğinin azaldığı açıkça görülmektedir. Fakat H serisi deney elemanlarının L ve M serisi deney elemanlarına göre akma rijitliğinin yükselti mesafesi (f) arttıkça daha düşük oranda azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.
- Tüm deney elemanları için yükselti mesafesi (f) arttıkça enerji sönümleme kapasitesinin azaldığı açıkça görülmektedir.
- Tüm deney elemanlarının eğrilik süneklik katsayıları için deney sonuçlarına dayanarak açıkça yorum yapılamamaktadır. Hem deney esnasında yaşanan bazı aksaklıklar, hem tüm deney elemanlarının aynı deplasman seviyelerine kadar zorlanamaması nedeni ile eğrilik süneklik katsayıları ile ilgili kesin bir kanıya varılamamıştır. Fakat deney düzeneğindeki sınırlılıklar aşılabılıp tüm deney numuneleri eşit deplasman seviyelerine kadar zorlanabilseydi ve aynı zamanda yük seviyesinde büyük düşmeler gözlenebilseydi, eğrilik süneklik katsayılarında çok büyük değişiklikler olmayacağı öngörülmektedir.

- Tüm deney elemanlarından farklı olarak, yoğun donatılı ve en eğri eksenli H-450 kirişinde yüksek deplasmanlarda aderans çözümleri görülmüştür.
- Yükselti mesafesi (f) artan kirişlerde beton basınç bölgesi olan kiriş üst yüzünde (genellikle açıklık ortasında) beton ezilmesi daha düşük deplasman seviyelerinde ortaya çıkmıştır.
- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, düşeyde eğri eksenli ve eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen, her iki mesnedinde yatayda hareket edebilen bu tip bir kirişin yükselti mesafesi (f) arttıkça taşıma kapasitesinin düştüğü görülmüş ve bu düşüşün $1-f/L$ oranı ile orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sonuç olarak düşeyde eğri eksenli ve eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen, her iki mesnedinde yatayda hareket edebilen bu tip bir kirişin taşıma kapasitesi hesaplanırken şu yol izlenebilir; öncelikle eğri eksenli kirişin aynı mesnet açıklığına sahip düz bir kiriş olduğu varsayılarak taşıma kapasitesi hesaplanır. Daha sonra eğri eksenli kirişin $1-f/L$ oranı hesaplanır ve düz kirişin taşıma kapasitesi ile çarpılarak, bu tip eğri eksenli bir kirişin taşıma kapasitesi hesaplanabilir.

Yukarıda belirtilen sonuçlar ışığında, gelecekte yapılması planlanan bu tip bir çalışma için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Çalışmanın sonucunda bulunan, düşeyde eğri eksenli ve eğrilik düzlemi içerisinde yüklenen, her iki mesnedinde yatayda hareket edebilen bu tip kirişlerin yük taşıma kapasitesi hesabı için önerilen denklemin genelleştirilebilmesi için, ileride yapılacak çalışmalarda düşey eksen eğriliği bu çalışmada araştırılan numunelerden daha büyük olan kiriş numunelerinin de denenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.
- Düşeyde eğri eksenli ve düzlemi içerisinde yüklenen, her iki mesnedinde yatayda hareket edebilen bu tip kirişlerin, eksen eğriliği yani yükselti mesafesi (f) arttıkça yük taşıma kapasitesinin azalmasından ötürü, iki tekil yük etkisi arasında kalan sabit moment bölgesinin güçlendirilme yapılarak denenmesi ve yük taşıma kapasiteleri ile davranışlarının gözlemlenmesinin de yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Rj Watson. *Disktron Bearings used on Innovative U-Girder Bridge*. URL: <https://www.rjwatson.com/Projects/disktron-bearings-used-on-innovative-u-girder-bridge/> Son Erişim Tarihi: 19.06.2022.
2. İnternet: Balconette, Curved Balconies on Jersey Apartments. URL: <https://blog.balconette.co.uk/curved-balconies-on-jersey-apartments/> Son Erişim Tarihi: 21.06.2022.
3. Wilson, B. J., and Quereau, J. F. (1928). A simple method of determining stress in curved flexural members. *University of Illinois Bulletin*, 25(20), 5-24.
4. Liew, J. R., Thevendran, V., Shanmugam, N. E., and Tan, L. O. (1995). Behaviour and design of horizontally curved steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 32(1), 37-67.
5. Jönsson, J. (2005). Load carrying capacity of curved glulam beams reinforced with self-tapping screws. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 63(5), 342-346.
6. Jordaan, I. J., Khalifa, M. M., and McMullen, A. E. (1974). Collapse of curved reinforced concrete beams. *Journal of the Structural Division*, 100(11), 2255-2269.
7. Yousifany A. H. (2010). Evaluation of the behaviour of reinforced concrete curved in-plane beams. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 6(2), 14-26.
8. Hemzah, S. A. and Ali A. Y. (2014). *Behavior of reinforced concrete horizontally curved beams with openings strengthened by cfrp laminates*. Dissertation, Civil Engineering Department, Babylon University, Hillah, Republic of Iraq, 193-196.
9. Subramani, T., Subramani, M., and Prasath, K. (2014). Analysis of three dimensional horizontal reinforced concrete curved beam using Ansys. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), 156-161.
10. Kayathri, D. K., and Balaji, C. D. R. (2015). Experimental and analytical study on flexural behaviour of curved beams. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 4(3), 146-152.
11. Numan, H. A., Waryosh, W. A., and Ali, S. S. (2019). Behavior of Laminated Reinforced Concrete Curved Beam with Changing Concrete Properties. *Civil Engineering Journal*, 5(2), 284-294.
12. Subramanian, R., and Murugesan, A. (2019). Horizontal thrust in vertically curved reinforced concrete beams. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 24(2), 04019005.
13. Keykha, A. H. (2019). Assessment of Structural Behavior of Vertical Curved Hollow Steel Beams Strengthened Using CFRP Composite. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 24(4), 04019021.

14. İnternet: Kaya, Y. Etkin kesit rijitliği nedir hangi durumlarda kullanacağız?. URL: <https://www.insaport.com/makale/yuksel-kaya/etkin-kesit-rijitligi-nedir-hangi-durumlarda-kullanacagiz/>, Son Erişim Tarihi: 22.09.2021.
15. Ersoy, U., Özcebe, G., ve Canbay, E. (2020). *Betonarme davranış ve hesap ilkeleri Cilt:1* (Onuncu Basım). İstanbul, Türkiye: Evrim Yayınevi, 116-118.



GAZİ GELECEKTİR..