

**T-KESİTLİ
BETONARME KİRİŞLERİN
KESME-EĞİLMEYE
KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ**

Eray ÖZBEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2008
ANKARA**

Eray ÖZBEK tarafından hazırlanan T-KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME-EĞİLMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Hüsnü CAN

Tez Danışmanı, İnşaat Anabilim Dalı

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

Ortak Tez Danışmanı, İnşaat Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA

Mimarlık Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsnü CAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Bengi AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 22/10/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Eray ÖZBEK

**T-KESİTLİ
BETONARME KİRİŞLERİN
KESME-EĞİLMEME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Eray ÖZBEK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
EKİM 2008**

ÖZET

Betonarme kirişlerin alt yüzüne çelik levha yapıştırarak eğilmeye karşı güçlendirme sıkça uygulanan bir yöntemdir. Sadece çekme yüzeyine levha yapıştırmanın yeterli olmayacağı yapılan araştırmalar ve literatür incelemesi sonucunda görülmüş ve ek önlemler de uygulanmıştır. Ancak bugüne kadar yapılan bu türden çalışmalarda önemli sünelik sorunlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmanın birinci bölümünde, delikli ve düz çelik levha ile güçlendirilmiş kirişlere dayanımın yanı sıra yeterli sünelik de kazandırılması için çelik levha, uç yan levha ve bulonlarıyla desteklenmiştir. Betonarme kirişleri eğilme ve kesme zorlanmalarına karşı birlikte güçlendirme gerekliliği sıkça karşımıza çıkan bir problemdir. Çalışmanın ikinci bölümünde, eğilmeye karşı çelik levhalarla güçlendirilen eksik etriyeli betonarme kirişler birde kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmada eğilmeye karşı birisi referans, altısı güçlendirilmiş; eğilme-kesmeye karşı ise yine birisi referans, altısı güçlendirilmiş olmak üzere on dört deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Eğilme elemanlarında değişkenler levha tipi (delikli, düz), yapıştırıcı (epoksili, epoksisiz), basınç levhası (var, yok) şeklindedir. Kesme ve eğilme elemanlarında ise kesmeye karşı güçlendirme tekniği sabit tutularak eğilme elemanlarındaki

değişkenler yinelenmiştir. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Uygulanan güçlendirme tekniği ile dayanım oranının yaklaşık üç kat arttırılmasının yanı sıra süneklik oranında büyük artışlar sağlanmıştır. Ayrıca eksik etriyeli kirişlerin kesmeden kırılması önlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.145

Anahtar Kelimeler : Kiriş güçlendirmesi, eğilmeye karşı güçlendirme, kesmeye karşı güçlendirme, levha yapıştırma, delikli çelik levha, çelik levha ile güçlendirme

Sayfa Adedi : 176

**Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Hüsnü CAN
Dr. Sabahattin AYKAÇ**

**STRENGTHENING OF T-CROSS SECTIONED
REINFORCED CONCRETE BEAMS
AGAINST SHEAR AND FLEXURE
(M. Sc. Thesis)**

Eray ÖZBEK

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE
OCTOBER 2008**

ABSTRACT

Bonding of steel plates on the bottom face of a beam is widely used for strengthening reinforced concrete beams against flexure. But over the years it has been observed that only bonding steel plate wasn't enough to strengthen reinforced concrete beams, therefore additional precautions were taken. However, it has been faced with some important ductility problems in the recent studies. In the first part of this study steel plates bonded on the bottom face of the beam is supported with side edge plates and bolts to provide sufficient ductility as well as flexural strength. It is usually necessity to strengthen the reinforced concrete beams against both flexure and shear. In the second part of this study steel plate strengthened reinforced concrete beams for flexure with insufficient stirrups were strengthen against shear. In the experimental work, fourteen reinforced concrete beams were tested under monotonic loads. Half of them were for bending and the other half them were for shear and bending. Two of them were simple reinforced concrete beams for comparison purposes. The parameters for bending test were the type of the steel plates (perforated and plain), the type of the bond (with or without epoxy) and the existence of compression plate. The strengthening variables in flexure

specimen repeated in flexure-shear specimen with using same shear precaution technique. The experimental results are compared in terms of strength, ductility, rigidity and energy consumption. Strength increased nearly three times and ductility increased successfully with used strengthening method. Also beams with insufficient stirrups prevent from shear failure.

Science Code : 911.1.145

Keywords : Beam strengthening, strengthening against flexure, strengthening against shear, steel plate bonding, perforated steel plate

Number of pages : 176

**Thesis supervisor : Prof.Dr. Hüsnü CAN
Dr. Sabahattin AYKAÇ**

TEŞEKKÜR

Sıkıntıları olmasına rağmen, beni çalışma boyunca destekleyen, teşvik eden ve bana her zaman hayatın zorluklarına karşı duruşuyla güç veren annem Nazmiye ÖZBEK'e hayatım boyunca teşekkür etsem azdır.

Hayatta kendisine ihtiyacım olduğu her anda beni yalnız bırakmayan babam Cengiz ÖZBEK, yine bu çalışma boyunca manevi desteğinden başka gerektiğinde yapı mekaniği laboratuvarımızdaki çok zor çalışma şartlarımda bana yardım elini uzatmıştır. Babama ne kadar teşekkür etsem yine azdır.

Okuldaki çalışma hayatım boyunca beni destekleyen değerli hocam Prof.Dr.Hüsnü CAN bu tezim boyunca da bana yardım etmiş, beni yönlendirmiştir. Kendisine çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, bu araştırmayı planlayıp yöneten, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve bana her zaman ağabeylik de yapan değerli hocam Dr. Sabahattin AYKAÇ'a teşekkür ederim.

Bence hayatta sahip olunabilecek en değerli hazinedir dostlar. Dostlarım bu çalışmam boyunca da ellerinden gelebilecek hiçbir yardımı esirgememiştir. Soyadı alfabetik sırasına göre saydığım dostlarım Faruk GÖRGÜLÜ, Çelebi MERTOĞLU, Rafet Özgür OCAKLI ve Tolga TOPTAŞ'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Bana çalışmamda önemli katkıları olan değerli çalışma arkadaşlarım Şule Bakırcı ER ve Mahmut Cem YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Laboratuar çalışmalarımın yükünü kaldırmamda bana yardım eden, özveriyle çalışan okulumuzun öğrencilerinden; Volkan DURUMLU, Mustafa KÖKBIYIK, Bahadır BELGE, Ant Gürkan BİÇER, Muhammed Tuğrul İNAL'a teşekkür ederim.

Çalışmada kullanılan delikli saçları titizlikle hazırlayan ve bu konudaki teknik desteklerini esirgemeyen DELSAÇ Delikli Saç San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışmaya 06/2007-58 kodlu proje kapsamında destek veren Gazi Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi oluşturmamda katkısı olan ve adını sayamadığım herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xvi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	4
3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
3.1. Karbon Lifli Kumaşlar Yapıştırılarak Yapılan Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi	6
3.2. Çelik Levha Yapıştırılması ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi	10
3.3. Betonarme ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirmesi	23
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	29
4.1. Deney Programı.....	29
4.2. Deney elemanlarının kalıpları	73
4.3. Deney Elemanları	75
4.4. Malzeme Özellik ve Dayanımları	77
4.5. Çekme levhasının kirişe montajı ve uygulama tekniği	79
4.6. Basınç levhasının kirişe montajı ve uygulama tekniği.....	84

	Sayfa
4.7. Kesmeye karşı güçlendirme uygulama ve tekniği	86
4.5. Deney Düzeni	88
4.5.1. Deney çerçevesi	88
4.5.2. Yükleme düzeni	88
4.5.3. Ölçüm düzeni	90
4.6. Deneyler	93
4.6.1. RB: Tam etriyeli yalın kiriş (Referans kirişi)	94
4.6.2. RS: Eksik etriyeli yalın kiriş (Referans kirişi)	96
4.6.3. S1: Güçlendirilmiş kiriş	98
4.6.4. S2: Güçlendirilmiş kiriş	101
4.6.5. S3: Güçlendirilmiş kiriş	103
4.6.6. S4: Güçlendirilmiş kiriş	106
4.6.7. S5: Güçlendirilmiş kiriş	109
4.6.8. S6: Güçlendirilmiş kiriş	111
4.6.9. S7: Güçlendirilmiş kiriş	114
4.6.10. S8: Güçlendirilmiş kiriş	116
4.6.11. S9: Güçlendirilmiş kiriş	119
4.6.12. S10: Güçlendirilmiş kiriş	122
4.6.13. S11: Güçlendirilmiş kiriş	124
4.6.14. S12: Güçlendirilmiş kiriş	126
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	130
5.1. Genel	130

Sayfa

5.2. Deneylerden Elde Edilen Akma Dayanımlarının Analitik Olarak Hesaplanan Akma Dayanımları ile Karşılaştırılması.....	131
5.3 Taşıma gücü.....	133
5.4. Süneklik	135
5.5. Eğilme Rijitliği	138
5.6. Enerji Tüketimi.....	140
5.7 Deney Elemanları Arasında Karşılaştırma.....	144
5.7.1. Tam etriyeli, düz levhalı S1, S2, S3 ve referans RB elemanları arasında karşılaştırma	144
5.7.2. Eksik etriyeli, düz levhalı S4, S5, S6 ve referans RS elemanları arasında karşılaştırma	146
5.7.3. Düz levhalı S1, S4, S5 elemanları arasında karşılaştırma...	148
5.7.4. Düz levhalı S3, S6 elemanları arasında karşılaştırma	149
5.7.5. Tam etriyeli, delikli levhalı S7, S8, S9 ve referans RB elemanları arasında karşılaştırma	151
5.7.6. Eksik etriyeli, delikli levhalı S10, S11, S12 ve referans RS elemanları arasında karşılaştırma.....	153
5.7.7. Delikli levhalı S7, S10, S11 elemanları arasında karşılaştırma	155
5.7.8. Delikli levhalı S9, S12 elemanları arasında karşılaştırma	156
5.7.9. Düz levhalı S1 ile normalize edilmiş delikli levhalı S7 elemanları arasında karşılaştırma;	158
5.7.10.Düz levhalı S2 ile normalize edilmiş delikli levhalı S8 elemanları arasında karşılaştırma;.....	159
5.7.11.Düz levhalı S3 ile normalize edilmiş delikli levhalı S9 elemanları arasında karşılaştırma;.....	161
5.7.12.Düz levhalı S4 ile normalize edilmiş delikli levhalı S10 elemanları arasında karşılaştırma;.....	162

Sayfa

5.7.13.Düz levhalı S5 ile normalize edilmiş delikli levhalı S11 elemanları arasında karşılaştırma;.....	164
5.7.14.Düz levhalı S6 ile normalize edilmiş delikli levhalı S12 elemanları arasında karşılaştırma;.....	165
5.8. Uysal'ın Çalışmasıyla Karşılaştırma[1]	167
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	170
KAYNAKLAR	174
ÖZGEÇMİŞ.....	176

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri	30
Çizelge 4.2. Beton karışım oran ve miktarları	77
Çizelge 4.3. Yapıştırıcı (epoksi) özellikleri.....	78
Çizelge 5.1. Elemanların hesap ve deneysel akma yükleri	131
Çizelge 5.2. Elemanların deneysel akma ve maksimum yükleri.....	133
Çizelge 5.3. Elemanların süneklik ve göreceli süneklik oranları.....	136
Çizelge 5.4. Deney sonunda 450 cm'lik levhalardaki uzama miktarı.....	137
Çizelge 5.5. Eğilme rijitliği oranları	139
Çizelge 5.6. Toplam enerji oranları	141
Çizelge 5.7. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	145
Çizelge 5.8. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	147
Çizelge 5.9. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	148
Çizelge 5.10. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	149
Çizelge 5.11. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	151
Çizelge 5.12. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	153
Çizelge 5.13. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	155
Çizelge 5.14. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	156
Çizelge 5.15. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	158
Çizelge 5.16. Karşılaştırılan elemanların özellikle.....	159
Çizelge 5.17. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	161
Çizelge 5.18. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	162
Çizelge 5.19. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	164

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.20. Karşılaştırılan elemanların özellikleri.....	165

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri [2]	12
Şekil 3.2. B.B.Adhikary ve arkadaşlarının deney düzeneği [14]	19
Şekil 3.3.B.B.Adhikary ve Mutsuyoshi güçlendirme çalışmaları [15]	21
Şekil 4.1. Delikli çelik levha kesit ve görünüşü (TS 4312- T Dizilişi Tertip 2) 31	
Şekil 4.2. Güçlendirme kirişlerinin uç, yan levhaları detayı	32
Şekil 4.3. Tam etriyeli yalın RB kirişi detayı	35
Şekil 4.4. Eksik etriyeli yalın RS kirişi detayı	36
Şekil 4.5. Tam etriyeli deney elemanı S1	37
Şekil 4.6. S1 elemanı kesitleri	38
Şekil 4.7. S1 kirişi detayları	39
Şekil 4.8. Tam etriyeli deney elemanı S2	40
Şekil 4.9. S2 elemanı kesitleri	41
Şekil 4.10. S2 kirişi detayları	42
Şekil 4.11. Tam etriyeli deney elemanı S3	43
Şekil 4.12. S3 elemanı kesitleri	44
Şekil 4.13. S3 kirişi detayları	45
Şekil 4.14. Eksik etriyeli deney elemanı S4	46
Şekil 4.15. S4 elemanı kesitleri	47
Şekil 4.16. S4 kirişi detayları	48
Şekil 4.17. Eksik etriyeli deney elemanı S5	49
Şekil 4.18. S5 elemanı kesitleri	50
Şekil 4.19. S5 kirişi detayları	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20. Eksik etriyeli deney elemanı S6.....	52
Şekil 4.21. S6 elemanı kesitleri	53
Şekil 4.22. S6 kirişi detayları	54
Şekil 4.23. Tam etriyeli deney elemanı S7	55
Şekil 4.24. S7 elemanı kesitleri	56
Şekil 4.25. S7 kirişi detayları	57
Şekil 4.26. Tam etriyeli deney elemanı S8	58
Şekil 4.27. S8 elemanı kesitleri	59
Şekil 4.28. S8 kirişi detayları	60
Şekil 4.29. Tam etriyeli deney elemanı S9	61
Şekil 4.30. S9 elemanı kesitleri	62
Şekil 4.31. S9 kirişi detayları	63
Şekil 4.32. Eksik etriyeli deney elemanı S10.....	64
Şekil 4.33. S9 elemanı kesitleri	65
Şekil 4.34. S10 kirişi detayları	66
Şekil 4.35. Eksik etriyeli deney elemanı S11.....	67
Şekil 4.36. S11 elemanı kesitleri	68
Şekil 4.37. S11 kirişi detayları	69
Şekil 4.38. Eksik etriyeli deney elemanı S12.....	70
Şekil 4.39. S12 elemanı kesitleri	71
Şekil 4.40. S12 kirişi detayları	72
Şekil 4.41. Çelik kalıp yandan görünüm.....	73
Şekil 4.42. Çelik kalıp önden görünüm.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 4.43. Deney düzeneği	89
Şekil 4.44. Yükleme noktalarının yerleri.....	90
Şekil 4.45. Ölçüm düzeneği a) Ön yüzü b) Arka yüzü.....	93
Şekil 4.46.RB elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	96
Şekil 4.47. RS elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	97
Şekil 4.48. S1 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	100
Şekil 4.49. S2 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	102
Şekil 4.50. S3 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	105
Şekil 4.51. S4 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	108
Şekil 4.52. S5 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	111
Şekil 4.53. S6 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	113
Şekil 4.54. S7 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	116
Şekil 4.55. S8 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	118
Şekil 4.56. S9 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	121
Şekil 4.57. S10 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	124
Şekil 4.58. S11 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	126
Şekil 4.59. S12 elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	129
Şekil 5.1 . Düz levha kullanılan elemanların enerji-deplasman ilişkileri.....	142
Şekil 5.2. Delikli levha kullanılan elemanların enerji-deplasman ilişkileri....	143
Şekil 5.3. RB, S1, S2, S3 elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	144
Şekil 5.4. RS, S4, S5, S6 elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	146
Şekil 5.5. S1, S4, S5 elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	149
Şekil 5.6. S3, S6 elemanları yük-deplasman ilişkileri	150

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. RB, S7, S8, S9 elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	152
Şekil 5.8. RB, S10, S11, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	154
Şekil 5.9. S7, S10, S11, elemanları yük-deplasman ilişkileri.....	156
Şekil 5.10. S9, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri	157
Şekil 5.11. S1, S7 elemanları yük-deplasman ilişkileri	159
Şekil 5.12. S2, S8 elemanları yük-deplasman ilişkileri	160
Şekil 5.13. S3, S9 elemanları yük-deplasman ilişkileri	161
Şekil 5.14. S4, S10 elemanları yük-deplasman ilişkileri	163
Şekil 5.15. S5, S11 elemanları yük-deplasman ilişkileri	165
Şekil 5.16. S6, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri	166
Şekil 5.17. Uysal'ın 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği[1]	168
Şekil 5.18. Uysal'ın 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği[1]	169

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1.Uç yan levhalar işkence ile sabitlenmiştir.....	79
Resim 4.2. 12 mm uç ile betonda ankraj için kılavuz deliklerin açılması	80
Resim 4.3. Çekme levhasının epoksi ile yapıştırıldıktan sonra işkencelerle desteklenmesi	81
Resim 4.4. Epoksinin deliklere enjeksiyonu	82
Resim 4.5.Gijonların kirişe ankrajı	83
Resim 4.6.Gijon başlarının epoksi artıklarından temizlenmesi.....	83
Resim 4.7. Basınç levhası deliklerinin açılması	84
Resim 4.1.Resim 4.8. Basınç levhasını yapıştırmak için sürülen epoksi.....	85
Resim 4.9. Basınç levhasının yapıştırılmış ve desteklenmiş hali	85
Resim 4.10. Kesmeye karşı oluşturulan güçlendirme tekniği	86
Resim 4.11. Kesmeye karşı güçlendirme sisteminin genel görüntüsü	87
Resim 4.1. Resim 4.12.LVDT gijonlarının gireceği hazırlanan yuvalar.	91
Resim 4.13.RB deney elemanı	94
Resim 4.14.RB deney elemanı deney sonunda hasar durumu	95
Resim 4.15.RB elemanı beton ezilme bölgesi.....	95
Resim 4.16. RS elemanı	97
Resim 4.17. RS elemanında görülen çatlaklar	98
Resim 4.18. S1 deney elemanı	99
Resim 4.19. S1 deney elemanı deney sonunda hasar durumu.....	99
Resim 4.20. S2 deney elemanı	102
Resim 4.21. S2 elemanında görülen hasarlar	103

Resim	Sayfa
Resim 4.22 Basınç levhasını tutan bulonlardan biri	103
Resim 4.23. S3 deney elemanı	104
Resim 4.24. S3 elemanında görülen hasarlar	105
Resim 4.25. S4 deney elemanı	107
Resim 4.26.S4 deney elemanı hasarlarının yoğunlaştığı orta bölge	107
Resim 4.27.Çekme levhasında oluşan yay şeklinde deformasyon	108
Resim 4.28. S5 deney elemanı	110
Resim 4.29. S5 deney elemanı hasarları genel görünüm	110
Resim 4.30.S5 deney elemanı ezilme bölgesi, molozlardan temizlenmiş ..	110
Resim 4.31. S6 deney elemanı	112
Resim 4.32. S6 deney elemanı hasarları genel görünüm	113
Resim 4.33. S7 deney elemanı	115
Resim 4.34.S7 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge	115
Resim 4.35.S8 deney elemanı	117
Resim 4.36. S8 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge	118
Resim 4.37. S9 deney elemanı	120
Resim 4.38.S9 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge	120
Resim 4.39.S9 deney elemanında kopan çekme donatıları	121
Resim 4.40.S10 deney elemanı	122
Resim 4.41.S10 deney elemanı levhanın koptuğu bölge	123
Resim 4.42.S10 deney elemanı kopan levha.....	123
Resim 4.43.S11 deney elemanı	125
Resim 4.44.S11 deney elemanındaki kesme kırılması	125

Resim	Sayfa
Resim 4.45. S12 deney elemanı	127
Resim 4.46.S12 deney elemanı hasarları	128
Resim 4.47.S12 deney elemanı kopan çekme donatısı	128

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A_s	Donatı alanı
b_w	Kiriş genişliği
f_{ck}	Beton basınç dayanımı (standart silindir)
f_{yk}	Donatı çeliği akma dayanımı
h	Kirişin yüksekliği
l	Kiriş boyu
l_t	Levha boyu
δ_u	En büyük yükün %15 azaldığı noktadaki deplasman
δ_y	Akma anındaki deplasman değeri
$\emptyset$	Donatı çeliği çapı
ρ	Donatı oranı
σ	Gerilme
σ_c	Beton basınç gerilmesi
d'	Basınç donatısının üst yüze mesafesi
d	Çekme donatısının üst yüze mesafesi
As_1	Basınç donatısı alanı
As_2	Çekme donatısı alanı
As_L	Delikli levha metalik alanı
P_y	Akma yükü
P_u	Maksimum yük

Kısaltmalar	Açıklama
FRP	Fiber takviyeli polimer
GFRP	Cam-fiber takviyeli polimer
CFRP	Karbon-fiber takviyeli polimer
BS	İngiliz Standardı
LVDT	Elektronik deplasman ölçerler
SMA	Akıllı metal

1. GİRİŞ

Hasarsız yapı elemanlarının, dayanımının ve davranışının iyileştirilmesi güçlendirme başlığı altına girmektedir. Betonarme yapılarda, kullanım amacı değişikliğinden veya değişen çevresel şartlardan dolayı ek yükler ve ek zorlanmalar oluşabilmekte ya da kullanımdan önce veya sonra yapıda yetersizlikler tespit edilebilmektedir. Bu durumlarda yapının ve/veya yapı elemanlarının güçlendirilmesi gerekebilmektedir. Bundan dolayı betonarme yapı elemanlarda yatay taşıyıcı olarak bilinen kirişleri güçlendirme gereksinimi doğabilmektedir. Her güçlendirme tekniği avantajları ve dezavantajları içinde barındırdığı için betonarme kirişlerin güçlendirilmesi ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışmaların çokluğu uygulamada da çeşitliliği beraberinde getirmiştir.

Sıkça kullanılan yöntemlere örnekler verecek olursak;

Bu yöntemlerden biri katman ekleme yöntemidir. Bu yöntemde kirişin alt ve/veya üst yüzüne içinde boyuna donatı bulunan yeni bir betonarme katman eklenir. Yeni boyuna donatılar eski donatılara 'U' ve 'Z' şeklindeki donatılar ile kaynaklanır. Yöntem hem güçlendirme açısından hem de sünek kırılmayı sağlaması yönünden başarılı olmakla beraber uygulaması oldukça zordur. Özellikle donatıların kirişlerdeki mevcut donatılara kaynaklanması ve yerleştirilen betonun sıkıştırılması uygulamadaki zorluğun esas nedenleridir. İşçiliğin kalitesi uygulamanın başarısını doğrudan etkilemekte olup özen gösterilmesi gereken bir noktadır[1].

Kirişlerin onarım/güçlendirilmesi için kullanılan diğer bir yaygın yöntem de kiriş yüzlerine karbon-lif kumaşlar yapıştırılarak yapılan iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemde de genellikle hedeflenen dayanımlara ulaşılmasına rağmen yeterli bir süneklik elde edilemediği ve elemanların gevrek bir şekilde kırıldığı görülmüştür. Bilindiği gibi karbon lifli kumaşlar oldukça pahalı olup, ülkemize

yurt dışından ithal edilmektedir. Bu sakıncalarına rağmen ülkemizde özellikle son dönemlerde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır[1].

Güçlendirme metodu olarak kullanılan yöntemlerden biri de kirişe çelik plakalar yapıştırılması yöntemidir. Bu yöntemde çelik plakalar kiriş yüzlerine epoksi bazlı yapıştırıcılar ile yapıştırılmaktadır. Levhaların sıyrılmasını önlemek için bazen bulon, kaynak gibi ek önlemlere de başvurulmaktadır. Yöntem, dayanım bakımından olumlu sonuçlar vermektedir. Karbon liflerle yapılan güçlendirmelere göre daha sünek davranmasına rağmen bu yöntemlerde de yeterli bir süneklik elde edilememiştir [1]. Bu çalışmaya ek olarak, başka bir çalışmada delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arası yük aktarımı üzerindeki etkisi, çelik levha alanı ve yapıştırma yöntemi parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiş ve delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin iyi bir davranış sergilediği görülmüştür[1].

Kullanılan malzemenin (çelik levhaların) sünek, nispeten ucuz, yerli üretim, kolay bulunabilir, işlenebilir ve uygulanabilir olması; ayrıca daha önce bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda umut vaat eden sonuçların alınması bu yöntemi yenileme, geliştirme gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle bu çalışmada, sıkça tercih edilen bu güçlendirme yönteminin daha sünek bir hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için eğilme zorlanmasına karşı kirişlerin güçlendirilmesinde düz ve delikli çelik levhalar ana değişken olarak ele alınıp basınç levhası koyma ve epoksi ile yapıştırma uygulamaları ile ara değişkenler oluşturulmuştur. Delikli çelik levhalardaki dairesel deliklerin ovalleşerek, düz saça göre daha fazla deformasyon yapabileceği dolayısıyla daha sünek davranabileceği düşünülmektedir. Elemana delikli levha yapıştırıldığında yapıştırıcı olarak kullandığımız epoksi deliklere sızıp katılaşarak aynı zamanda bir fiziksel aderans sağlamaktadır. Bu durum hemen yapışma sonrasında yapışma kalitesini ölçme açısından güvenilir bir fikir vermektedir.

İster delikli ister düz levha olsun sadece epoksi ile yapıştırımayla kirişin istenen süneklik seviyesine ulaştırılamayacağı kanaatine önceden yapılan çalışmaların sonuçlarından varılmıştır. Bu çalışmada bunun için kirişlerin alt yüzüne yapıştırılan çelik levhalar, uçlarından kiriş yan gövdesine çelik plakalar yardımı ile bulonlanmıştır. Bu plakalardaki bulonlama düzeninin kiriş uçlarında genelde maksimum olan kesme kuvvetine karşı da dayanım göstermesi öngörülmektedir. Kiriş alt yüzüne bulonlama fikrinden boyuna donatıları uygulamalarda kesme tehlikesi oluşturduğu için vazgeçilmiştir.

Betonarme kirişler eğilme zorlanmasından başka mutlaka kesme zorlanmasının etkisi altındadır. Kiriş eğilme dayanımından önce kesme dayanımına ulaşırsa eleman kesmeden dolayı göçecektir. Kesme göçmesi ise her şartta gevrek kırılma olup süneklikten çok uzaktır. Kirişleri eğilmeye karşı güçlendirdiğimizde mutlaka yeni eğilme dayanımı kirişin kesme dayanımı ile karşılaştırmalıyız. Yani kirişi eğilmeye karşı güçlendirdiğimizde kiriş aslında tehlikeli olan kesmeden göçme karakterine geçmiş olabilir. Bu durumda kirişi aynı zamanda kesmeye karşıda güçlendirmek gerekecektir.

Çalışmada ikisi referans, on ikisi güçlendirilmiş olmak üzere on dört deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Altı deney numunesi sadece eğilmeye diğer altı deney numunesi ise kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Eğilme elemanlarında değişkenler levha tipi (delikli, düz), yapıştırıcı (epoksili, epoksisiz), basınç levhası (var, yok) şeklindedir. Kesme ve eğilme elemanlarında ise kesmeye karşı güçlendirme sabit tutulmuş eğilme elemanlarındaki değişkenler yinelenmiştir. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiştir. Karbon liflerle yapılan güçlendirmeye nazaran çelik levhalarla güçlendirmenin daha sünek davranış gösterdiği bilinmekle birlikte bu çalışmada çelik plakların karbon liflerle sistematik bir karşılaştırılması yapılmamıştır.

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Betonarme bir yapı elemanını güçlendirme çalışmalarında gözetilen amacımız elemanın dayanım ve davranışını teoride hesaplanan ve öngörülen kadar iyileştirmektir. Demek ki betonarme elemanlarda aranan olmazsa olmaz koşullar olan yeterli dayanım ve süneklik güçlendirilmiş betonarme elemanlarda da sağlanmalıdır.

Çelik plakalarla betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi günümüze kadar birçok deneysel çalışmaya konu olmuştur. Bu süreçte öngörülen dayanıma ulaşılmış ancak beklenen süneklik düzeyine ulaşılamamıştır [2].

Eğilme momenti ile kesme kuvvetinin matematiksel açıdan ifade edilmiş formülleri birbirine doğru orantılı bağımlıdır. Bir başka deyişle eğilme momentinin sabit olmadığı her yerde kesme zorlanması mevcuttur. Kesme kırılması ise her koşulda gevrek kırılmadır ve süneklikten çok uzaktır. Betonarme kirişin sadece eğilme kapasitesini attırdığımızda kesme kapasitesi sabit kalacağından artık kirişin öngörülen yükleme altında kesme kırılmasından göçme riski vardır. Bu nedenle kirişlere eğilme zorlanmasına karşı yapılacak güçlendirme beraberinde kesme kuvvetine karşı güçlendirmeyi getirebilir. Sonuçta kesme ve eğilmeye karşı güçlendirme birlikte de düşünülmesi gereken bir konudur.

Süneklik, kesme-eğilmeye karşı güçlendirme konusundaki bu açığın giderilmesi amacıyla gerçekte de uygulaması mümkün ve kolay teknikler düşünülmüş ve bunlar on iki tablalı betonarme kiriş üzerinde uygulanarak test edilmiştir.

Çalışma kapsamında;

- a) Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arasındaki yük aktarımına etkisi,
- b) Delikli ve deliksiz çelik levha kullanımı,
- c) Kiriş yan yüz uçlarındaki ankraj bulonlarının ve levhaların etkinliği,
- d) Tam etriyeli kirişlerin eğilme zorlanmasına karşı güçlendirilmesi ve eksik etriyeli kirişlerin eğilme-kesme zorlanmalarına karşı birlikte güçlendirilmesi,
- e) Epoksi yapıştırıcı kullanılmaksızın çelik levhalarla güçlendirme,
- f) Kesme güçlendirilmesinde kullanılan saplamalardaki art germe, araştırma konuları olmuş, bunlarla ilgili bazı parametreler değiştirilerek sistematik bir çalışma yapılmıştır
- g) Basınç levhasının etkinliği

Çalışmada elde edilen deney elemanı davranışları daha önce yapılmış olan deliksiz ve delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş örneklerin davranışlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca eğilme ve eğilme-kesmeye karşı güçlendirilen kirişler kendi aralarında değerlendirilmiş, karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar araştırmacıların/uygulamacıların kullanımına önerilerle birlikte sunulmuştur.

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar dört grupta değerlendirilebilir. Bunlar;

1. Karbon lifli kumaşlar yapıştırılarak yapılan iyileştirme çalışmaları,
2. Çelik levha yapıştırılması ile kiriş onarımı ve güçlendirmesiyle ilgili çalışmalar,
3. Betonarme katman ekleme yolu ile kiriş onarımı ve güçlendirmesiyle ilgili çalışmalar,
4. Deneysel bir araştırmaya dayanmayan uygulama niteliğindeki çalışmalardır.

Bu konularda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

3.1. Karbon Lifli Kumaşlar Yapıştırılarak Yapılan Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi

Li, John ve Maricherla 2006 yılı içerisinde yaptıkları çalışmada kirişlerde daha büyük ara yüz kesme kuvveti elde etmek için yeni bir hibrit sargılama yöntemi geliştirmişlerdir. Oluşturulan bu hibrit kompoze tüp, ortası beton, betonun etrafı ince bir fiber güçlendirilmiş polimer (FRP) tabaka ve etrafında hazırlanan ve deney gruplarına göre çeşitlilik gösteren çelik levhadan oluşmaktadır[3].

Uzunluğu 559 mm, yüksekliği ve genişliği 101 mm olan değişken sayıda delikli çelik yüzlerden oluşan 15 adet kare kesitli kiriş numuneleri hazırlanmış delikli çelik levhaların, beton kirişlerin yapısal davranışını nasıl etkilediğini anlamak için 5 gruba ayrılmıştır. Yalnızca alt yüzü delikli, hem alt hem de üst yüzü delikli, hem alt hem de iki yan yüzü delikli, tüm yüzü delikli ve tüm yan

yüzeyleri deliksiz bütün halinde çelik katmanlarla sarılmış olan bütün test gruplarının içleri betonla doldurulup “4 noktalı eğilme testi” uygulanmıştır [2]. Testler sonucunda aynı eksenli basınç kuvvetine maruz kaldığında delikli kesitli tüplerle kaplı beton numunelerin deliksiz olanlara oranla daha yüksek sünekliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin delikli tüplerle sarılı kirişlerdeki basınç bölgelerinde betonun 3 boyutlu basınç gerilimi yaratması olduğu belirtilmiştir. Delikli sistemler, FRP tabakasının yük taşıma kapasitesinden tam olarak faydalanılırken deliksiz olan örneklerde bu gözlemlenmemiştir. Delikli sistem test örnekleri tipik bir sünek kırılma gösterirken, deliksiz test örnekleri aşırı kuvvetlendirilmesinden ve basınç alanına betonun tek boyutlu basınç gerilimi uygulamasından dolayı gevrek kırılma göstermiştir [3].

Wang, 2002 yılında T kesitli betonarme kirişlerin donatı azaltılması sonrası sismik performansı üzerine analitik ve deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, beton diyagonal çatlaklarının açısının tahmin edilmesi için geleneksel betonarme kesit analizi ve değişken açılı kafes kiriş modelini kullanan sismik değerlendirme modeli; boylamasına donatı azalması sonrası kirişlerin sismik performansını ölçmeye yarayan basit bir model olarak oluşturulmuştur. Değerlendirme modelinin tahmin edilmesi ve mevcut yapı çerçevelerinin buna nasıl karşılık verdiğinin incelenmesi için bir ön hazırlık test programı uygulanmıştır[4].

Analitik ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki; ACI 318–71 gibi eski kodlara göre tasarlanan donatıları kesilmiş betonarme kirişlerin zayıf yönleri bulunmaktadır ve bir şekilde iyileştirmeye gereksinim duyarlar. Fiber güçlendirilmiş plastik (Fiber Reinforced Plastic, FRP) plakalarının varlığı, bu dezavantajları başarılı bir şekilde düzeltmekte ve deprem esnasında maruz kalması beklenen performanstan daha yüksek değerler elde edilmektedir [4].

M.S.Muhammed Ali ve arkadaşları, betonarme kirişlerde kullanılan fiber takviyeli polimer (FRP) plakalar ile çelik plakaların karşılaştırılmasını

yapmışlardır. Kiriş ve döşeme yüzeylerinin dayanımlarını ve rijitliklerini arttırmak için çelik plakalar bağlanmakta, ancak bu plakalar tasarım kuvvetine ulaşmadan önce orijinal kirişten kopabilmektedir. Sıyrılma hareketinden dolayı ortaya çıkan aderans kuvvet azalması plakanın sonuna yakın bölgede gerilmelerin toplanmasından kaynaklanmaktadır[5].

Basit mesnetli kirişlerin mesnedinde ya da mütemadi kiriş momentinin sıfıra yaklaştığı noktalarda plakaların maruz kaldığı aderans kuvvet kaybını belirlemek için çekme ve basınç yüzlerine yapıştırılan plakalar, kenar plakaları, 'U' şeklinde plakalar ve açılı yapıştırılmış plakalar kullanılmıştır. Bu çelik plakaları kullanarak yapılan testler kesme kuvveti sıyrılmasının kritik diyagonal çatlak oluşturduğunda meydana geldiğini ve bu kritik diyagonal çatlakların etriye miktarından bağımsız oluştuğunu göstermiştir. Alt sınır yaklaşımı için etriyesiz betonarme kirişlerin kesme kuvveti; kesme kuvveti olarak kabul edilmiştir. Kirişlerin çekme yüzlerine ya da kenarlarına bağlanan farklı plaka elemanları üzerinde yapılan testler, çelik plakalı kirişler ve FRP plakalı kirişler için eğilme sıyrılma mekanizmasının aynı olduğunu göstermiştir. Çelik plakalı kirişlerin sıyrılma direncinden FRP plakaların eğilme sıyrılma direncinin hesaplanması için kesin olmayan bir bağlantı kurulmuştur [5].

Li H. Ve arkadaşları CFRP kaplama ile güçlendirilmiş betonarme kirişi geçici olarak SMA (akıllı metal) kablolarıyla güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma şöyle özetlenmiştir. Karbon-fiber polimer sargı ile yapılan güçlendirmenin betonarme yapıların dayanımını artırdığı ispatlanmıştır. Ancak servis yükleri altında betonarme yapılarda oluşan deformasyonlar karbon fiberin (CFRP) dayanıma kattığı etkisini azaltmaktadır. Son yıllarda, SMA'nın ısıtıldığında iyileştirici basınç geliştirme kapasitesi olduğundan, SMA'nın kullanımına ilgi gittikçe artmaktadır. SMA, iyileştirici etkisinden dolayı deformasyonların ve betondaki çatlakların azaltılması için kullanılabilir. Ancak SMA kablolarının iyileştirici etkisinin ortaya çıkması için sürekli olarak ısıtılmaları gerektiğinden bu teknik

acil durumdaki hasarların onarımı için kullanılmalıdır. 2 yöntemin de kusurlarının üstesinden gelmek için bu çalışmada betonarme yapıların güçlendirilmesi için karbon fiber ve SMA kablolarının birlikte kullanıldığı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin güçlendirmedeki etkisi basit betonarme kiriş elemanı üzerinde deneysel olarak araştırılmıştır. Test sonuçları SMA kablolarının kirişteki deplasmanları ve betondaki çatlakları azalttığını göstermiştir. Elemana konulan SMA kabloları miktarı artırıldıkça kirişteki artık deformasyonlar da azalmaktadır. Ana çelik donatılar artık deformasyondaki azalmayı engellemektedirler. Karbon fiber kumaş (CFRP) ile güçlendirilmiş olan test elemanlarında, SMA kabloları devreye girip de artık deformasyonları azalttığında kiriş rijitliği oldukça büyük olmaktadır. Bunlara ilave olarak bu çalışma SMA kablolarının elektrik direncindeki değişim oranı ile deney elemanının orta açıklığının yaptığı sehim arasında yapılarıdaki hasar tespitinde ve deformasyonları belirleyebilmede kullanılabilecek doğrusal bir ilişki olduğunu da göstermektedir[6].

Do-Young Moon ve arkadaşları, Harç tabakasıyla yerleştirilen CFRP çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişler ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Düşünceleri ve irdellemeleri şöyle özetlenebilir. Beton yapılar için güçlendirme malzemeleri ve yöntemleri ile ilgili son zamanlarda yapılan çoğu çalışmada sadece dıştan plaka yapıştırmaya odaklanılmıştır. Fiber polimer güçlendirme çubukları nadir olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmada çubuk tipi karbon fiber polimer ve yüksek dayanımlı harç örtüsü ile güçlendirilmiş kirişler test edilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerle güçlendirilmemiş kirişler karşılaştırılmıştır. Güçlendirilmiş kirişler güçlendirilmemiş kirişlere göre dayanım, yük taşıma kapasitesi, rijitlik değeri ve kiriş çatlama yükü bakımından daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerden tüm açıklık boyunca cıvatalarla ankrajlanan kirişler sadece giriş gövde sonuna cıvata ankraj yapılan kirişlere göre daha iyi ve daha etkili bir yapısal davranış göstermişlerdir[7].

3.2. Çelik Levha Yapıştırılması ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi

Mehmet Arslan, eğilme altındaki betonarme kirişlerin taşıma güçlerinin, epoksi ile çelik levha yapıştırarak onarım ve güçlendirilmesini amaçlayan deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dokuz tane orta ölçekli (150x250x2800 mm) betonarme kiriş monotonik yük altında denenmiştir. Bu kirişlerden altı tanesi epoksi ile yapıştırılmış çelik levhalarla güçlendirilmiş, iki tanesi hasara uğratıldıktan sonra aynı yöntemle onarılmış, dokuzuncusu ise yalın kiriş olarak denenmiş ve karşılaştırma elemanı olarak kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı; bu yöntemin katman ekleme yöntemine kıyasla etkinliğini, güçlendirmede kullanılan levha kalınlığı ve uzunluğunun davranış ve dayanımına olan etkilerini, levha uçlarının başta, kaynaklanmış ve uç başlığı ile yerinde tutulmuş hallerinin durumunu, uygulama türünün (yüksüz güçlendirme, yüksüz onarım ve yük altında onarım) etkisini incelemektir [2].

Çalışmada, simetrik yerleştirilmiş eşit iki tekil yük altında deneneni kirişler 150x250 mm dikdörtgen kesitli olup, sonradan 2x150 mm kesitli ya da 4x150 mm kesitli çelik levhalarla güçlendirilmiş ve yüksüz olarak ya da yük altında onarılmıştır. Denenen dokuz kirişin tümünde 2 ϕ 14 ($A_s=308 \text{ mm}^2$) çekme donatısı, 2 ϕ 10 ($A_s=157 \text{ mm}^2$) montaj donatısı ve ϕ 2x150 mm ($A_s=300 \text{ mm}^2$) ya da ϕ 4x150 mm ($A_s=600 \text{ mm}^2$) güçlendirme levhası kullanılmıştır. Dokuz deney elemanından biri, güçlendirme ve onarımın davranış ve dayanım üzerindeki etkisini araştırmak için yalın kiriş (referans kirişi) olarak düzenlenmiş olup diğer kirişler;

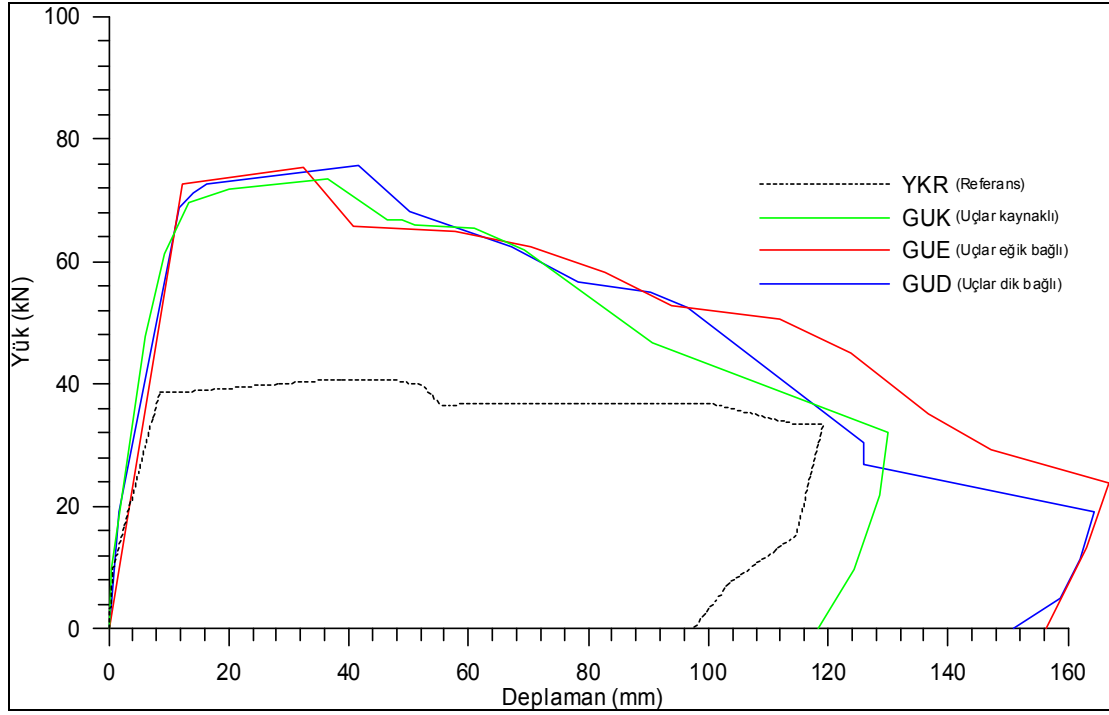
- Güçlendirme levhası uygulaması (yalın kirişe göre),
- Güçlendirme levha uzunluğu (uzun ya da kısa levha ile güçlendirme),
- Güçlendirme levhası ucunun durumu (boşta, kaynaklı, ya da dik ve eğik başlıklı),
- Güçlendirme levhası kalınlığı (ince ya da kalın levha kullanılması),

e) Yüksüz onarım (kiriş yükleri askıya alınarak yapıştırma işleminin yapılması),

f) Yüklü onarım (kiriş, yük altında iken yapıştırma işleminin yapılması), değişkenlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş ve yalın kiriş (referans kirişi) ile ve de birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [2].

Çalışmada kullanılan elemanların isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

YK (R)	: Yalın kiriş (referans kirişi)
GKB	: Levha kısa ve ince, yüksüz, başlıksız
GUB	: Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıksız (güçlendirilmiş)
GUK	: Levha uzun ve ince, yüksüz, kaynaklı (güçlendirilmiş)
GUE	: Levha uzun ve ince, yüksüz, eğik başlıklı (güçlendirilmiş)
GUD	: Levha uzun ve ince, yüksüz, dik başlıklı (güçlendirilmiş)
GU'D	: Levha uzun ve kalın, yüksüz, başlıklı (güçlendirilmiş)
OD	: Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıklı (onarılmış)
O'UD	: Levha uzun ve ince, yüklü, başlıklı (onarılmış)



Şekil 3.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri [2]

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemi ile betonarme kirişin onarım ve güçlendirilmesi başarıyla yapılabilmektedir.
- Kısa levha boyu ile yapılan güçlendirmelerin yetersiz; uzun levha boyu ile yapılan güçlendirmelerin nispeten başarılı ancak tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmiştir.
- Plaka uçlarının mutlaka tutturulması gerekmektedir.
- Güçlendirme levhalarının iki ucu eski donatıya kaynaklandığında, ya da başlıklar yardımıyla tutturulduğunda güçlendirme de ve yüksüz onarımda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak yük altında yapılan onarımlar başarılı sonuçlar vermemiştir.
- Yapılan işlemlerde işçilik büyük önem taşımaktadır. Kötü işçilikle yapılan işlemlerin gevrek kırılmalara yol açtığı belirlenmiştir.
- Levha kalınlığının artırılmasının istenilen dayanımı sağlayabileceği düşünülmemelidir. Levhayı aşırı kalınlaştırma, dayanımı amaçlanan düzeyde arttırmamanın yanı sıra tehlikeli davranışa yol açmaktadır.

g) İyi düzenlenmiş, boyu yeterince uzun, uçları sağlıklı biçimde yerinde tutulmuş (yapıştırma işçiliği özenle ve kusursuz biçimde gerçekleştirilmiş) plakalarla yapılan yüksüz onarımda ve güçlendirmede amaçlanan dayanım sağlanabilmekte (yani levha akıtılabilmekte) ancak akma ötesi davranışın betonarme kirişteki kadar iyi olması sağlanamamaktadır. Yukarıda sayılan başarılı kirişlerin tümünde kısa bir platodan ($\approx 2-2,5d_y$ kadar) sonra hızlı bir dayanım eksilmesi gözlemlenmiştir. Dayanım yaklaşık $3,5-4d_y$ kadar deplasmanda %80–85 düzeyine düşmektedir.

h) İyi düzenlenmiş ve iyi yapıştırılmış levha çok iyi çatlak kontrolü yapmaktadır. Çok sayıda ve genişliği az çatlak oluşmaktadır. Bu nedenle eğrilerde çatlama nedeniyle oluşan belirgin bir eğim değişimi (çatlama köşesi) görülmemektedir.

i) Çelik levhalar korozyona karşı çok iyi korunmalıdır. Ayrıca yangın durumunda, gerek levha çeliğinin erimesi gerek epoksinin özelliğini kaybetmesi bakımından önemli risk bulunmaktadır [2].

Ali Uysalın, eğilme zorlanmasına karşı betonarme kirişlere delikli çelik levha yapıştırarak güçlendirilmesini amaçlayan deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada birisi referans, sekizi güçlendirilmiş olmak üzere dokuz deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Çalışmada, delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arası yük aktarımı üzerindeki etkisi, çelik levha alanı ve yapıştırma yöntemi parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiş ve delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin iyi bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu çalışmayla ilgili daha detaylı bilgiler Bölüm 5 de sunulmuş ve bir karşılaştırma da yapılmıştır [1].

Cengiz Gülenler'in çalışması, betonarme kirişlerin yapıştırılmış çelik levhalarla onarımını, bu şekilde elde edilen kompozit malzemelerin dayanım ve davranışlarını ve Türkiye'de var olan polimer yapıştırıcıların kullanılabilirliğini incelemek üzere yapılan deneysel bir çalışmadır [8].

200x300 mm kesitli 4 m uzunluğunda dört adet deney elemanı eşit mesafelerle iki tekil çatlak oluşana kadar yüklenmiştir. Daha sonra iki tanesi farklı polimer yapıştırıcı kullanarak çelik levhalarla takviye edilmiştir. Deney elemanlarının bir tanesinde “özel plastik çelik, special no.1” adlı polimer yapıştırıcı, diğerinde ise CIBA-GEIGY firmasının ürünlerinden “Ep-No” adlı yapıştırıcı kullanılmıştır[8].

Çalışmada yapıştırıcıların nitelikleri de deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre çelik levhaların tamamen yapıştırılması yerine kısmen yapıştırılması yeterli olmuş, güçlendirilmiş kirişlerden “special no.1” ile yapıştırılan deney modeli çelik levhanın akması ile, “Ep-No” ile yapıştırılan deney modeli ise yapıştırıcı yetersizliği nedeniyle kırılmıştır. Yük altında deformasyon durumlarına göre “special no.1” sünek, “Ep-No” ise gevrek davranış göstermektedir. Bu tür yöntemle, onarılan çatlamış kirişler eski rijitliğine getirilebilmektedir. Ayrıca, onarılan kirişin normal betonarme kiriş gibi davrandığı ve klasik hesaplarla boyutlandırma yapılabileceği görülmüştür [8,2]. Ancak bu çalışmada onarım levhasının kiriş mesnetlerinin içine kadar uzatılmış olması gerçek uygulamaya uygun değildir ve sonuçlar tartışmaya açıktır [2].

J.Alfaite ve J.Appleton hasar görmüş betonarme kirişlerin epoksi ile çelik levha yapıştırılarak onarılmasının sonuçlarını araştırmışlardır. Çalışmada onarım öncesi kirişin hasar derecesi, dış donatı olan çelik levhanın sadece epoksi ile yapıştırılması veya çelik levhanın epoksi ile yapıştırılmasından sonra metal çubuklar ile kirişe tespit edilmesi ve çatlak onarımının genel davranışa etkileri parametreleri ele alınmıştır [9].

Onaltı adet deney modeli kullanılmış, deney modelleri, mesnetlere ve birbirlerine eşit mesafede iki eşit tekil yük uygulanarak denenmiştir [2].

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, onarılmış kirişin taşıma gücünün normal kirişin taşıma gücüne ulaşmış olduğu tespit

edilmiştir. Çatlakların kontrol altında tutulması ve kirişin kullanılabilirliği açısından onarılan kirişin daha iyi bir davranış gösterdiği görülmüştür. Düşük dayanıma sahip çelik levha kullanılması durumunda, çelik levha yapıştırılarak onarılan kirişin taşıma gücünün, normal kirişlerde kullanılan yöntemle hesaplanabileceği belirlenmiştir. Kiriş modellerinin ikisinde farklı kırılma mekanizması oluşmuş, çelik levha bu modellerde betondan sıyrılmıştır. Bundan dolayı epoksiyle yapıştırılan çelik levhanın uçlarından, metal çubuklar ile kirişe tespit edilmesi uygundur. Ancak bu durumda, kullanılacak metalin boyutları ve yerleşim düzeni problemi oluşmaktadır. Bu sorun çözülürse bu uygulama emniyetli bulunmaktadır [9,2].

R.A.Barnes ve G.C.Mays, çalışmalarında kesme kuvveti bakımından yetersiz olan betonarme kirişlerin, bağ yapılı çelik elemanların değişik şekillerde düzenlenmesiyle güçlendirilmesini incelemişlerdir. Buradaki amaç, bütün güçlendirilmiş test örnekleri için esnek kopma noktası elde etmektir. Test edilen kirişlerdeki sonuçlar, kontrol test örneğinkilerle karşılaştırılmıştır. Güçlendirme için kullanılan çelik plakların tiplerinin ve düzeninin, test örneklerinin davranışı, mukavemeti, rijitliği, sünekliği ve kopma noktası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır [10].

Elde edilen bulgulara göre bütün test örneklerinde ilk çatlama, her zaman kirişteki maksimum eğilme momentinin olduğu bölgede esnek çatlak olarak meydana gelmekte ve bütün dıştan bağlı çelik eleman tipleri kirişin mukavemetini, rijitliğini ve sünekliğini arttırmaktadır. Esnek kopma noktasına kadar kuvvetlendirilen test örneklerinin, kontrol test örneğiyle aynı davranışı göstermekte olduğu belirlenmiştir. Çelik elemanın tipi ve kiriş üzerindeki düzeni süneklik davranışını yönlendiren ve kopma noktası modülünü belirleyen etkili parametrelerden biri olarak gözlemlenmiştir. Çelik şeritler arasındaki boşluk azaldıkça, yer değiştirme-süneklik oranı artmış, kesme açıklığı üzerindeki bağ alanındaki artışı, belirgin olarak kesme çatlaklarının çoğalmasını azaltmıştır. "L" tipi çelik şeritlerle güçlendirilen test örnekleri tüm

örnekler arasında en düşük süneklik oranına sahip örnekler olarak karşımıza çıkmaktadır [10].

M. Raoof ve arkadaşları teorik parametrik çalışmalar kullanarak beton küpünün kuvveti, gömülü ana çelik çubukların boyutunun ve tasarım parametrelerinin nihai plaka ayrılma momenti büyüklüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dıştan çelik plakalarla güçlendirilmiş betonarme kiriş ve döşemeler BS 8110 İngiliz standardı nihai sınır durumlarını temel alan süneklik hesabı için tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; beklenmedik plaka ayrılması kopması, beton kaplama tabakasındaki eğilme çatlaklarının arasındaki boşluklarla kontrol edilebilmektedir. Pratikte nihai plaka ayrılma yükü için tek bir çözüm bulunmadığı ve alt-üst sınır yaklaşımları yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu duruma göre; yüksek beton sınıfından yapılmış kirişlerin, dıştan bağlanan plakalarla güçlendirmede daha uygun olduğu gözlemlenmiş, plaka genişliğinin kiriş genişliği ile aynı olması gereken durumlarda, kiriş genişliği arttıkça nihai plaka ayrılma momentinin de arttığı belirlenmiştir. Gömülü çekme donatısının alanının değiştirmeden, birkaç donatının birden fazla tabakada düzenlenmesi nihai plaka ayrılma momentini arttırmakta, kirişe oranla dış plakanın genişliğinin artırılması ya da plaka kalınlığının genişliğinin sabit tutularak artırılması nihai ayrılma momentini azaltmaktadır. Plaka alanının değişmediği durumlarda, kritik olan değişken ise plaka genişliğinin plaka kalınlığına oranı olmaktadır. Ayrıca elde edilen bulgular göstermiştir ki; önceden tahmin edilemeyen kırılma plaka ayrılması karşısında önlem alınmazsa nihai plaka ayrılma momenti plakalandırılmamış betonarme kirişin nihai kopma momentinden bile düşük olabilmektedir [11].

Charles K. Kankam uç plakayla civatalanmış betonarme kirişlerin yapısal davranışını incelemiştir. Çalışmasında betonda basınç gerilmeleri oluşturacak uç civatalama ile düzenlenmiş betonarme kirişlerin yapısal potansiyelinin ölçümü hedeflenmiştir. Kirişlerin esneklik kuvveti, çatlak oluşumu, gelişimi ve sehim karakteristik özellikleri incelenmiştir [12].

Deney sisteminde betonun düşük çekme kapasitesinden dolayı oluşacak çatlakları önlemek ya da kontrol etmek ve çatlak genişliklerini azaltmak için, ön yükleme yapılmış beton yapılarda gerilmiş çelik kablolar ya da tendonlar kullanılarak betonda iç basınç gerilmeleri oluşturulmuştur. Başlangıçtaki kesme gerilimi kritik orta açıklıktaki ve destek noktalarındaki çekme gerilmelerini önleyerek ya da azaltarak çatlak oluşumunu önlemekte ve bu sayede yapının eğilme, kesme ve bükülme kapasitelerini arttırmaktadır. Bu sayede kesitler, elastik olarak davranabilmekte ve betonun tüm kesiti boyunca basınçta tam kapasiteye ulaşılmaktadır. Bu da yapıların yükleme kapasitesinin artırılmasında daha küçük ve daha hafif elemanların kullanılmasını sağlayacak, daha yüksek çekmeye sahip çelik ve daha kuvvetli betona ulaşılmasını destekleyecektir [12].

Çalışmada 125x150 mm kesitinde ve 1800 mm uzunluğunda kirişler kullanılmıştır. Beton 28 gün sonunda yeterli kuvvete ulaştığında, kirişler düz yataklar üzerine yerleştirilmiştir. Kirişlerin orta açıklığında sabit bir momente neden olacak simetrik iki noktasal yük uygulanmıştır. Kirişlerden 4 tanesi 20 adet yükleme döngüsüne; 6 tanesi ise monoton yüklemeye maruz bırakılmıştır [12].

Bütün yükleme tiplerinde çatlaklar ve sehimler gözlenmiştir. Basınç gerilmelerine maruz bırakılmış betonarme kirişlerdeki esneklik kuvveti, sehim ve çatlak oluşum değerleri incelenmiş, ön yükleme yapılmamış benzer kiriş kesitlerine oranla, ön yükleme yapılmış kiriş kesitlerinin yük taşıma kapasitelerinde % 240'a varan artışların olduğu gözlemlenmiştir. Ön yüklemenin bir sonucu olarak, çatlama yükleri de aynı zamanda yaklaşık % 280 oranında artmıştır. Bu tekniğin yapısal elemanların yeniden düzenlenmesi ve kısa açıklıklı prefabrik yapı elemanlarında da uygulanabilir bir teknik olduğu belirtilmiştir [12].

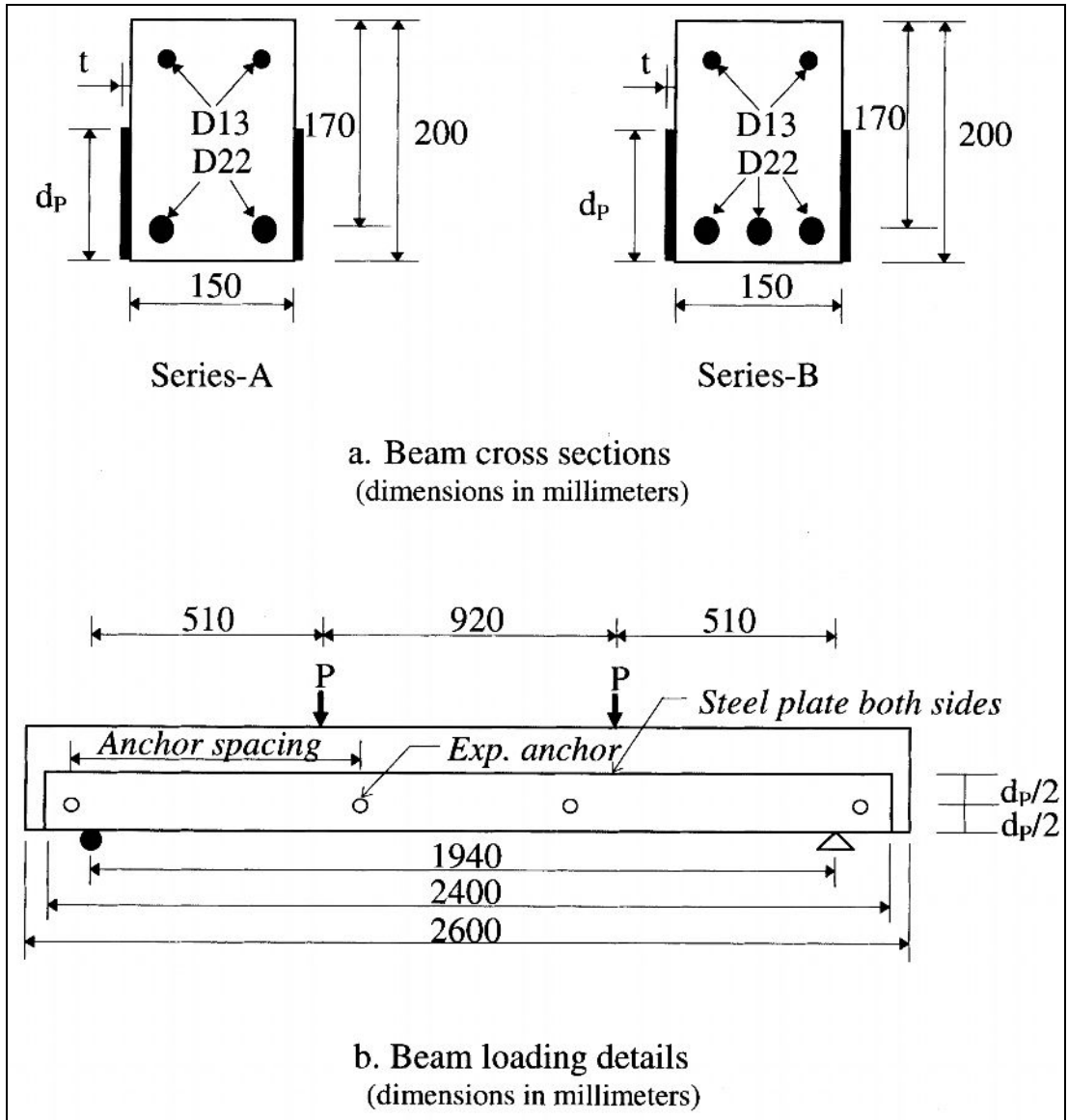
Sinan Altın ve arkadaşları çelik plakaların dış bağlarını kullanarak mevcut betonarme kirişlerin kesme kuvveti kapasitesinin güçlendirilmesi konusunu araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada 11 adet betonarme T kesitli kiriş, tek düze yükleme altında test edilmiştir. Epoksi kullanılarak 3 ana tip çelik eleman değişik düzenlerde kiriş gövdelerine kesme açıklığı boyunca yapıştırılmıştır. Kesme kuvveti bakımından yetersiz olan betonarme kirişler bağ yapılı çelik elemanların değişik şekillerde düzenlenmesiyle güçlendirilmiştir. Buradaki amaç, bütün güçlendirilmiş test örnekleri için esnek kopma noktası elde etmektir. Test edilen kirişlerdeki sonuçlar, kontrol test örneğinkilerle karşılaştırılmış; güçlendirme için kullanılan çelik plakların tiplerinin ve düzenlerinin test örneklerinin davranışı, kuvveti, rijitliği, esnekliği ve kopma noktası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır [13].

Yapılan çalışmanın sonucunda bütün test örneklerinde ilk çatlama her zaman kirişteki maksimum eğilme momentinin olduğu bölgede esnek çatlak olarak meydana gelmiş, bütün dıştan bağlı çelik eleman tipleri kiriş dayanımını, rijitliğini ve sünekliğini geliştirmekte olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlara göre esnek kopma noktasına kadar kuvvetlendirilen test örnekleri, kontrol test örneğiyle aynı davranışı göstermekte olup çelik elemanın tipi ve kiriş üzerindeki düzeni, sünek davranışını yönlendiren ve kopma noktası modülünü belirleyen etkili parametrelerden biri olmuştur. Çelik şeritler arasındaki boşluk azaldıkça, yer değiştirme-süneklik oranı artmış, kesme açıklığı üzerindeki bağ alanındaki artış, belirgin olarak kesme çatlaklarının çoğalmasını azaltmıştır. “L” tipi çelik şeritlerle güçlendirilen test örnekleri, tüm örnekler arasında en düşük süneklik oranına sahip örnekler olmuşlardır [13].

Çelik plakalarla güçlendirilen test örneklerinin kuvvet ve sünekliği, test kontrol elemaninkine yakın sonuçlar vermiştir. Çelik plakalar, kesme çatlaklarının çoğalmasını önlemiştir. Kesme açıklığı boyunca bir tane büyük çelik plaka kullanılması yerine, çelik plakaları parçalara ayırarak onları birbirine bitişik şekilde kirişin kesme açıklığına bağlamanın daha başarılı olduğu

gözlemlenmiştir. Çelik elemanın tipine ve kiriş boyunca olan düzenine göre, test örneklerinin kopma noktaları ve esneklikleri farklılık göstermektedir. Kesme açıklığı boyunca kuvvetlendirilmiş kirişler, esnek davranış göstermektedir [13].

B.B.Adhikary ve arkadaşları kiriş gövdesine bağlanan çelik plakalar kullanılarak betonarme kirişlerin kesme kuvveti bakımından güçlendirilmesini deneyler ve analizlerle araştırmışlardır [14].



Şekil 3.2. B.B.Adhikary ve arkadaşlarının deney düzeneği [14]

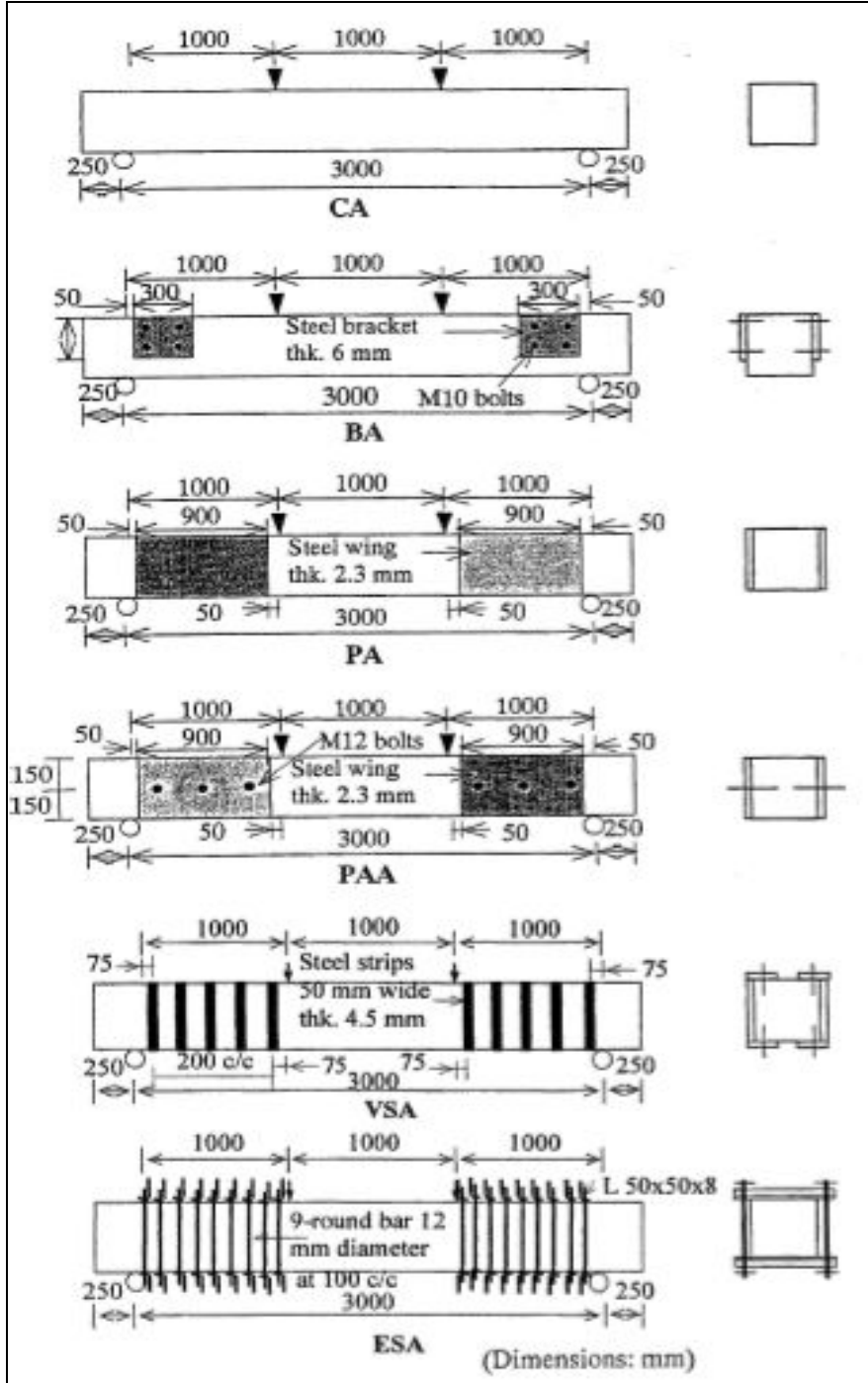
Yapılan deneylerde, iki adet test örneği plakalandırılmazken; on adet deney numunesi değişik derinlik ve kalınlıkta ince plakların epoksi ile gövdelerine bağlanması yöntemiyle güçlendirilmiştir. Bu numunelerden elde edilen deney sonuçları, plakalandırılmamış test örneklerinin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna ilave olarak bu kirişlerin davranışını incelemek için lineer olmayan bir sonlu eleman analizi yapılmıştır [14].

Yapılan deneyler ve nümerik analiz sonucunda, dıştan bağlanan sürekli çelik plakaların, betonarme kirişlerin nihai kesme kuvvetini arttırabildikleri; diğer plakalandırılmamış kirişlerle kıyaslandığında bu kirişlerin esneklik kuvveti ve rijitliğinde de artış olduğu belirlenmiştir. Kiriş boyunca çelik plaka kalınlığı ve derinliği arttıkça, çelik plaka monte edilmiş kirişin nihai kesme kuvveti de artmaktadır. Kalınlığı 4,5 mm, derinliği 100 mm olan plakanın monte edilmiş olduğu kirişte, kesme kuvveti artışının % 84 olduğu gözlemlenmiştir. Kirişlerin sünekliğini iyileştirmek ve mümkün olan maksimum kesme katkısını sağlamak için, plakaların mümkün olan maksimum derinliğe monte edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Plakalandırılmış kirişlerin kompleks kesme davranışlarının başarılı bir şekilde irdelenmesi “sonlu eleman analizi” gibi nümerik metotlarla da yapılabilmektedir [14].

Kenarları FRP ve çelik plakalarla bağlı betonarme kirişler üzerinde yapılan testler, kesme kuvveti sıyrılma mekanizmasının nitelik bakımından her iki tip plaka için de aynı olduğunu göstermiştir. Ancak, aynı kenar alanına sahip kenar plakaları için, plaka malzemesinin boyuna elastik modülü azaldığında kesme sıyrılma kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir [14].

B.B.Adhikary ve Mutsuyoshi, Bu çalışmada çeşitli teknikler kullanılarak betonarme kirişin kesme kapasitesinin değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Toplam 11 adet kiriş test edilmiştir. İki grup kiriş tasarlanmıştır; İlk gruptaki güçlendirilmiş kirişler kesme karakterindeki gevrek göçmeden kaçınılarak eğilme karakterinde ve sünek olarak tasarlanmışlardır. İkinci gruptaki kirişler ise kullanılan güçlendirme tekniklerinin kirişlerin kesme

dayanımını ne kadar artırdığını belirleyebilmek için göçme şekli kesmeden olacak şekilde tasarlanmışlardır. Referans kirişi olarak iki adet kiriş kullanılmıştır. Referans kirişlerinin dışında çelik köşebentlerle güçlendirilmiş, çelik levhalarla güçlendirilmiş, düşey şeritler ve dıştan ankrajlanmış,



Şekil 3.3.B.B.Adhikary ve Mutsuyoshi güçlendirme çalışmaları [15]

güçlendirilmiş kirişler tasarlanmış ve test edilmişlerdir. Kullanılan tüm tekniklerin kirişlerin kesme dayanımını etkin olarak artırdığı görülmüştür. Dıştan etriye ankrajlanarak kullanılan güçlendirme kirişlerdeki kesme dayanımını en fazla artıran yöntem olmuştur. Bu yöntemle güçlendirilen kirişin kesme dayanımı referans kirişinin kesme dayanımının yaklaşık olarak %117'si kadar fazla olmuştur. Kirişe epoksi ile bağlanan çelik levhalarla yapılan güçlendirme tekniğinde, kirişlerin kesme kapasitesi referans kirişine göre ortalama olarak %72 arttığı görülmüştür [15].

R.K.L. Su ve Y. Zhu, betonarme bağ kirişlerinin güçlendirilmesi ile ilgili yeni bir metodun geliştirilmesi amacıyla üç adet birebir ölçekli betonarme bağ kirişleri üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Bu kirişlerden iki tanesi kenar yüzlerinden dıştan çelik plakalarla güçlendirilirken, bir tanesi test kontrolü amaçlı güçlendirilmemiştir [16].

Deneyisel sonuçlardan; dış plakalarla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerin mukavemetinde, deformasyonunda ve enerji sönümlemesinde artış gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş bağ kirişlerinin modellenmesinde lineer olmayan sonlu eleman analizi kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan betonun ve çelik çubukların malzeme özellikleri laboratuvar testlerinden elde edilmiştir. Deneyisel çalışmalar; cıvatalı bağlantı ve beton duvarı arasında ufak bir kayma olduğunu göstermiş ve cıvatalı bağlantıların yük-kayma davranışını anlamak için lineer model kullanılmıştır. Plakalarla güçlendirilmiş bağ kirişlerinden elde edilen deneyisel sonuçlar ile modelde düzenlemeler yapılmıştır. Bu sayısal parametrik çalışma göstermiştir ki; cıvatalı bağlantı ile beton duvarı arasında ufak bir kayma (>3mm), cıvatalı bağlantıların yük taşıma kapasitesini belirgin ölçüde değiştirebildiği gibi, güçlendirilmiş bağ kirişlerinin yapısal performansını da etkilemektedir. Geliştirilen bu sayısal model, başka konfigürasyonlara, başka güçlendirme detaylarına sahip kirişlerin araştırılması ve incelenmesi bakımından da uygun olabilecektir [16].

3.3. Betonarme ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirmesi

Betonarme kirişlerin eğilme taşıma güçlerinin arttırılması için Tefvik Çetin Ünsal tarafından yapılan çalışmada, mevcut kirişin yeni boyuna donatı içeren beton katmanı ile güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneyler yardımıyla güçlendirme ile amaçlanan taşıma gücüne ne kadar yaklaşılabileceği, güçlendirmede kullanılan ek etriyelerin güçlendirmeye etkisinin ne olacağı, ek çekme donatıları ile kirişte bulunan çekme donatılarının birbirlerine Z şeklindeki bağ demirleri ile kaynaklanmalarının güçlendirmeye etkisinin ne olacağı ve ek çekme donatılarının kolon-kiriş birleşimlerinde ne kadar uzatılması gerektiği araştırılmıştır[17].

Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin monotonik yük altında davranış ve dayanımını araştırmak üzere yedi adet orta ölçekli deney elemanı kullanılmıştır. $2\phi 14$ çekme, $2\phi 10$ basınç ve $\phi 6/125$ mm etriye ile donatılmış olan 3 m uzunluğunda 150×250 mm dikdörtgen kesitli yalın kirişler üretildikten sonra, çekme yüzündeki pas payı kırılarak bu bölgeye içinde $2\phi 14$ donatı bulunan 50 mm kalınlığında yeni bir beton katmanı dökülmüştür. Yeni çekme donatısı ile eski çekme donatısı arasındaki bağ U şeklindeki yarım etriyeler ve/veya Z şeklindeki bağ demirler ile sağlanmıştır [17,2].

Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan incelemeler neticesinde güçlendirilmiş kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin birdöküm kiriş kapasitesine çok yaklaştığı tespit edilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklerinde, güçlendirmede uygulanan yapım farklılıklarından kaynaklanan büyük bir fark görülmemiş olmasına rağmen, güçlendirilmiş kirişlerin birdöküm kirişler kadar rijit davranmadıkları sonuçlarına ulaşılmıştır. Güçlendirmede uygulanan yapım farklılıklarının (etriyeli, Z-demirli, etriye ve Z-demirli) davranışı fazla etkilemediği görülmüş; güçlendirilmiş kirişlerin birbirlerine yakın bir sünek davranış göstermiş olmasına rağmen birdöküm kiriş kadar sünek davranamamış olduğu belirlenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin enerji

sönümleme kapasiteleri de birdöküm kirişin enerji tüketme kapasitesinden daha az olmuştur. Mesnette kenetlenmiş ve mesnette kenetlenmemiş deney elemanları davranış bakımından pek farklılık göstermemişlerdir. Eski beton ile güçlendirme betonunun birbirine kaynaşması tam olarak sağlanmış olup özellikle dikkat edilmesi gereken bir olay görülmemiştir [17,2].

Çelikel, Tevfik Çetin Ünsal'ın yapmış olduğu deneysel çalışmanın devamı olarak, çalışmasında güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yinelenir yük altındaki davranış ve dayanımı araştırmıştır. Bu amaçla, boyut, donatı ve güçlendirme ilkeleri, Tevfik Çetin Ünsal'ın denemiş olduğu kirişlerle tamamen aynı olan yedi adet orta ölçekli deney elemanı denenmiştir. Mevcut kiriş ile yeni oluşturulacak katmanı kaynaştırabilmek için U-biçimli yarım etriyeler veya Z-demirleri kullanılmıştır. Kaynaştırma yöntemi, güçlendirme katman uzunluğu ve boyuna donatı ucunun kaynaklı ya da boşta olması değişkenlerinin denekler üzerindeki etkileri incelenmiştir [18].

Yapılan deneyler neticesinde hasara uğramamış olduğu halde yetersizliği belirlenmiş betonarme kirişlere uygulanan güçlendirme yöntemi başarılı olmuştur. Güçlendirme sonunda amaçlanan taşıma gücünün % 95'ini aşabilen dayanımlar elde edilmiştir. Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında U-biçimli yarım etriyeler veya Z-demirlerinin kullanılması aynı derecede başarılı olmuş, yeterli aderans boyu sağlanmış ve yerel güçlendirme genel güçlendirme kadar başarılı olmuştur. Yerel güçlendirmede, yeni boyuna donatının eski boyuna donatıya kaynaklanmaması durumunda da yeterli dayanım elde edilmiş olmasına rağmen, yeni donatının eski donatıya kaynaklanması durumunda güçlendirilmiş kirişlerin süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [18,2].

İsmail Özdemir katman ekleme yönteminin tersinir yükler altındaki başarısını incelemiştir. Deneysel çalışmada katman ekleme yönteminin tersinir yükler altında ne derece etkili olduğu, onarım ile amaçlanan taşıma gücüne ne

kadar yaklaşılaçağı ve ek çekme donatıları ile kirişte bulunan çekme donatılarının birbirlerine Z demirleri ile kaynaklanmalarının onarıma etkisinin ne olacağını araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla biri yalın, diğeri monolitik olmak üzere, konsol kiriş şeklindeki iki deney elemanı üzerinde toplam üç deney yapılmıştır [19].

Deney elemanlarının tümünde yeterli aderans boyu sağlanabilmesi ve elemanların deney duvarına tutturulabilmesi için konsol dibinde 150x500x1000 mm boyutlarında rijit bir beton blok oluşturulmuş ve boyuna donatılar bu bloğa ankre edilmiştir. Enkesit boyutları 150x250 mm ve uzunluğu 1,85 m olan yalın kiriş, üst yüzünde 2 ϕ 14, alt yüzünde 2 ϕ 10 ve ϕ 8/125 mm etriye ile donatılmış olarak üretildikten sonra hasara uğratılmıştır. Daha sonra onarım amacıyla, alt ve üst yüzündeki pas payı kırılarak üst yüze içinde 2 ϕ 14, alt yüze ise içinde 2 ϕ 10 donatı bulunan 50 mm kalınlığında yeni beton katmanları eklenmiştir. Yeni beton katmanları ile yalın kirişin arasında yük aktarımını sağlamak amacıyla yeni boyuna donatılar, mevcut boyuna donatılara ϕ 8/125 mm'lik Z-demirleri ile kaynaklanarak bağlanmıştır. Çalışmada kenetleme yöntemi kullanılmadığından onarım katmanı donatılarının ankraji yalın kirişin betonu dökümü sırasında yapılmıştır [19,2].

Yapılan çalışmalar neticesinde katman ekleme yöntemi ile onarım işleminin tersinir yükler altında da başarılı olduğu görülmüştür. İleri çevrimlerde monolitik kiriş taşıma gücüne ulaşıldığı, geri çevrimlerde aderans çözülmelerine rağmen monolitik kiriş taşıma gücünün % 90'ına ulaşıldığı belirlenmiştir. Onarılmış kirişteki dayanım kaybı monolitiğe göre daha erken başlamıştır. Bir başka deyişle onarılmış kirişte yeterli, fakat monolitiğe oranla biraz daha düşük süneklik elde edilmiştir. Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında Z-demirlerinin kullanılması, tersinir yükler altında da Tevfik Çetin Ünsal ve Tahsin Fırat Çelikel'in çalışmalarındakiler kadar başarılı olmuştur. Onarılmış kirişin enerji tüketme kapasitesinin monolitik kiriş enerji tüketme kapasitesi ile hemen hemen aynı olduğu ve yeterli olduğu

gözlenmiş, birinci çevrim dışında, onarılmış kiriş rijitliği monolitik kiriş rijitliğine yakın gelişmiştir. Birinci çevrimde onarılmış kiriş rijitliğinin düşük çıkmasına yalın kirişteki ana çatlağın tam olarak beton ile doldurulamaması neden olmuştur [19,2].

Fatih Altun basit eğilme altında betonarme kirişlerin mantolama öncesi ve sonrası mekanik davranışlarını belirlemek ve birbirleriyle karşılaştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır [20].

Test edilen bütün betonarme kirişler dikdörtgen kesitli ve beton sınıfı olarak ortalama C20'dir. Deney değişkenleri, mantonun kalınlığı, yatay donatı miktarı ve enine donatı mesafesidir. Deneyler sırasında 9 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. 3 değişik tipte ve 3 değişik ebatla (150x150x2000 mm, 200x150x2000 mm, 200x200x2000 mm) betonarme kirişler, taşıma gücüne kadar basit eğilmeye maruz bırakılmıştır. Her bir kiriş, çekme donatısının plastik kopma noktasına ulaşıncaya kadar basit eğilme altında yüklenmiştir. 150x150 mm, 200x150 mm, 200x200 mm kesitindeki kirişlerin dış kısımları ile etriyelerin dışı arasında kalan bölge tıraşlanmış ve yaklaşık olarak 130x130 mm, 180x130 mm, 180x180 mm'lik kesitler elde edilmiştir. Bu test örnekleri tam plastik kopma noktasına kadar eğilme altında yüklenmiştir. Mantolama derinliği olarak 100 mm seçilmiştir. Yaklaşık 100 mm kalınlığında taze beton uygun kalıbın içine dökülmüştür. Beton dökülmeden önce Z demir çubuklar, eski ve yeni kirişlere kaynatılarak yatay ve boylamasına demir çubukların bazıları birleştirilmiştir. Kaynatılan Z çubuklar 8 mm çapında ve 400 mm aralıktadır. Mantolanmış bu betonarme kirişler basit eğilme altında tam kopma noktasına kadar yüklenmiş ve test edilmiştir. Basit eğilme altındaki mantolanmış kirişlerin sünekliği, rijitliği ve nihai esneklik kapasitesi deneysel olarak belirlenmiştir [20].

Yapılan testler göstermiştir ki; hasarlı kirişlerin yüzeylerindeki pürüzlülük 4~6 mm'dir. Gerçek uygulamalardaki miktarın da bu değerler arasında olduğuna inanılmaktadır. Mantolanmış betonarme kirişlerin tümü,

başlangıçtan nihai kırılma noktasına ulaşınca dek aynı tip davranışları göstermiştir. Hasarlı kirişlerdeki boyuna donatılar ile mantolanmış kirişlerdeki donatıları kaynaklama yöntemiyle Z çubuklarla bağlamak, kirişlerin mekanik davranışlarına olumlu katkı sağlamaktadır [20].

Sabahattin Aykaç 2000 yılında yaptığı çalışmada deprem yükleri haricindeki nedenlerle katman ekleme tekniği ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin depremi benzeştiren tersinir yinelenir yükler altındaki davranışını ve sonradan eklenen kiriş boyuna donatısı kenetleme yöntemlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkilerini araştırmıştır [21].

Bu araştırmada hasar görmüş veya yetersizliği anlaşılmış kirişin bir ya da iki yüzüne içinde yeni boyuna donatı bulunan yeni bir betonarme katman eklenmiştir. Yeni katman ile mevcut kiriş arasındaki yük aktarımı ve sünekliği sağlamak amacıyla uygulama kolaylıklarından dolayı 'U' şeklindeki yarım etriyeler kullanılmıştır. Kesme açıklığı orta ($a/d \approx 5$) ve küçük ($a/d \approx 3$) olan kirişler ele alınmış ve kirişlere onarım güçlendirme veya diriltme işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan iyileştirme yöntemi bazı kirişlerde sadece üst yüze, bazı kirişlerde hem alt hem de üst yüze uygulanmıştır. Ayrıca yeni katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona mekanik veya epoksili olarak kenetlenmesi yöntemleri de araştırma kapsamında incelenmiştir [21].

Uygulanan yöntem onarım ve güçlendirme işlemlerinde oldukça başarılı olmuş, diriltme işlemlerinde ise sınırlı bir başarı elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında amaçlanan dayanımlara ulaşılmış ancak diriltme uygulanan elemanlarda tersinir yükler altındaki dayanım kaybı erkenden başlamıştır. Diriltilmiş elemanlar haricindeki elemanlarda yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır. Onarılmış elemanların enerji tüketme kapasiteleri monolitik eleman kapasitelerine çok yakın olmuştur. Diriltme uygulanmış elemanların enerji tüketme kapasitesi ise özellikle kesme açıklığı küçük olan kirişlerde monolitiğe göre belirgin olarak düşük olmuştur. Güçlendirilmiş elemanların enerji tüketme kapasiteleri ise, sürekli donatılı güçlendirme elemanının

haricinde monolitik eleman kapasitesinden daha büyük olmuştur. Tüm elemanlarda monolitiğe göre daha az eğilme rijitlikleri elde edilmiştir. Yeni katman ile mevcut kiriş arasındaki sünekliği ve yük aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan 'U' şeklindeki yarım etriyeler oldukça başarılı olmuştur. Katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona 'L' profil ile mekanik olarak kenetlenmesi oldukça başarılı olmakla beraber, rijitlikte kabul edilebilir düzeyde de olsa (% 30'dan az) ani düşmelere neden olduğu görülmüştür. Katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona epoksi kullanılarak kimyasal olarak ankrajı da oldukça başarılı olmuştur [21].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Programı

Deney kirişlerinin boyut ve sayıları, laboratuvar koşulları içerisinde gerçekleştirilebilecek ve olağan durumları yansıtabilecek şekilde seçilmiştir. Deney elemanlarının sayısı on dördtür. Üzerlerinde güçlendirme işlemi yapılacak kirişler yedişerden iki ana gruba ayrılmıştır. Bunlardan ilk yedisi tam etriyeli diğer yedisi ise eksik etriyelidir. Her iki gruptan referans olması açısından birer yalın eleman test edilmiştir. Çizelge 4.1’de topluca verilen modellerin tasarımında aşağıdaki değişkenlerin dayanım ve davranış üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

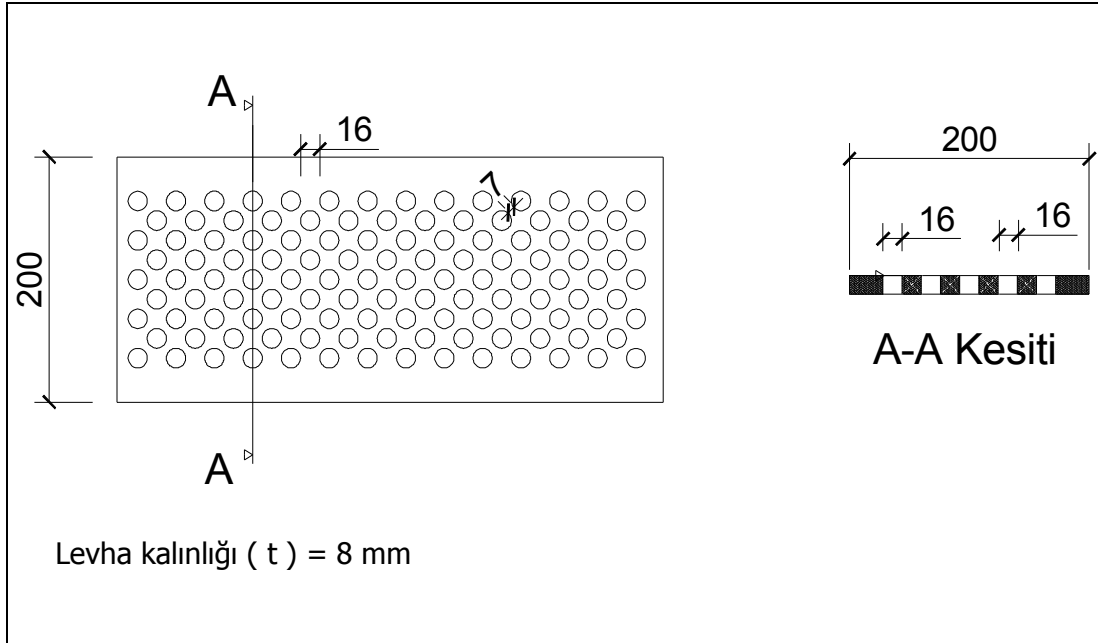
a) *Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arasındaki yük aktarımına etkisi:* Delikli levha kullanımının deformasyona, deliksize oranla daha fazla izin vereceği ve süneklik düzeyine olumlu katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Yapıştırma esnasında levhanın deliklerine dolan epoksinin daha iyi bir kenetlenme sağlayacağı ve yapıştırma kalitesinin daha iyi kontrol edilebileceği düşünülmüştür.

b) *Delikli ve deliksiz çelik levha kullanımı:* Delikli ve deliksiz levhalarda aynı tür birleşim ve yapıştırma teknikleri kullanılarak birbiri arasındaki davranış farklılıkları incelenmiş, avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Tüm elemanlarda kullanılan delik deseni ve boyutları aynı olup Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

c) *Kiriş yan yüz uçlarındaki ankraj bulonlarının ve levhaların etkinliği:* Bu bölgedeki oluşumlar her deneyde dikkatle incelenmiş, sisteme katkısı değerlendirilmiştir. Bazı elemanlarda epoksi yapıştırıcı kullanılmamış böylelikle sadece uç bölgelerde uygulanan tekniğin etkinliği araştırılabilmıştır.

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
RB	Eğilme	-----	-----	-----	-----
RS	Eğilme+Kesme	-----	-----	-----	-----
S1	Eğilme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	-----
S2	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz	-----
S3	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----
S4	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	var
S5	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	yok
S6	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var
S7	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	-----
S8	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz	-----
S9	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	var
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	yok
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var

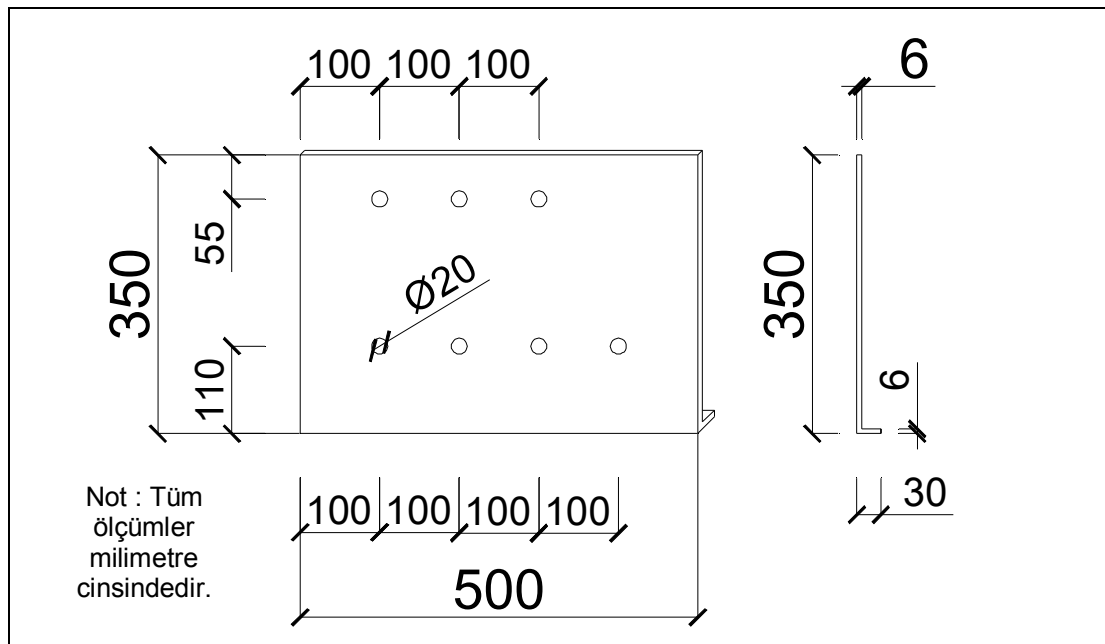


Şekil 4.1. Delikli çelik levha kesit ve görünüşü (TS 4312- T Dizilişi Tertip 2)

d) *Tam etriyeli kirişlerin eğilme zorlanmasına karşı güçlendirilmesi ve eksik etriyeli kirişlerin eğilme-kesme zorlanmalarına karşı birlikte güçlendirilmesi:* Tam etriyeli altı adet tablalı betonarme kiriş sadece eğilme etkisine karşı, çelik levhalarla güçlendirilmiş, test edilmiş, deney dataları ve gözlem notları incelenerek araştırmacı ve uygulamacıya yönelik değerlendirme ve tavsiyelerde bulunulmuştur. Eksik etriyeli diğer altı kiriş ise eğilme zorlanmasına ek olarak dört tanesi kesme kuvvetine karşı da güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirmede imalatı kolay ve maliyeti düşük bir teknik öngörülmüş, bu teknik bütün elemanlara aynı şekilde uygulanıp aralarında parametre olmaktan çıkarılmıştır. Seyrek etriyeli bu grubun güçlendirilmiş deney elemanları da test edilmiş, deney dataları ve gözlem notları incelenerek araştırmacı ve uygulamacıya yönelik değerlendirme ve tavsiyelerde bulunulmuştur. Bunlardan başka deney grafikleri üst üste çizilerek parametrelerin güçlendirmedeki etkileri karşılaştırılmış, tartışılmıştır.

e) *Epoksi yapıştırıcı kullanılmaksızın çelik levhalarla güçlendirme:* Boy levhalarını kirişe yapıştırmada epoksi kullanılmaktadır. Epoksi yapıştırıcı pahalı

bir malzemedir. Çalışmamızda; güçlendirilmiş bütün deney elemanlarındaki boy levhası uç yan levhalarla kirişe ankre edilmiştir. Tek başına bu uç ankrajlarının bile taşıma gücü açısından sorun çıkarmadığı yapılan hesaplamalarda görülmüştür. Bu durum çalışmada bir değişken olarak yerini almış ve bazı kirişlerde boy levhası yapıştırırmada epoksi kullanılmamıştır. Yapılan testlerde bu durumun davranış ve dayanıma etkisi gözlenmiş ve araştırılmıştır.



Şekil 4.2. Güçlendirme kirişlerinin uç, yan levhaları detayı

f) *Kesme güçlendirilmesinde kullanılan saplamalardaki art germe*: Burada etriye vazifesini görecektir. Burada saplamalar kontrollü olarak torkmetre ile gerdirilmiştir. Düzenekte kalıcı deformasyon yapmayacak değer hesaplanmış bu değer sabit olarak bütün saplamaların gerdirilmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan bu art germenin etkileri deneylerde gözlenmiş, araştırılmıştır.

g) *Basınç levhasının etkinliği*: Çekme levhalarının takviyesiyle birlikte eleman denge donatısına yakın aşırı donatılı duruma gelmektedir. Böyle olunca elemanda süneklik kaybı olacağı açıktır. Basınç levhasıyla birlikte basınç

bölgesi betonunun rahatlaması elemanın sünekliğinin artırılması düşünülmüştür.

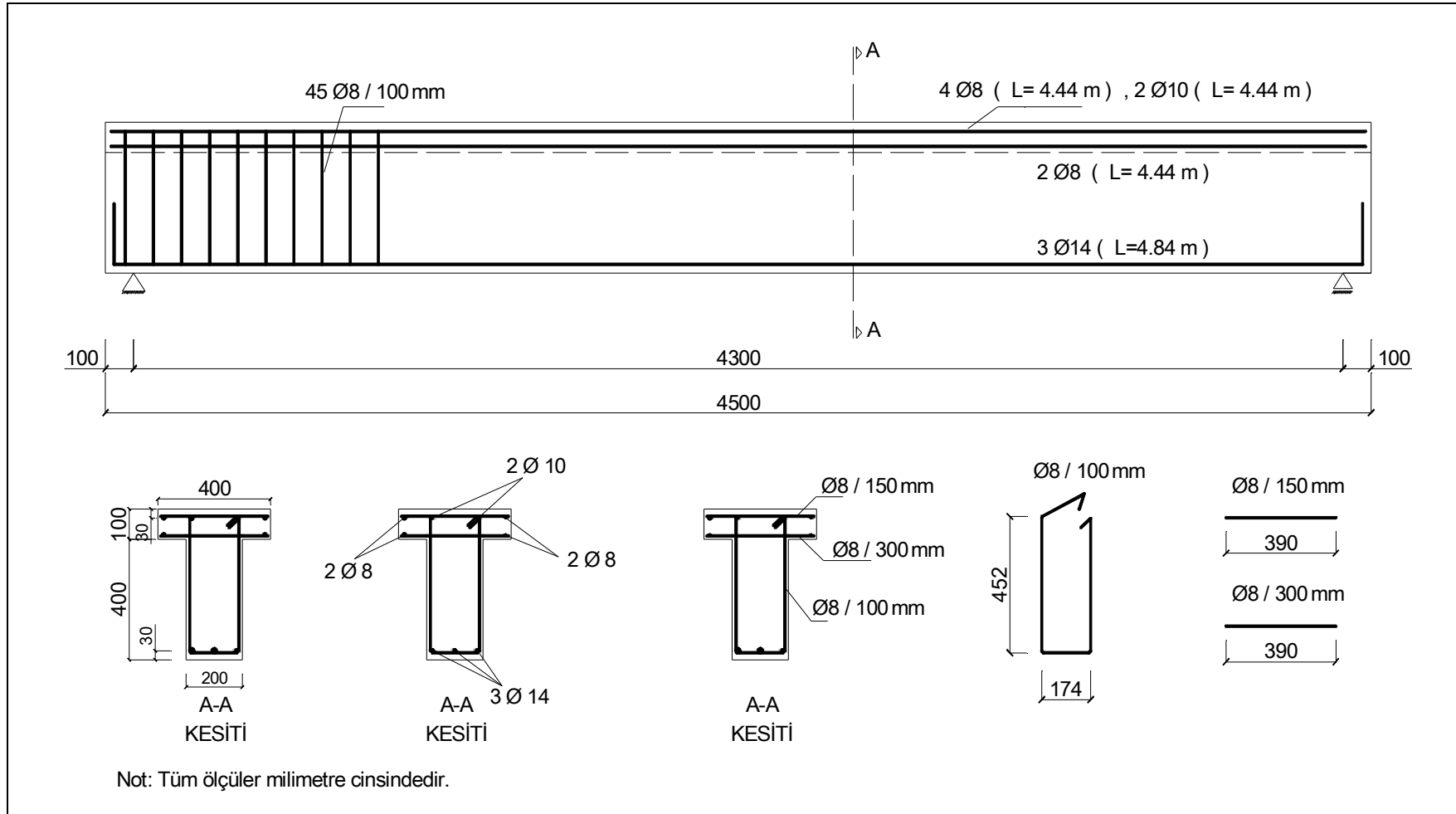
Yukarıda belirtilen parametreler çalışmada ele alınmış ve sonuçlar bu bağlamda değerlendirilmiştir.

Deney elemanları;

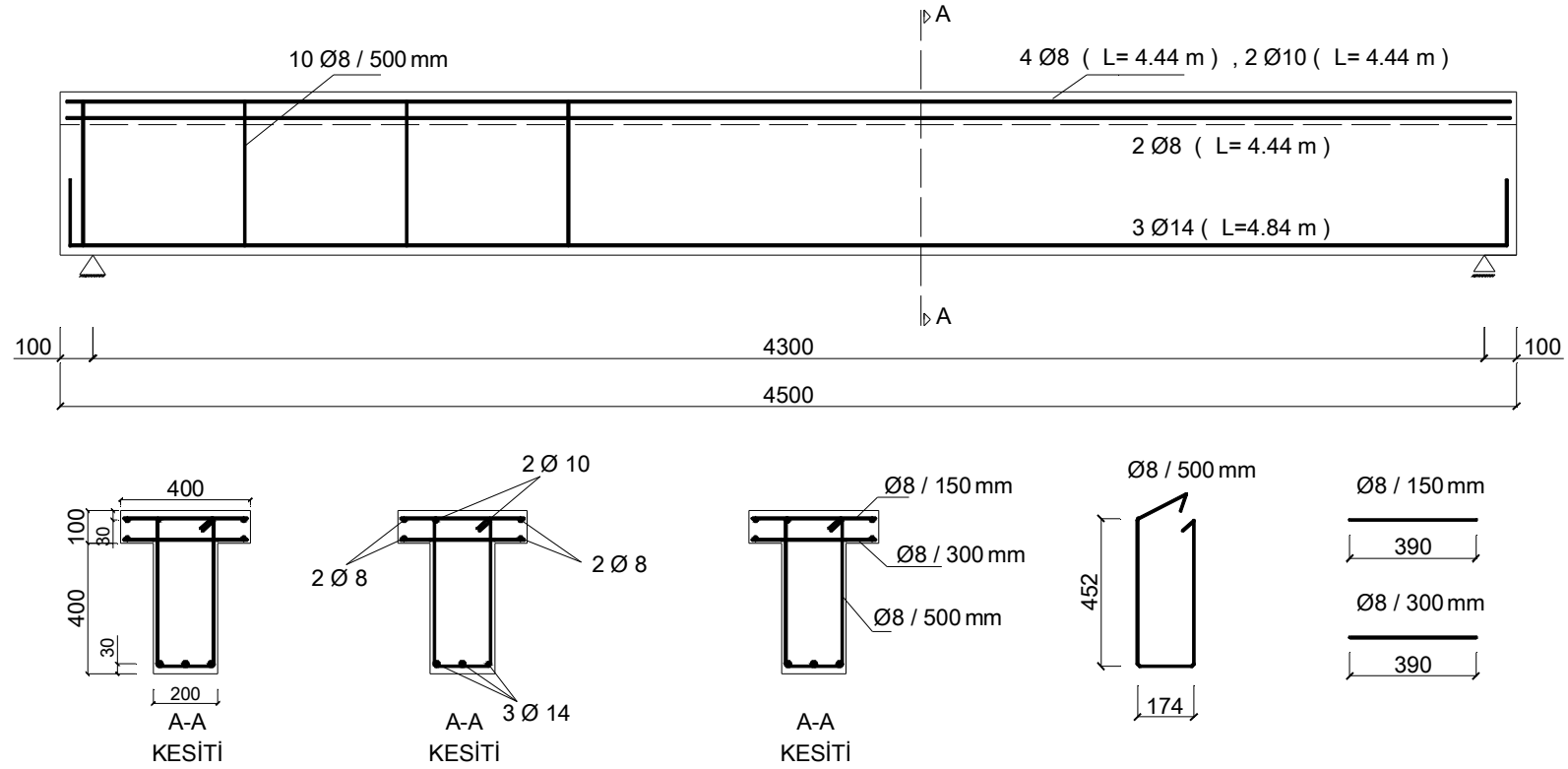
- a) RB; Eğilmeye zorlanmasına karşı güçlendirilecek tam etriyeli kirişler için yalın referans elemanı
- b) RS; Eğilme-kesme zorlanmasına karşı güçlendirilecek eksik etriyeli kirişler için yalın referans elemanı
- c) S1; Eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden düz çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- d) S2; Eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha ile epoksi yapıştırıcı kullanılmadan güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- e) S3; Eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- f) S4; Eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt yüzden düz çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanı
- g) S5; Eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden düz çelik levha ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanı
- h) S6; Eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanı
- i) S7; Eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- j) S8; Eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ile epoksi yapıştırıcı kullanılmadan güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- k) S9; Eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanı
- l) S10; Eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt yüzden delikli çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanı

m) S11;Eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanı

n) S12;Eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır.

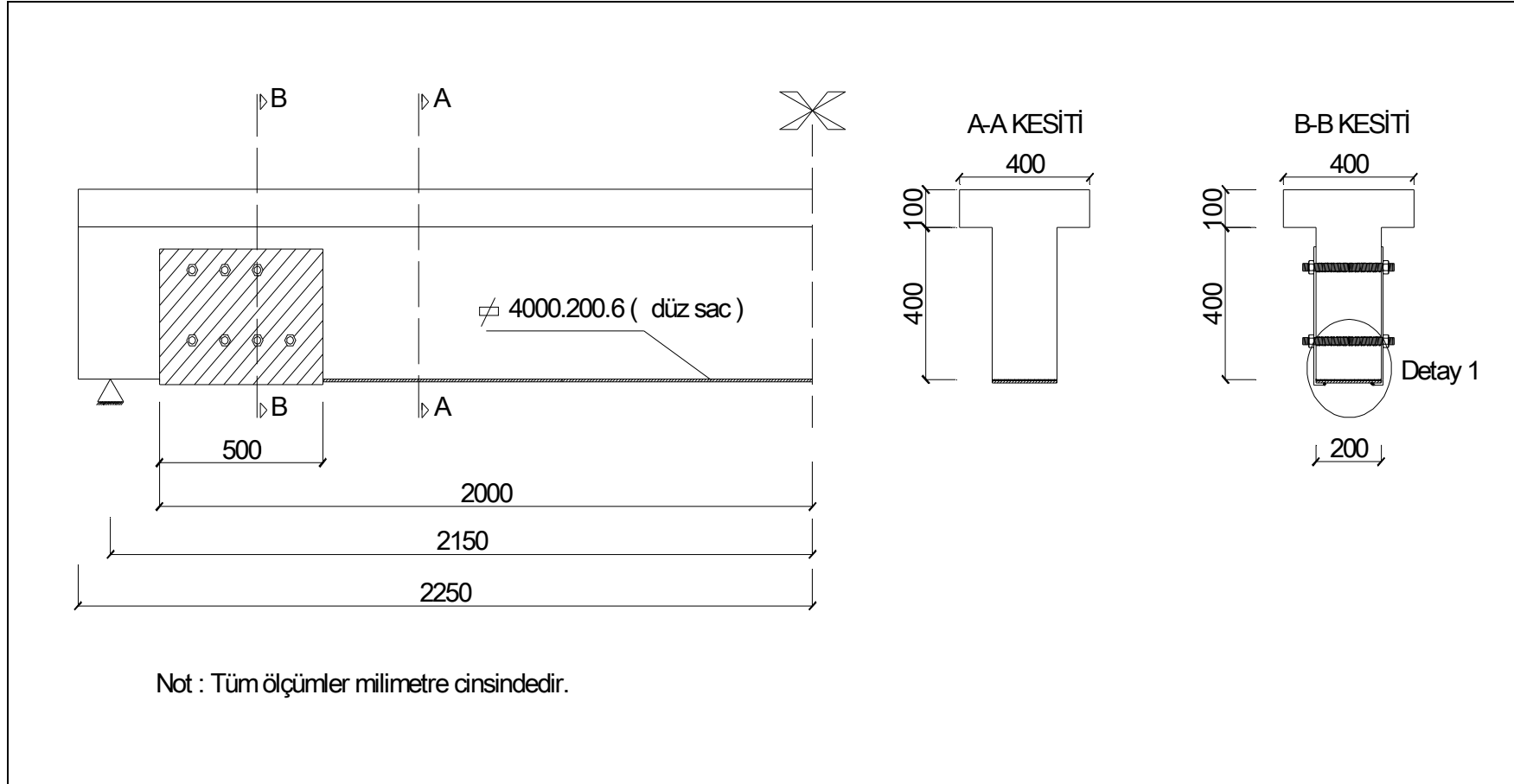


Şekil 4.3. Tam etriyeli yalın RB kirişi detayı

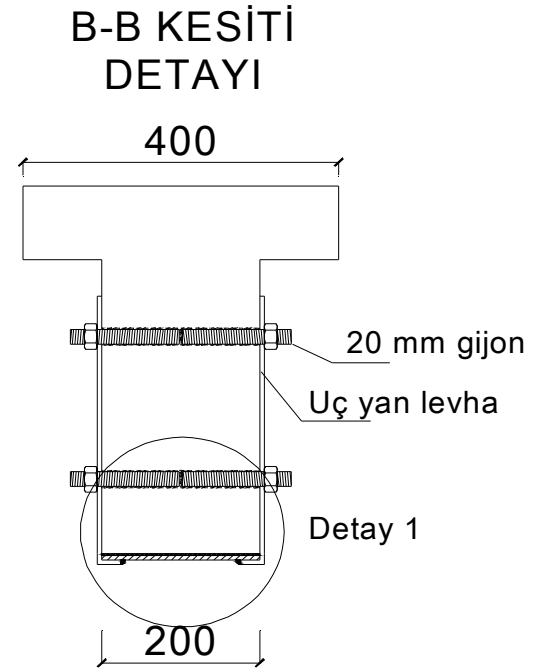
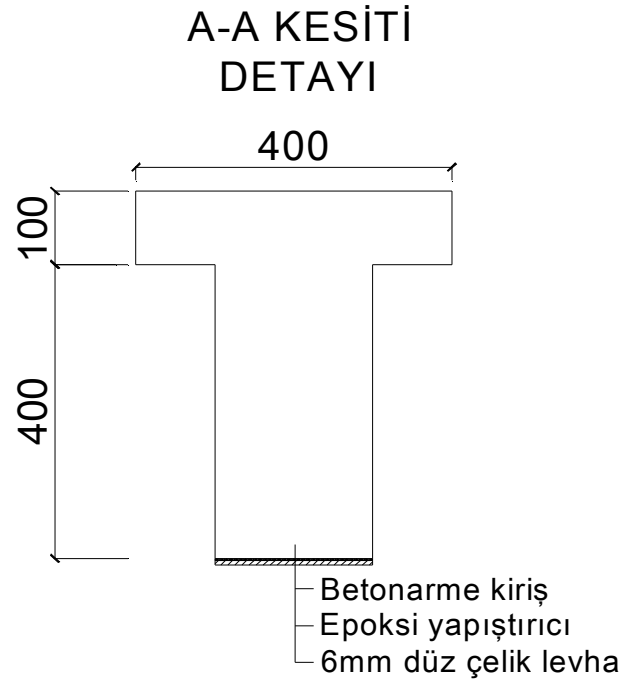


Not : Tüm ölçüler milimetre cinsindedir.

Şekil 4.4. Eksik etriyeli yalın RS kirişi detayı

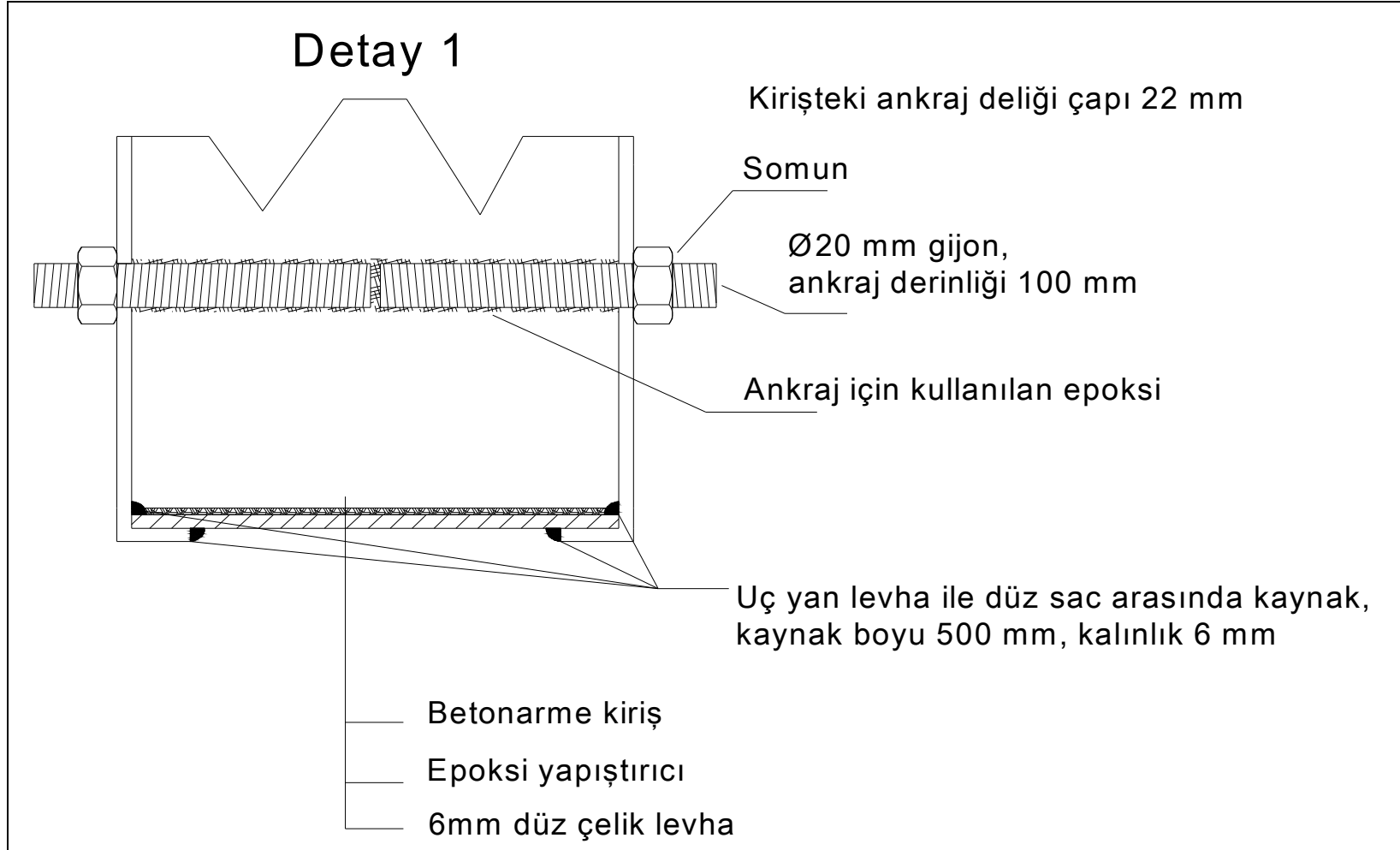


Şekil 4.5. Tam etriyeli deney elemanı S1

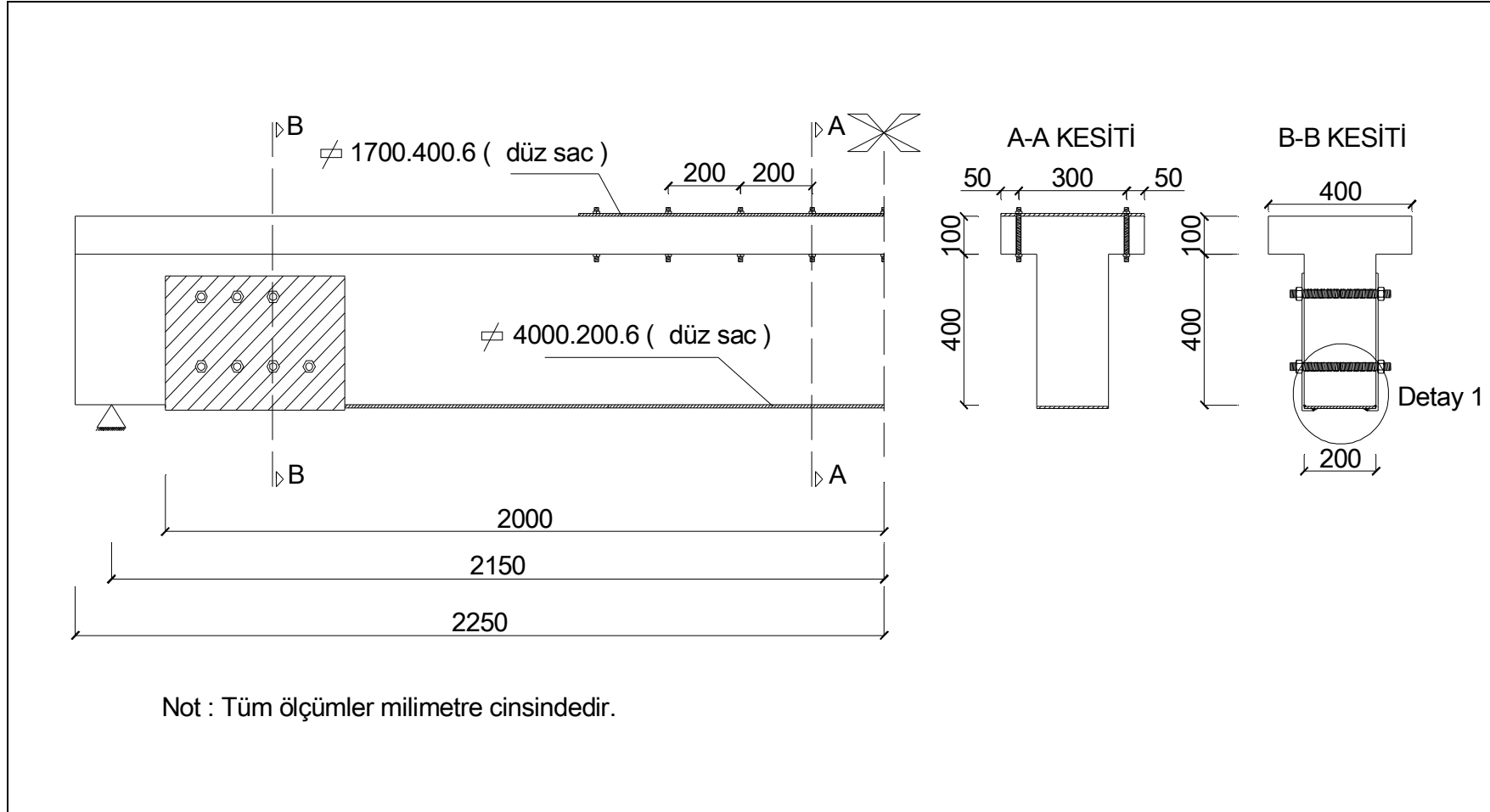


Not : Tüm ölçümler milimetre cinsindedir.

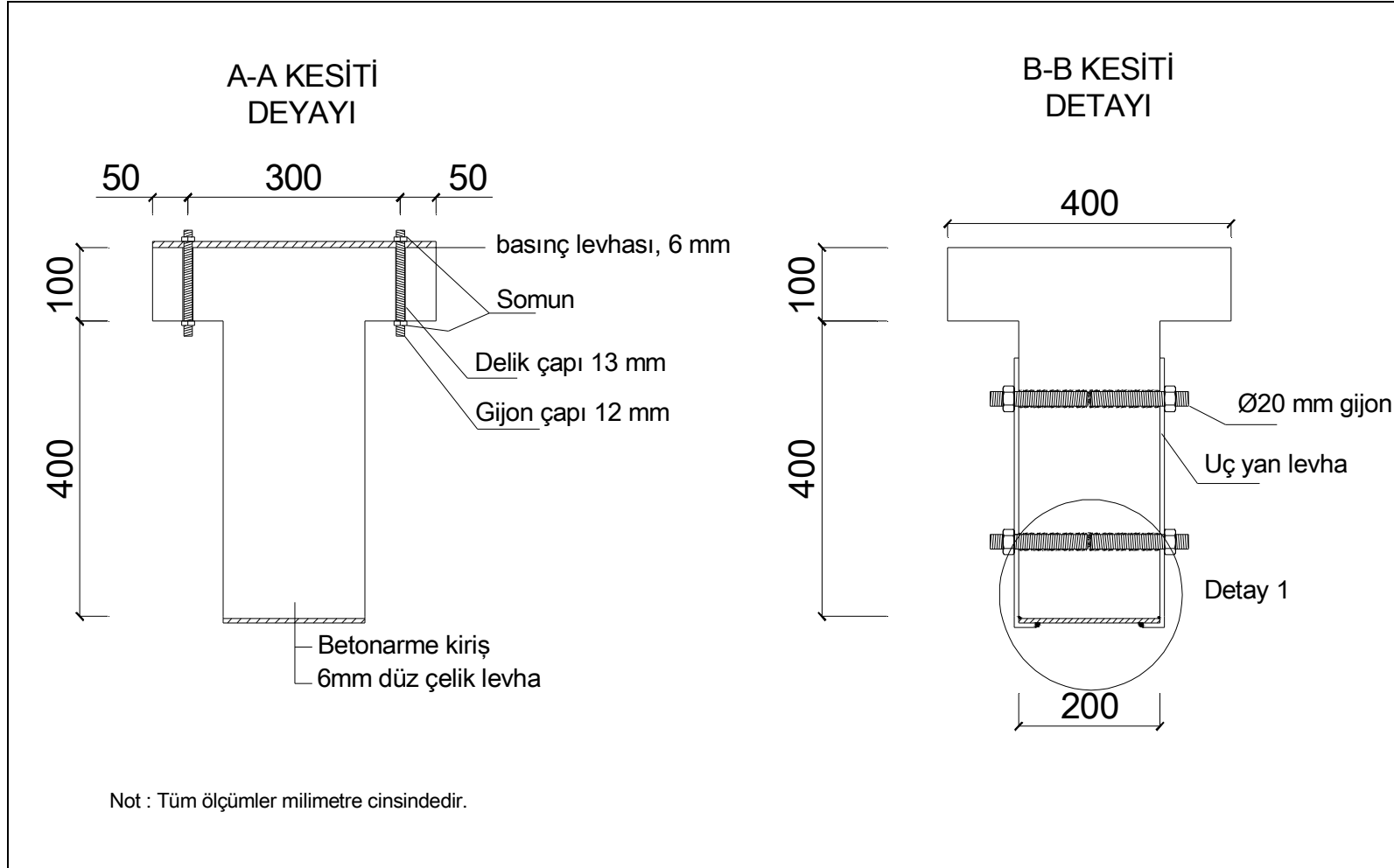
Şekil 4.6. S1 elemanı kesitleri



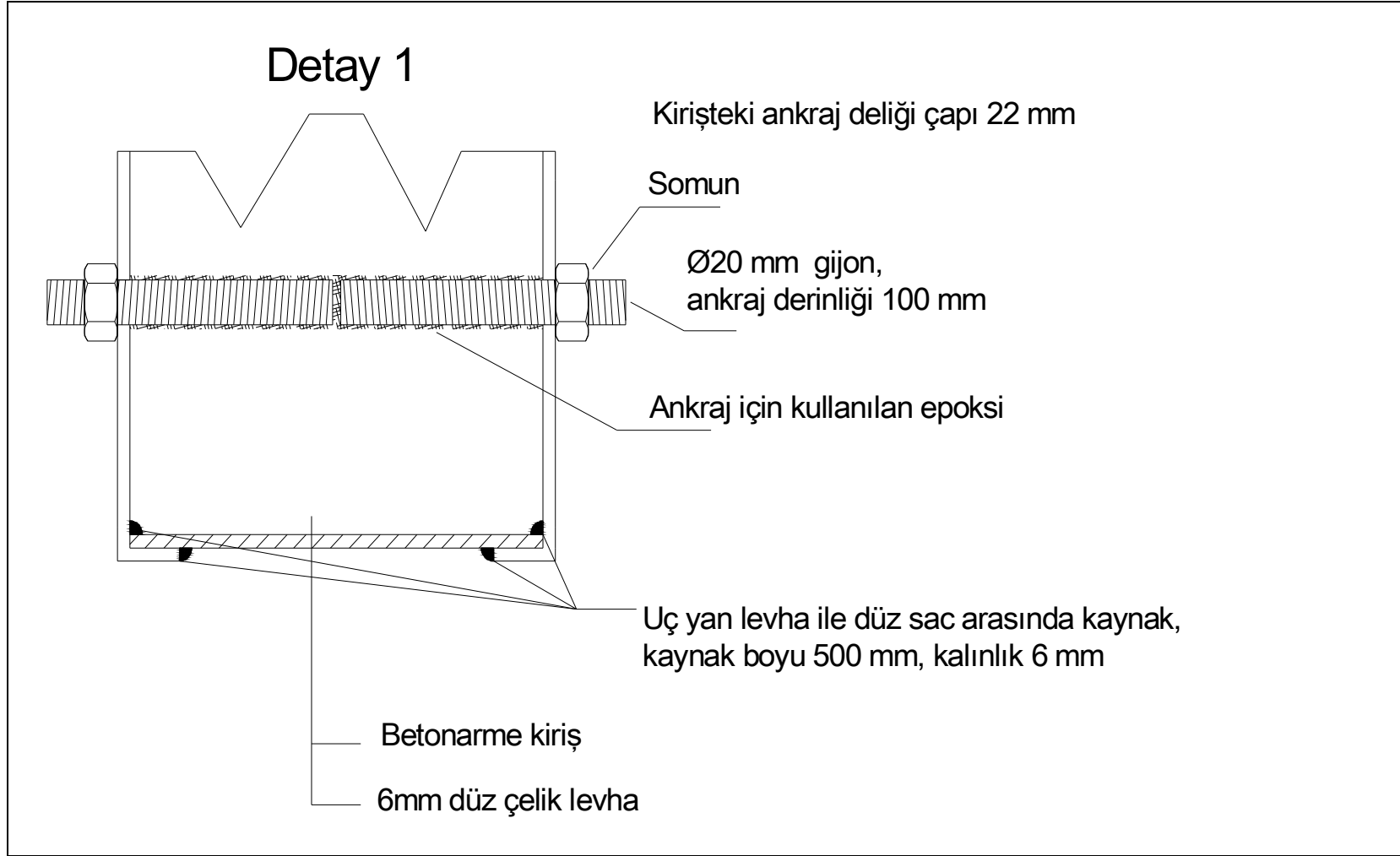
Şekil 4.7. S1 kirişi detayları



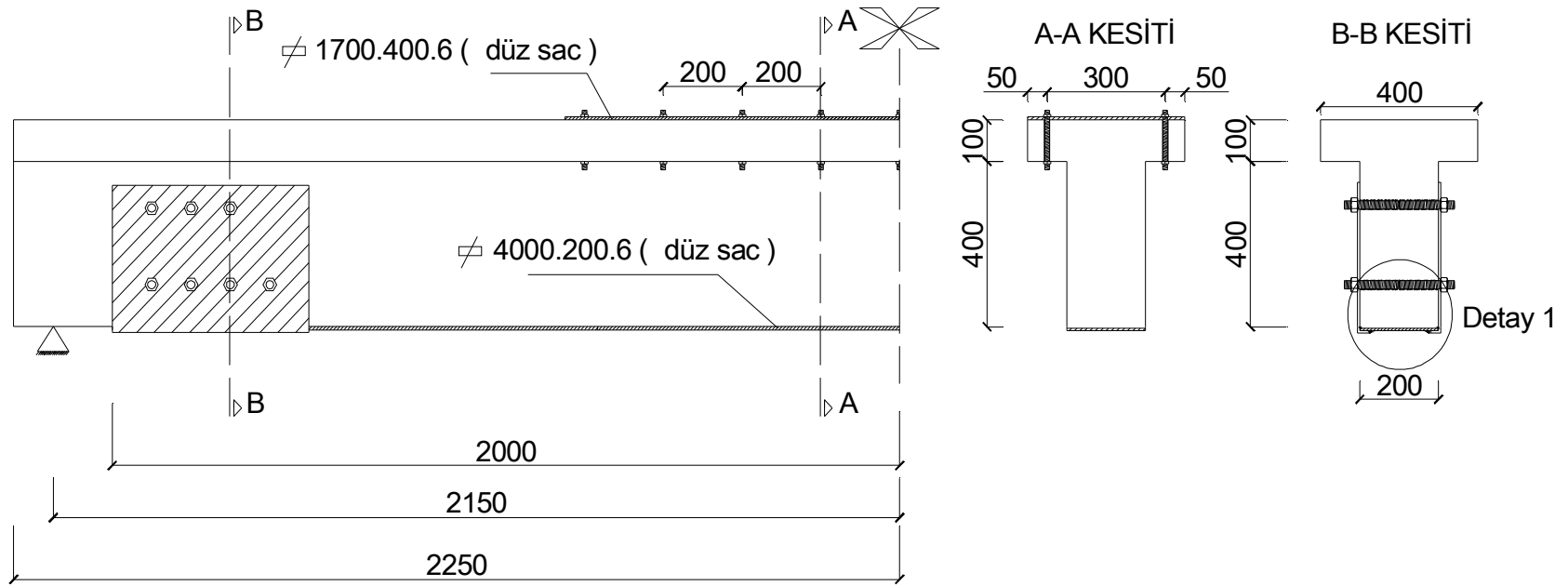
Şekil 4.8. Tam etriyeli deney elemanı S2



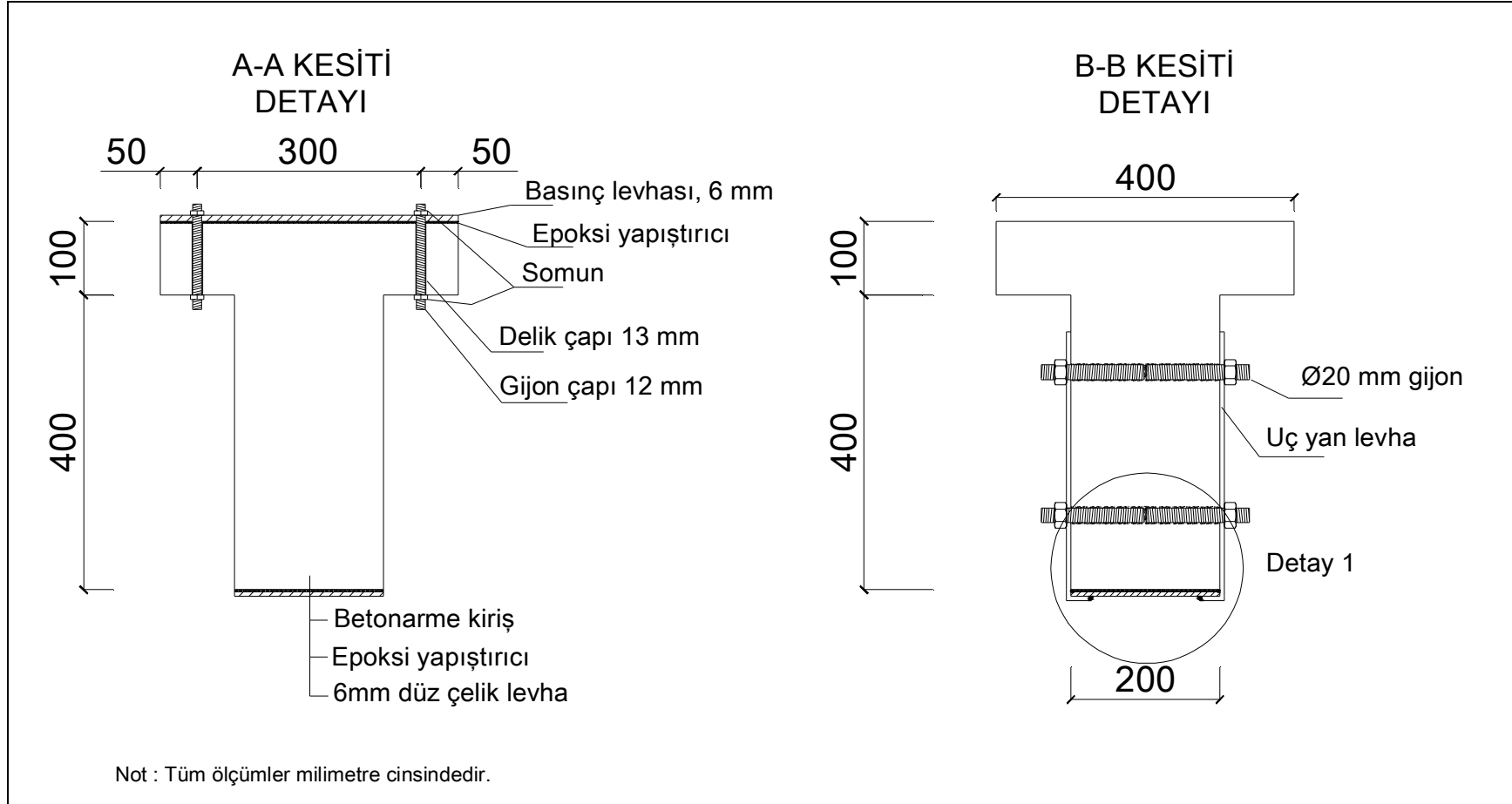
Şekil 4.9. S2 elemanı kesitleri



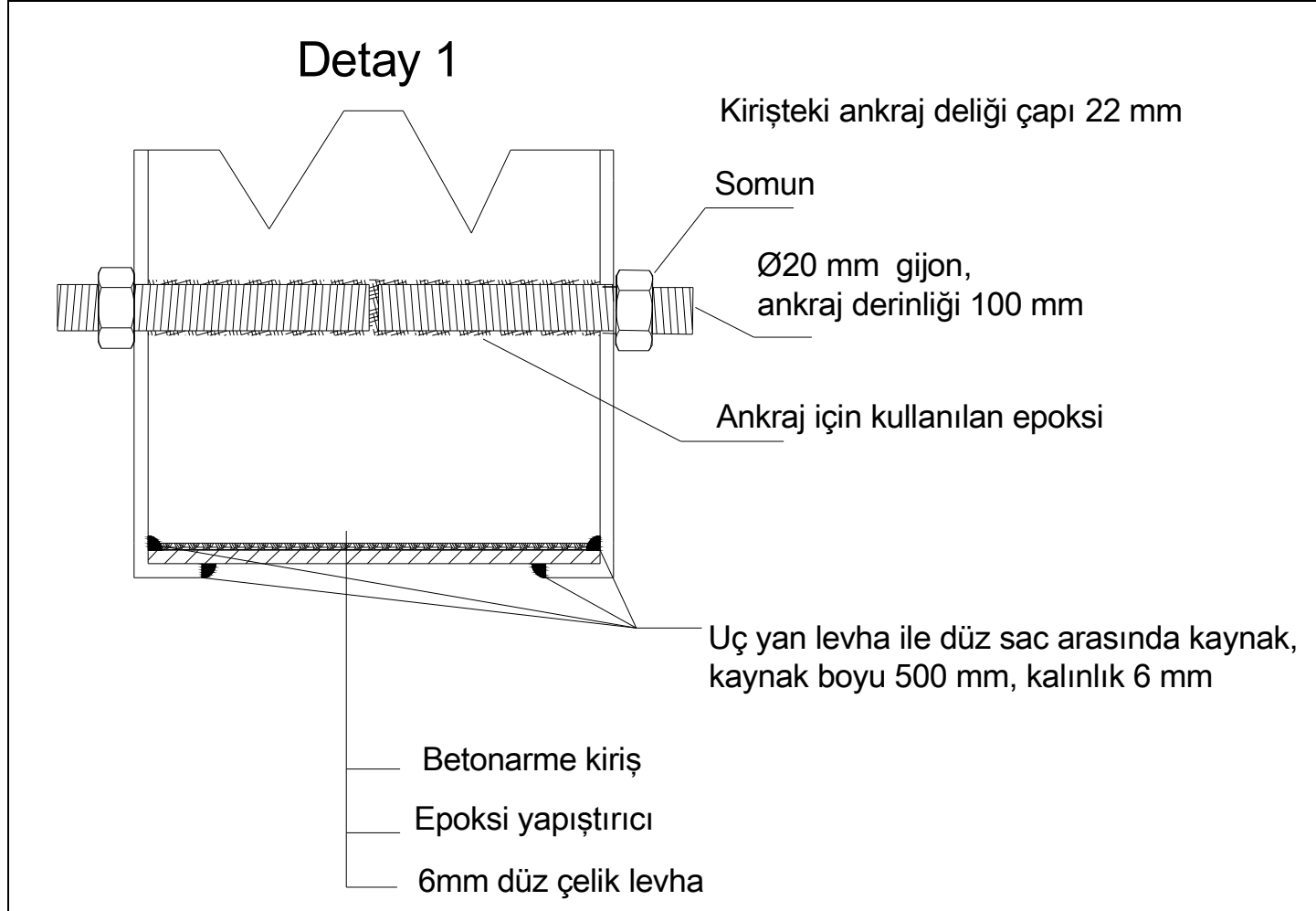
Şekil 4.10. S2 kirişi detayları



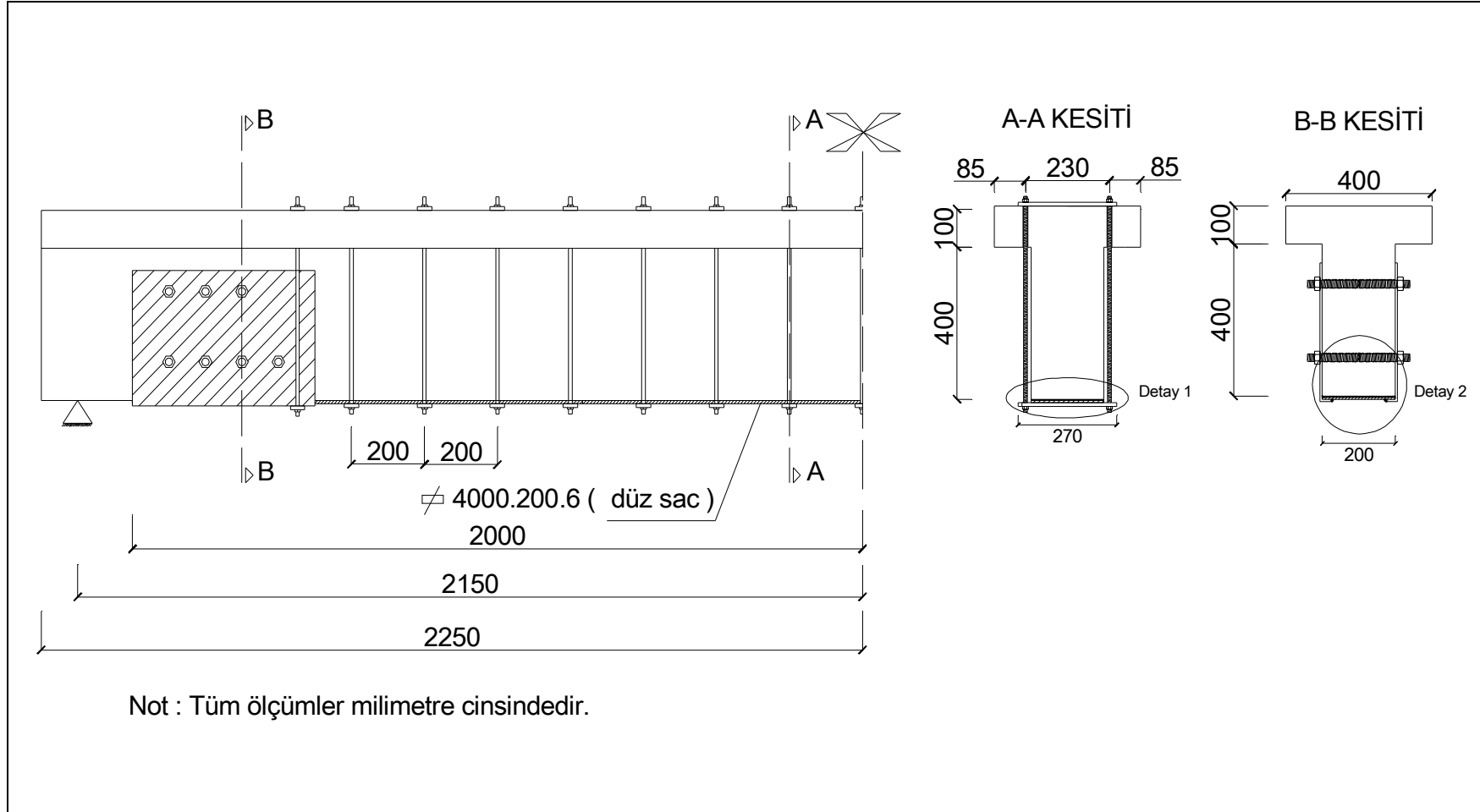
Şekil 4.11. Tam etriyeli deney elemanı S3



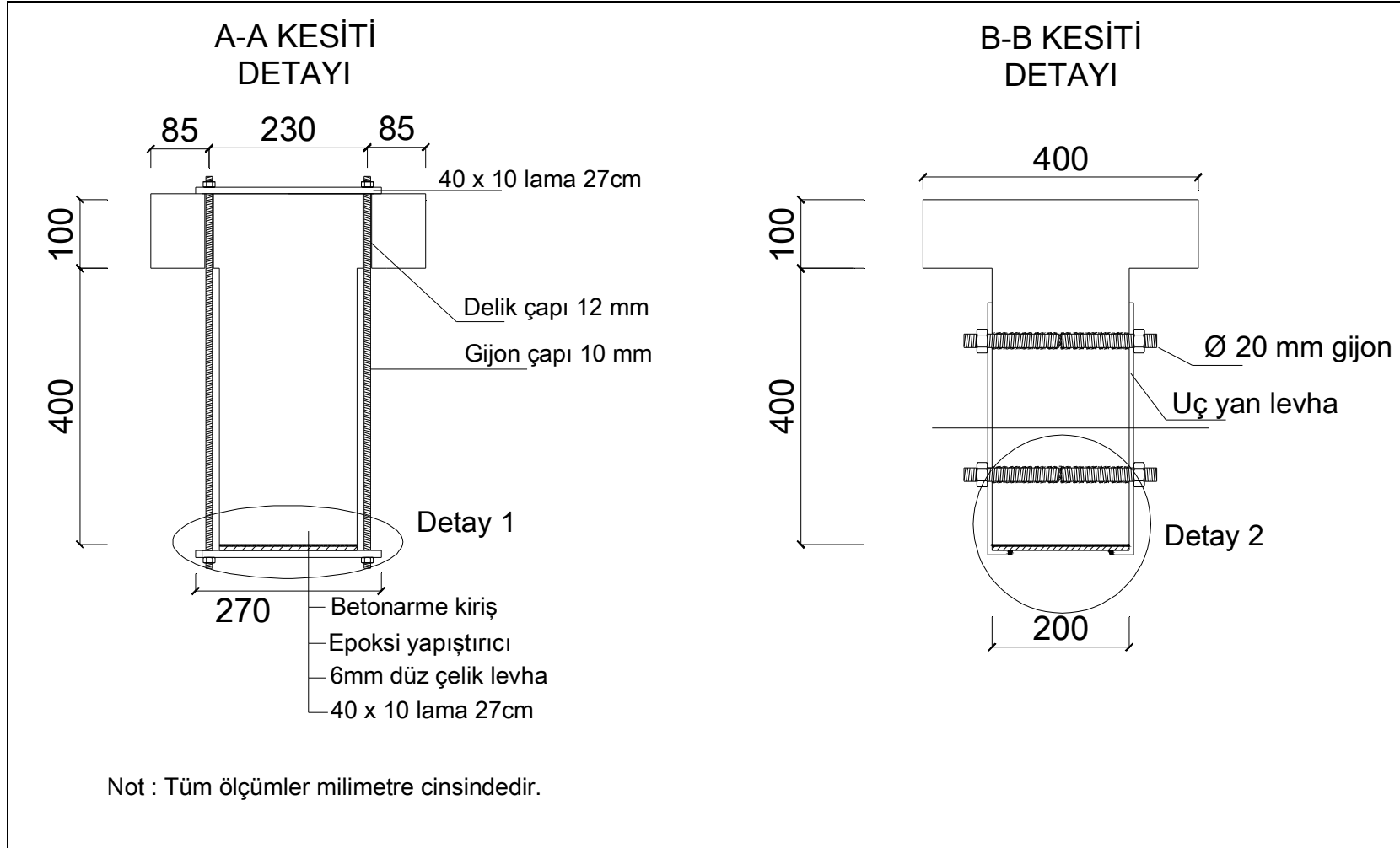
Şekil 4.12. S3 elemanı kesitleri



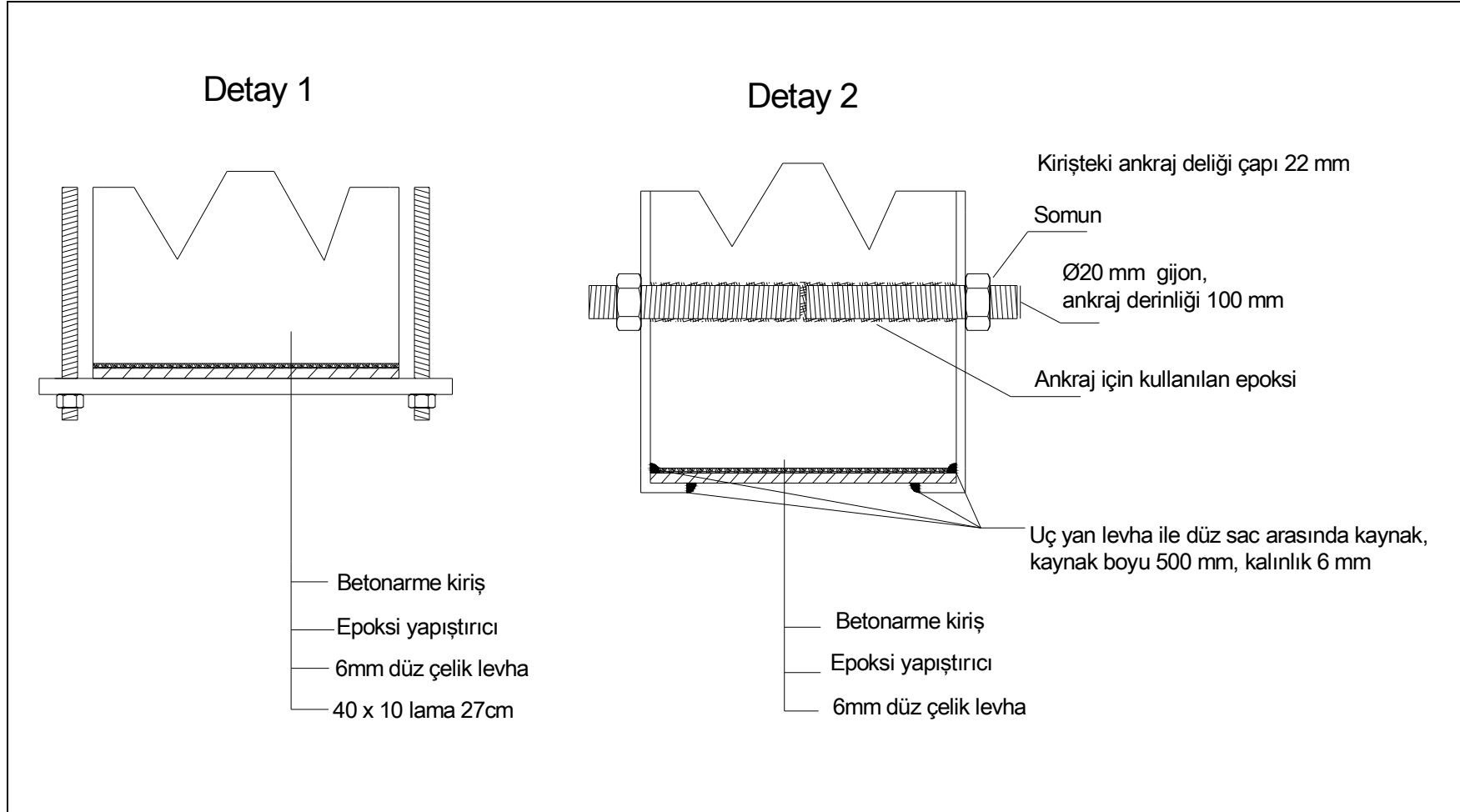
Şekil 4.13. S3 kirişi detayları



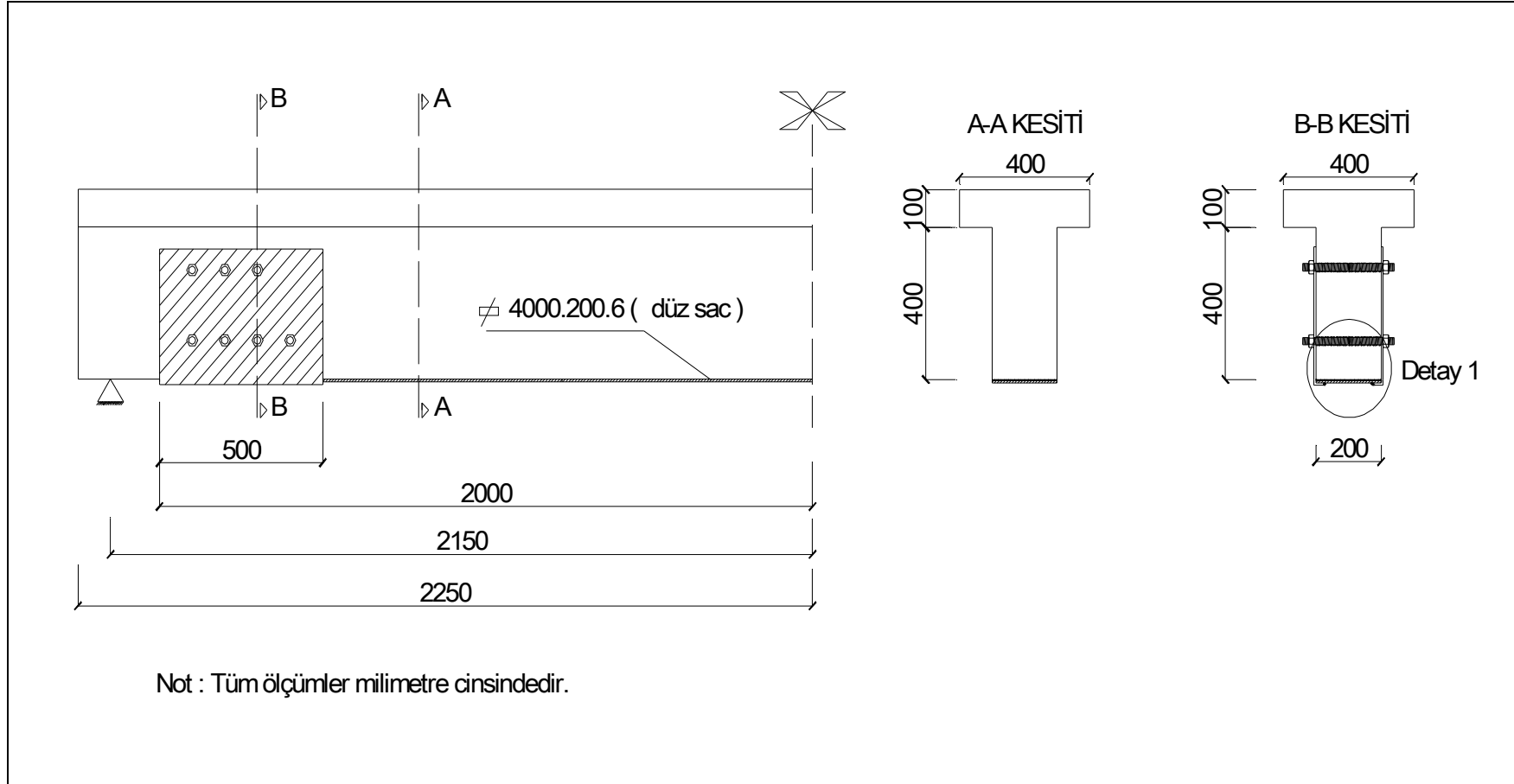
Şekil 4.14. Eksik etriyeli deney elemanı S4



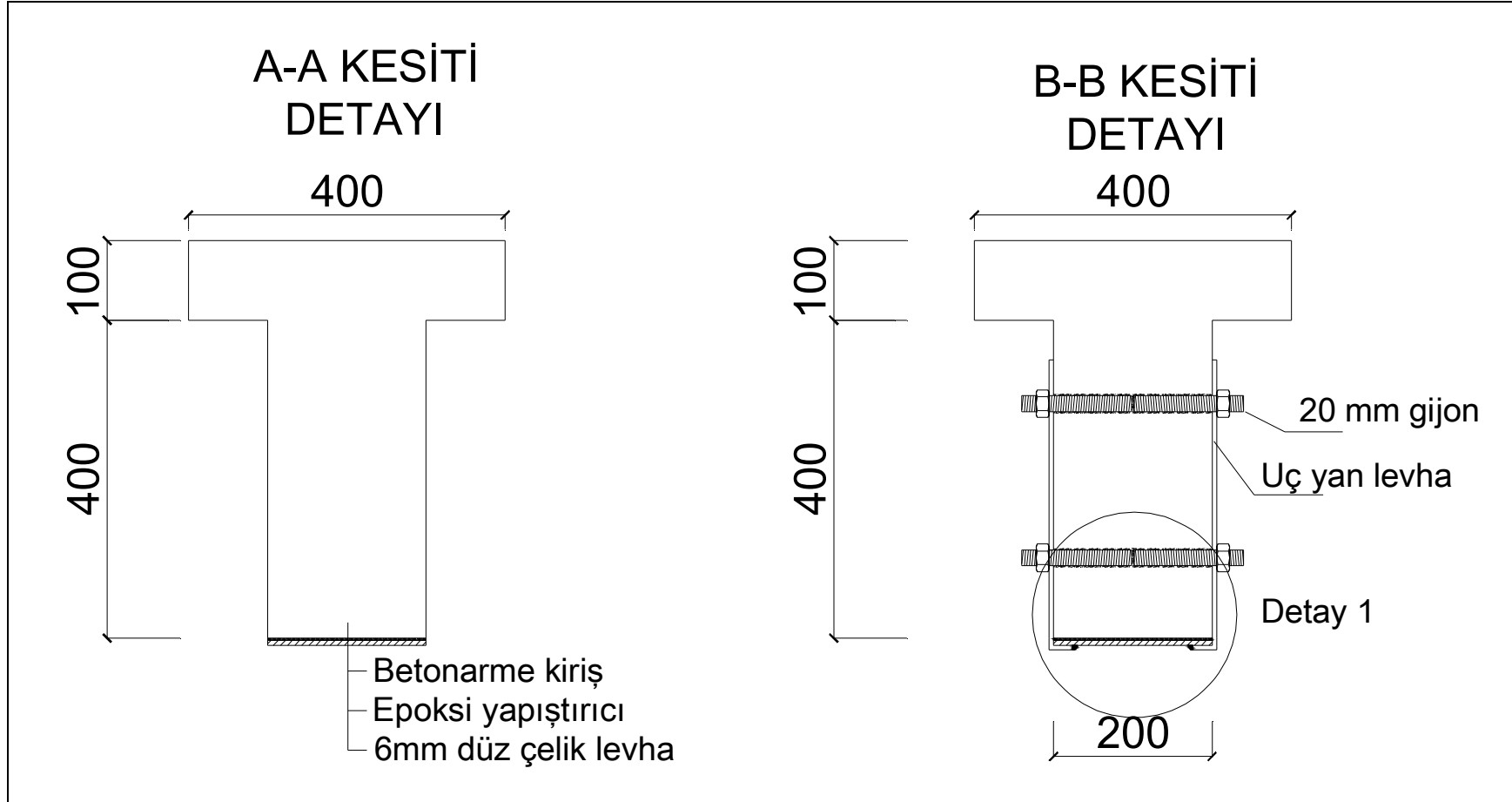
Şekil 4.15. S4 elemanı kesitleri



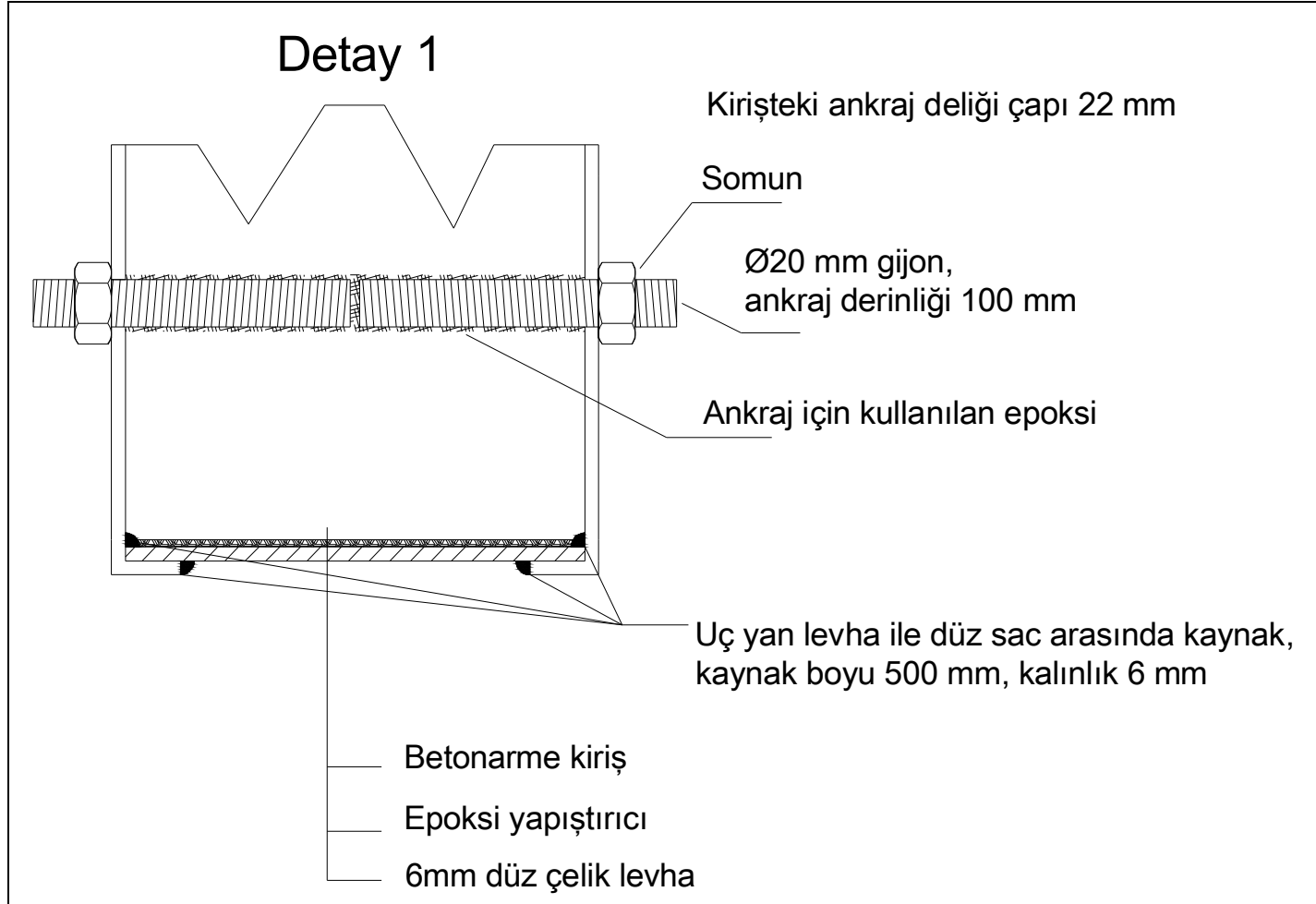
Şekil 4.16. S4 kirişi detayları



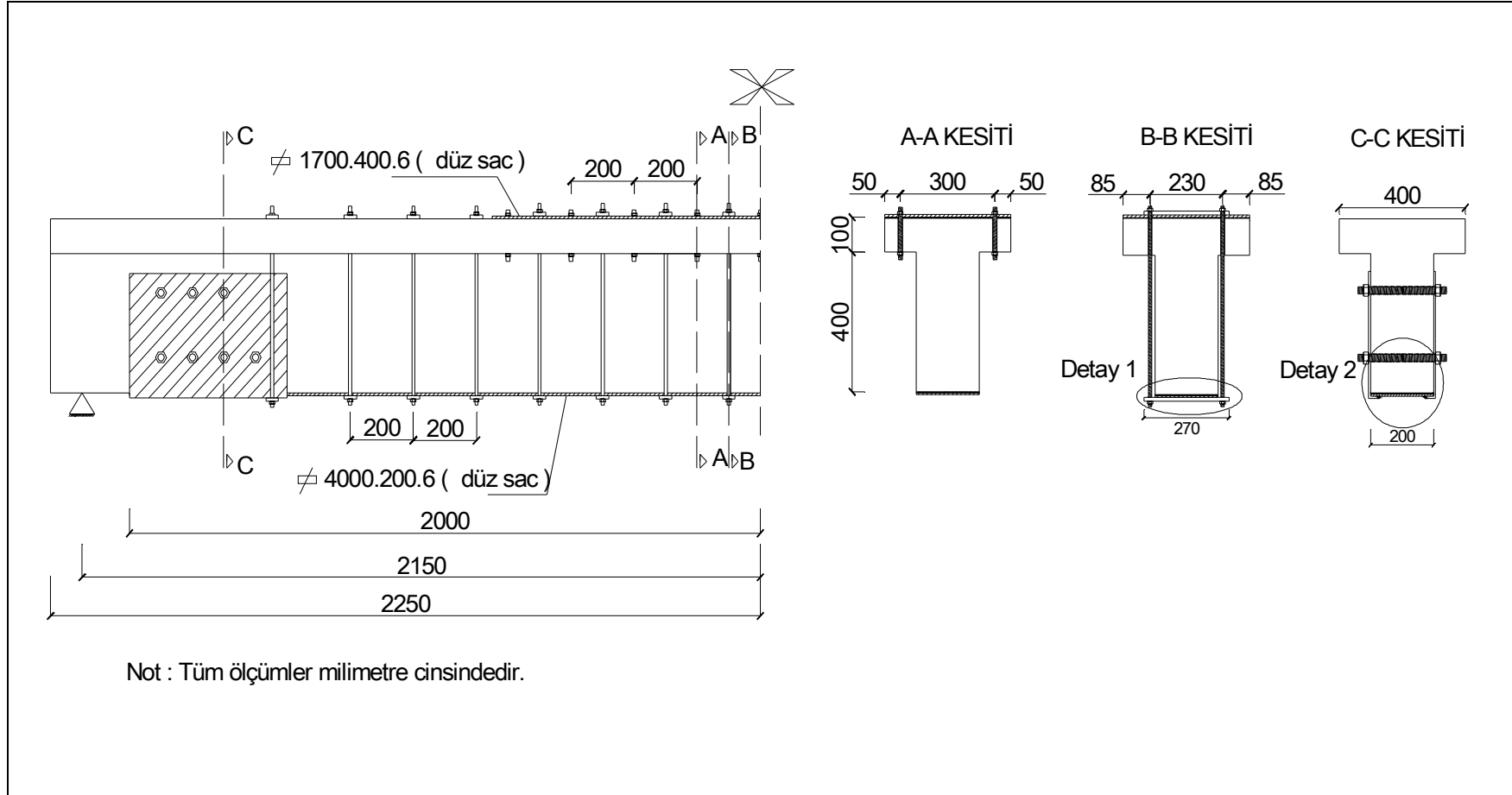
Şekil 4.17. Eksik etriyeli deney elemanı S5



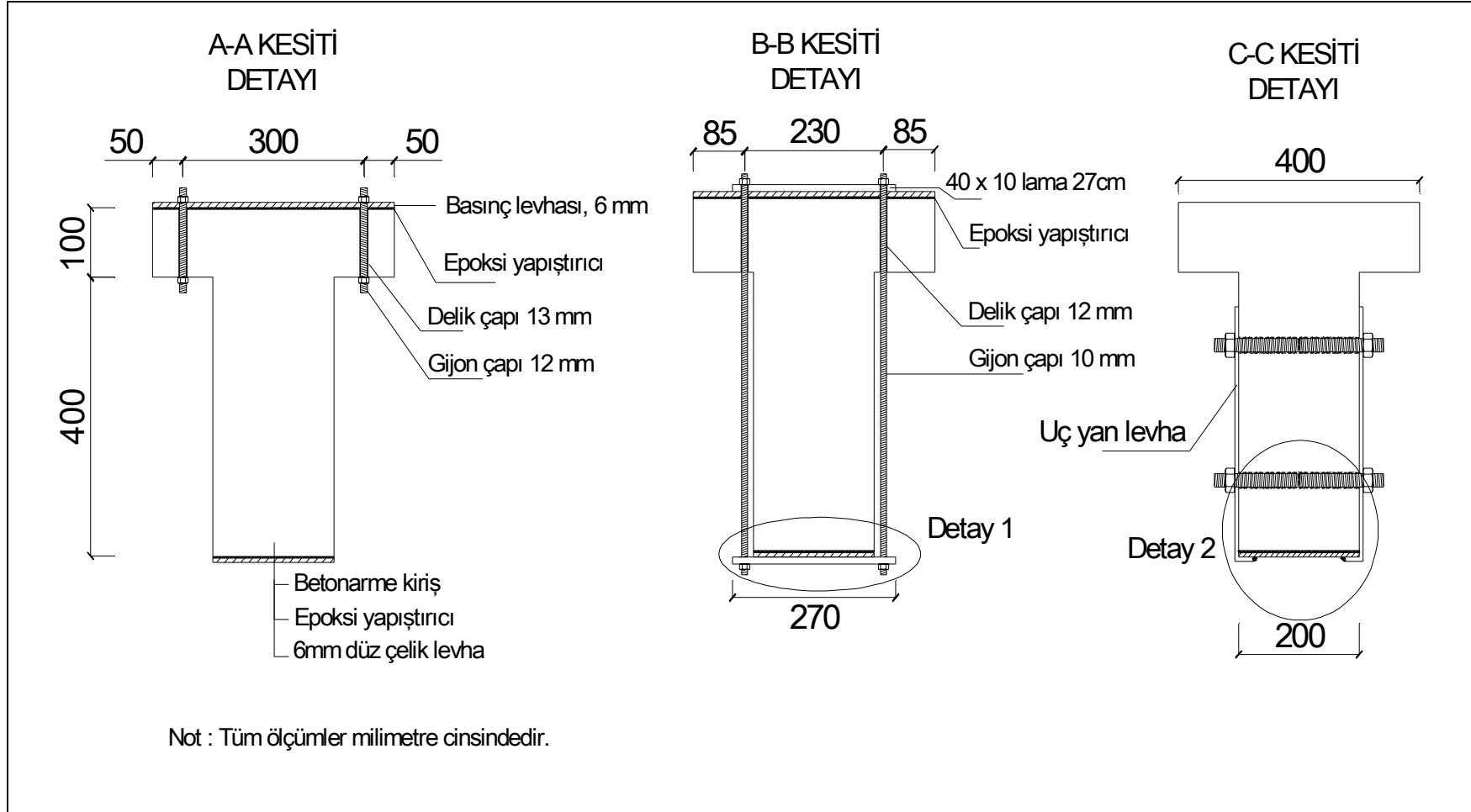
Şekil 4.18. S5 elemanı kesitleri



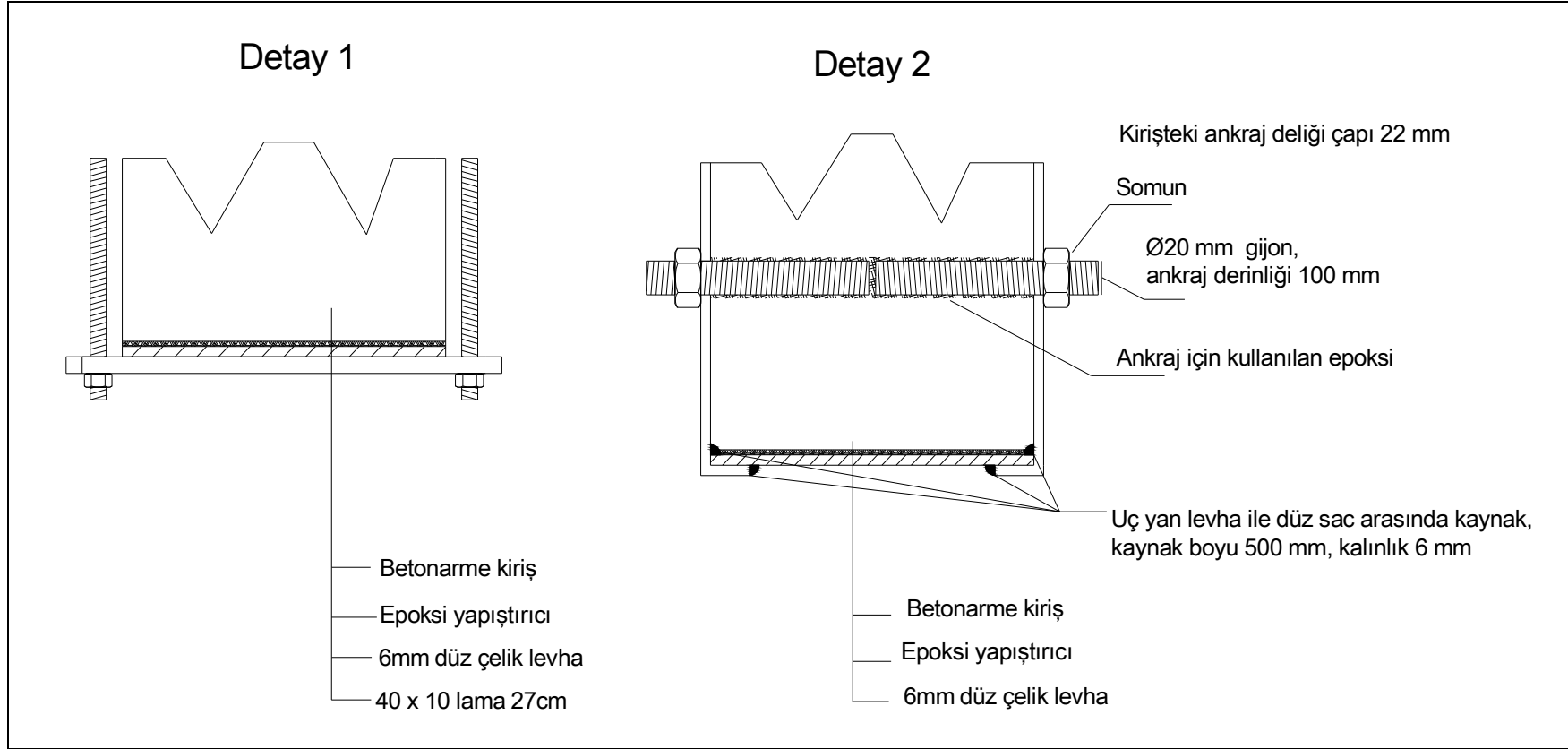
Şekil 4.19. S5 kirişi detayları



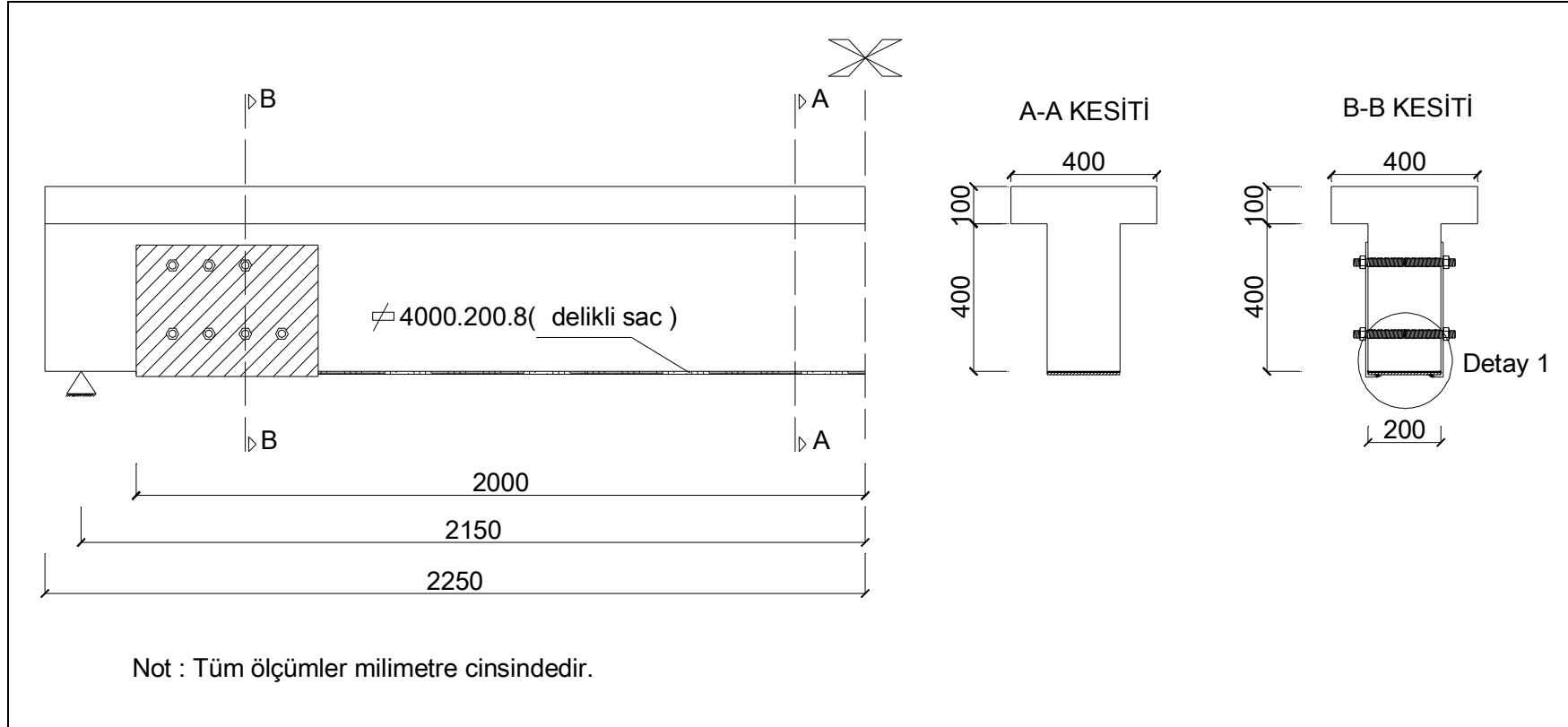
Şekil 4.20. Eksik etriyeli deney elemanı S6



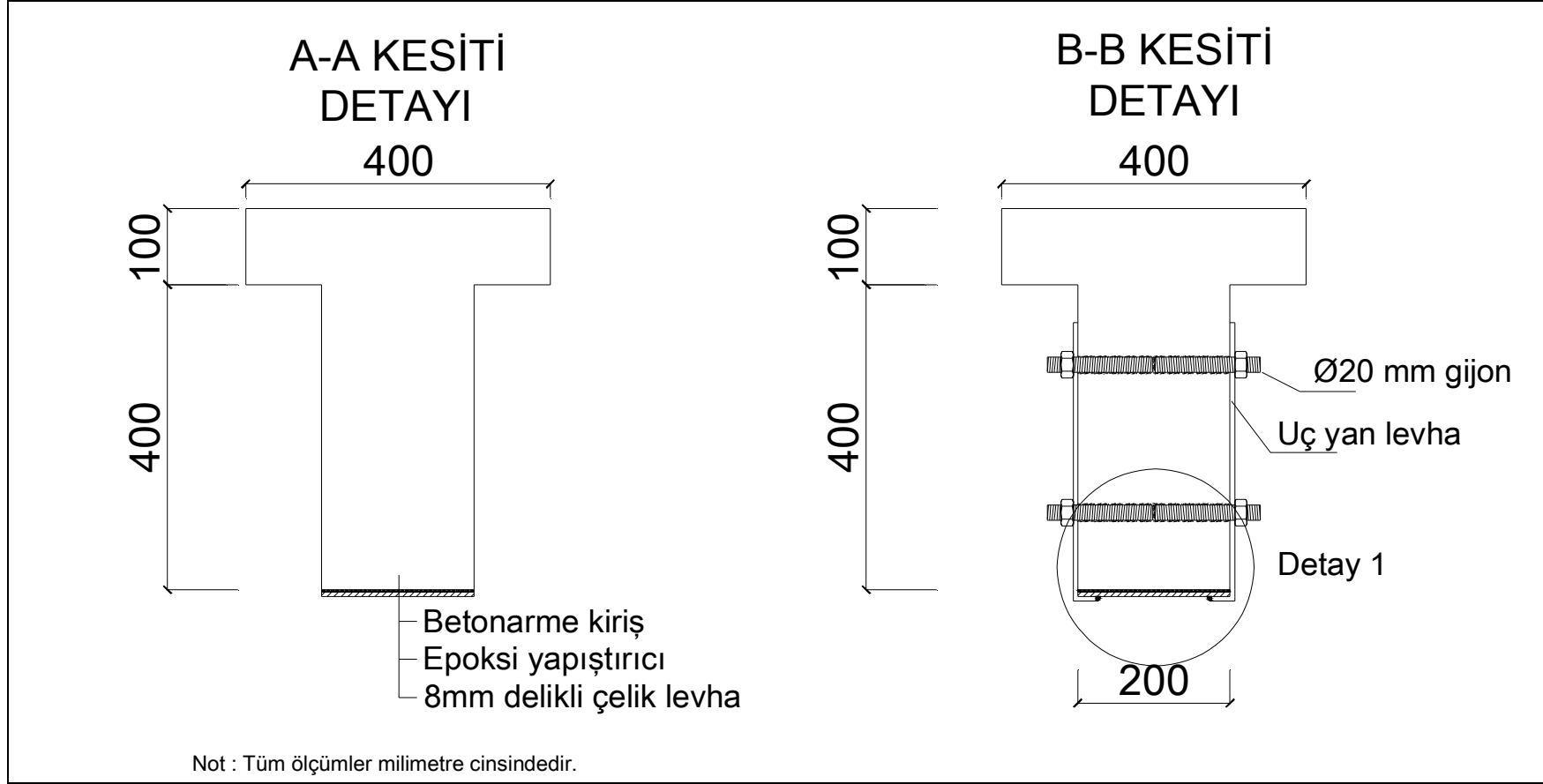
Şekil 4.21. S6 elemanı kesitleri



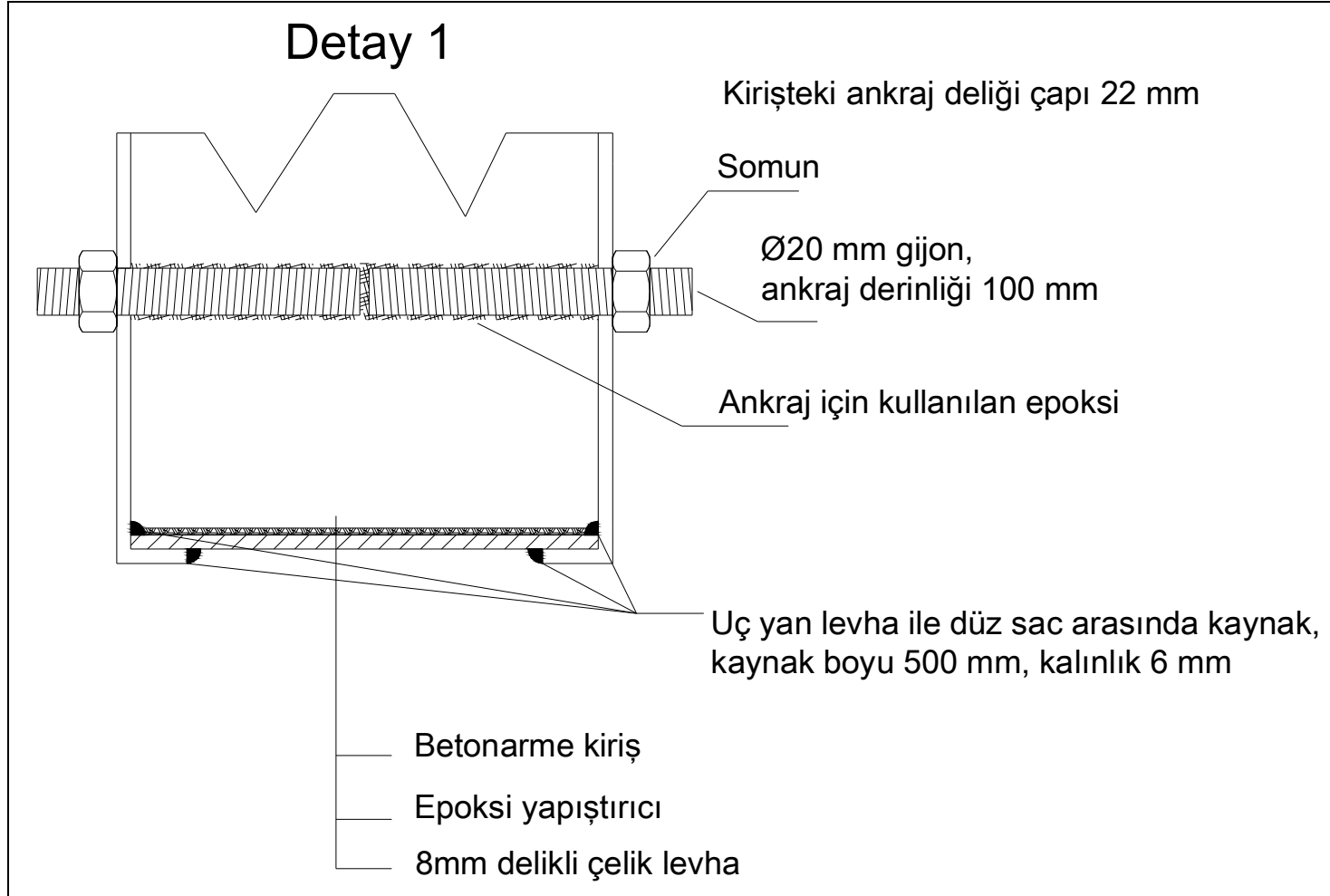
Şekil 4.22. S6 kirişi detayları



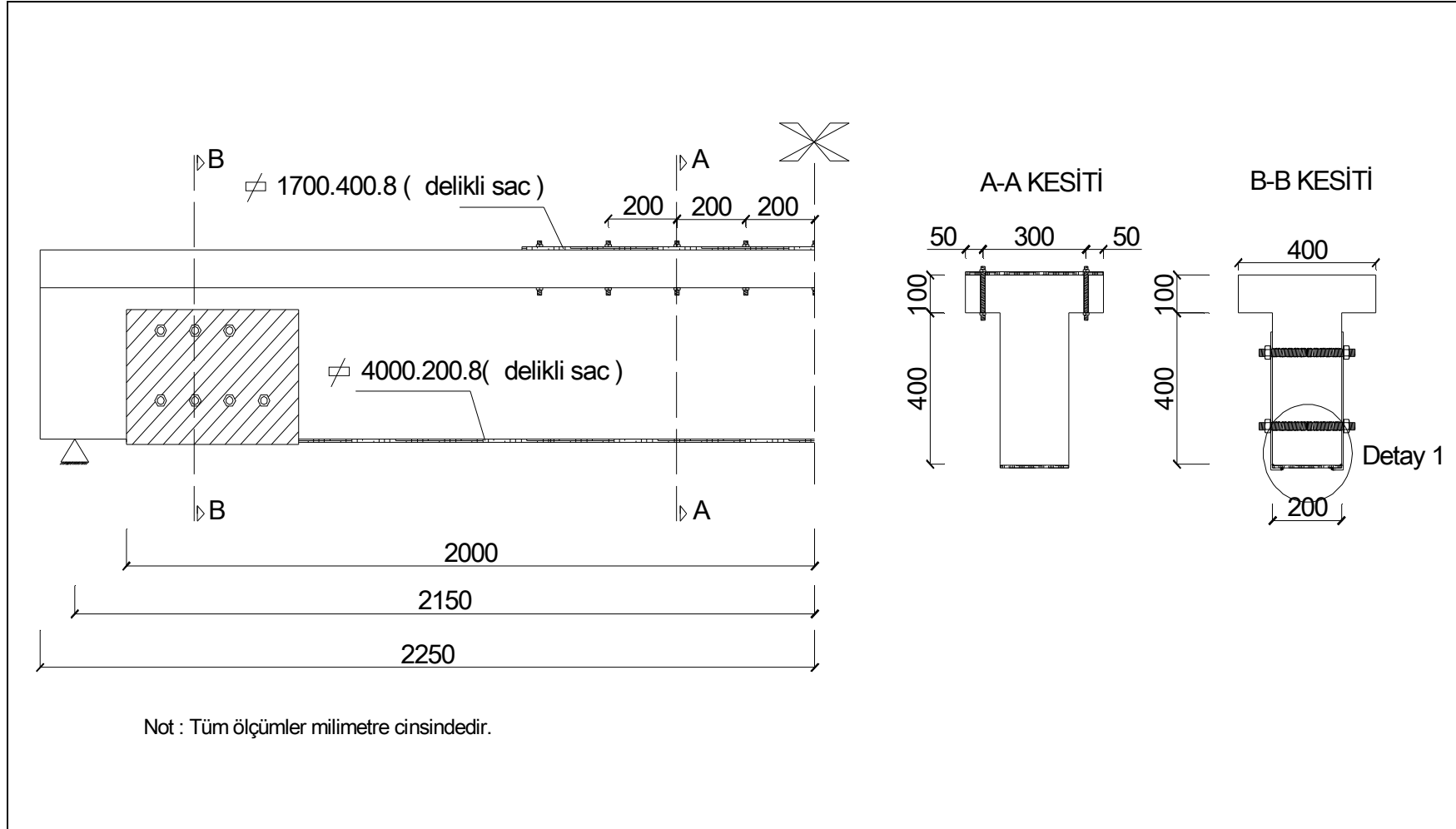
Şekil 4.23. Tam etriyeli deney elemanı S7



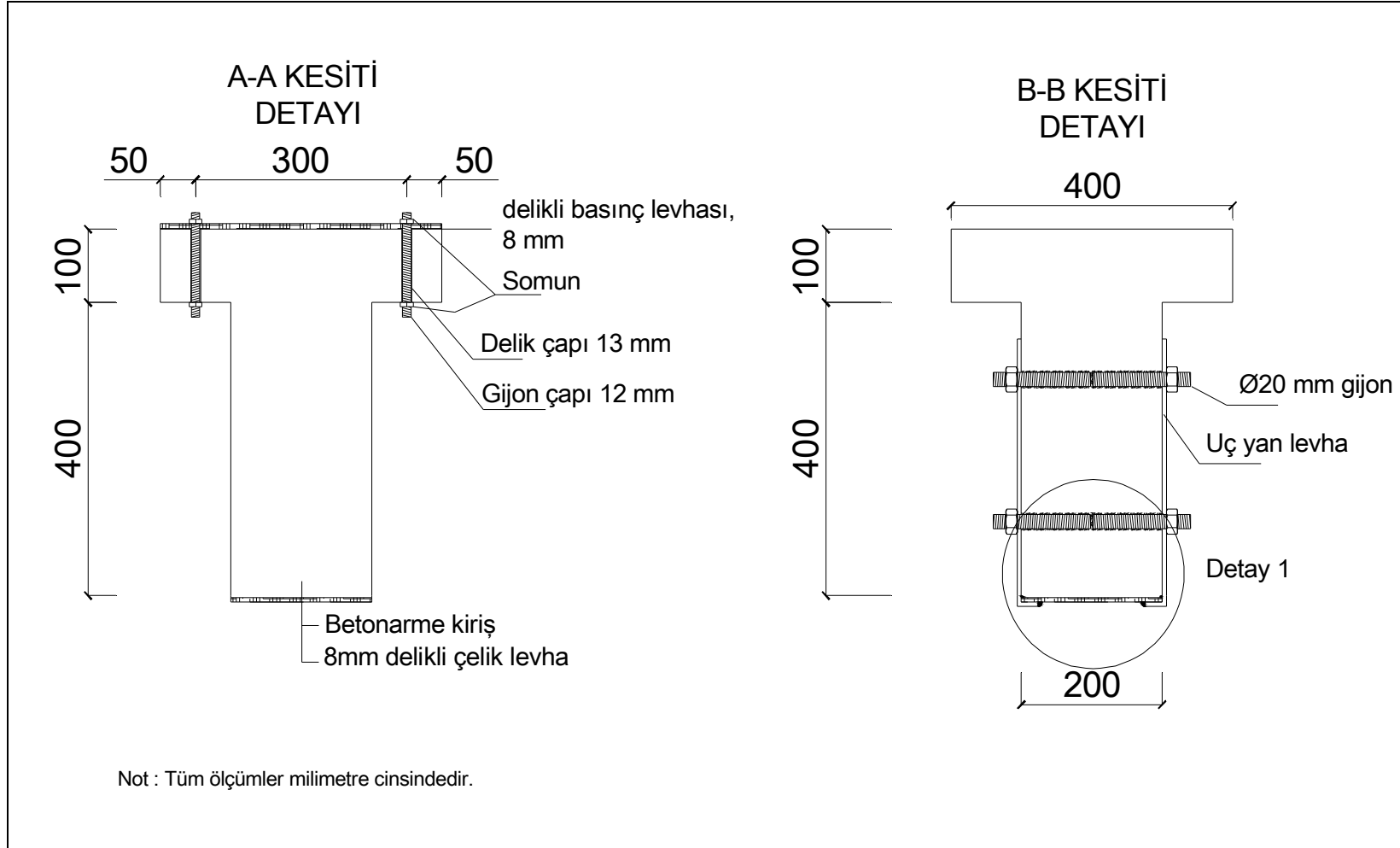
Şekil 4.24. S7 elemanı kesitleri



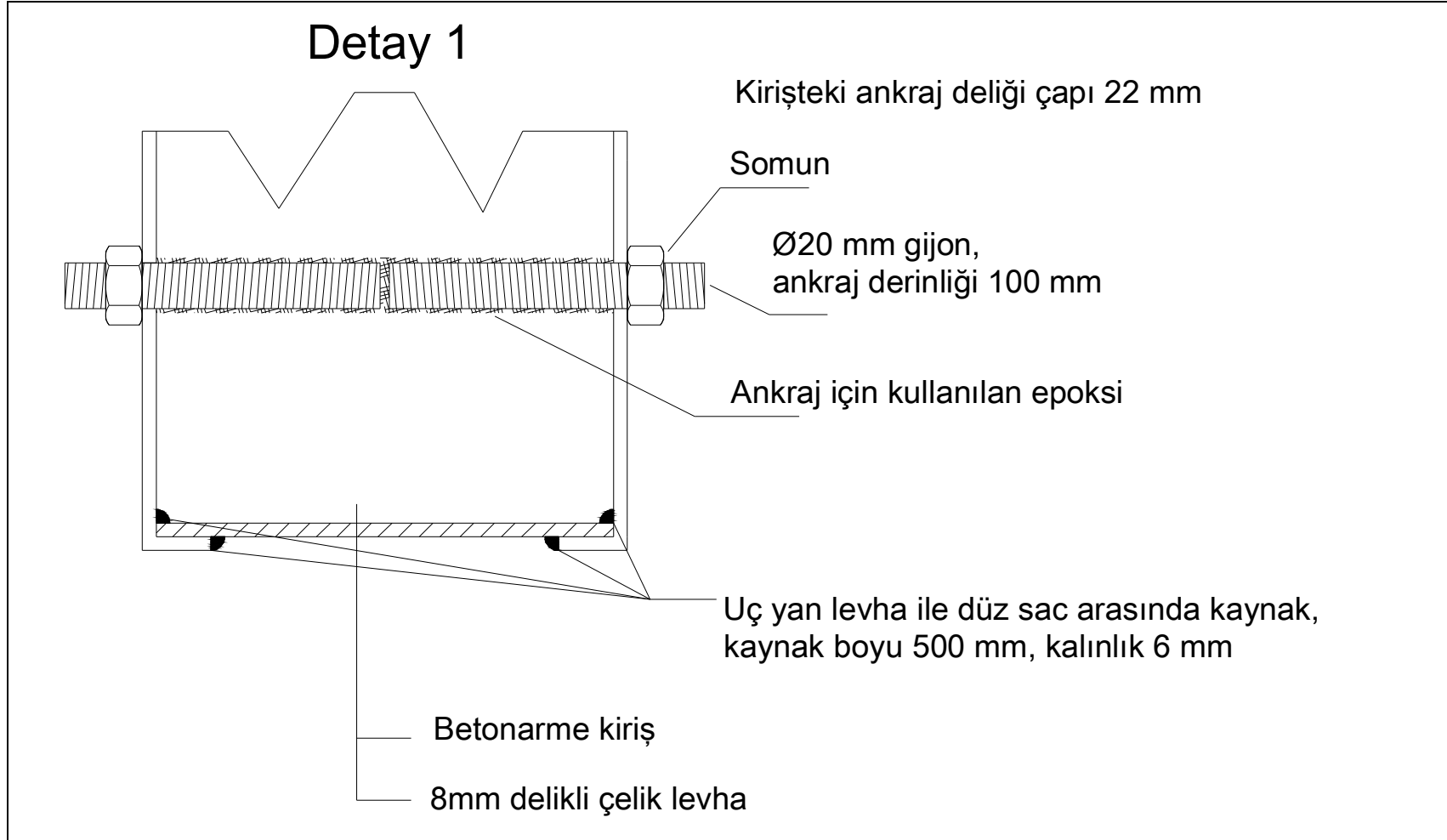
Şekil 4.25. S7 kirişi detayları



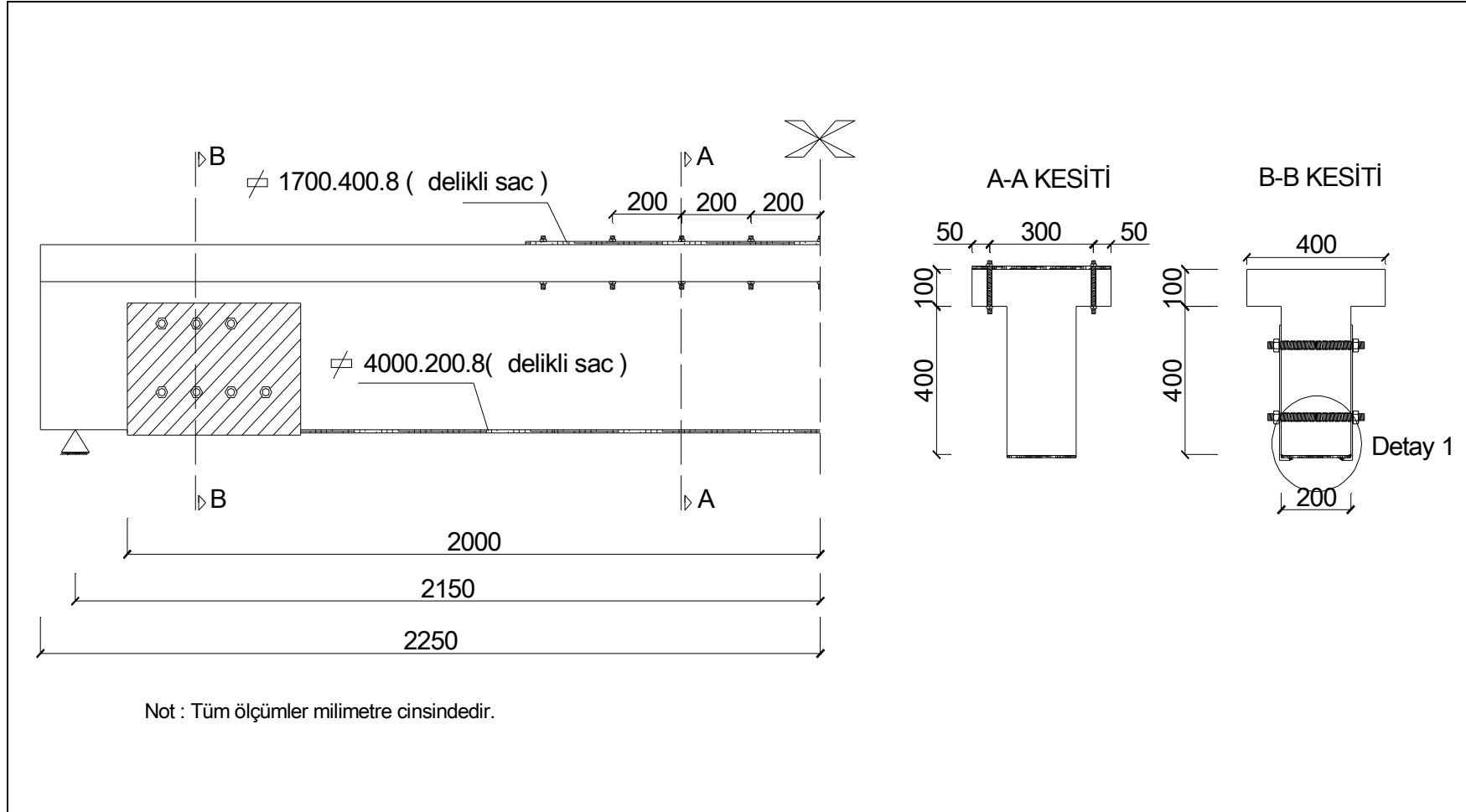
Şekil 4.26. Tam etriyeli deney elemanı S8



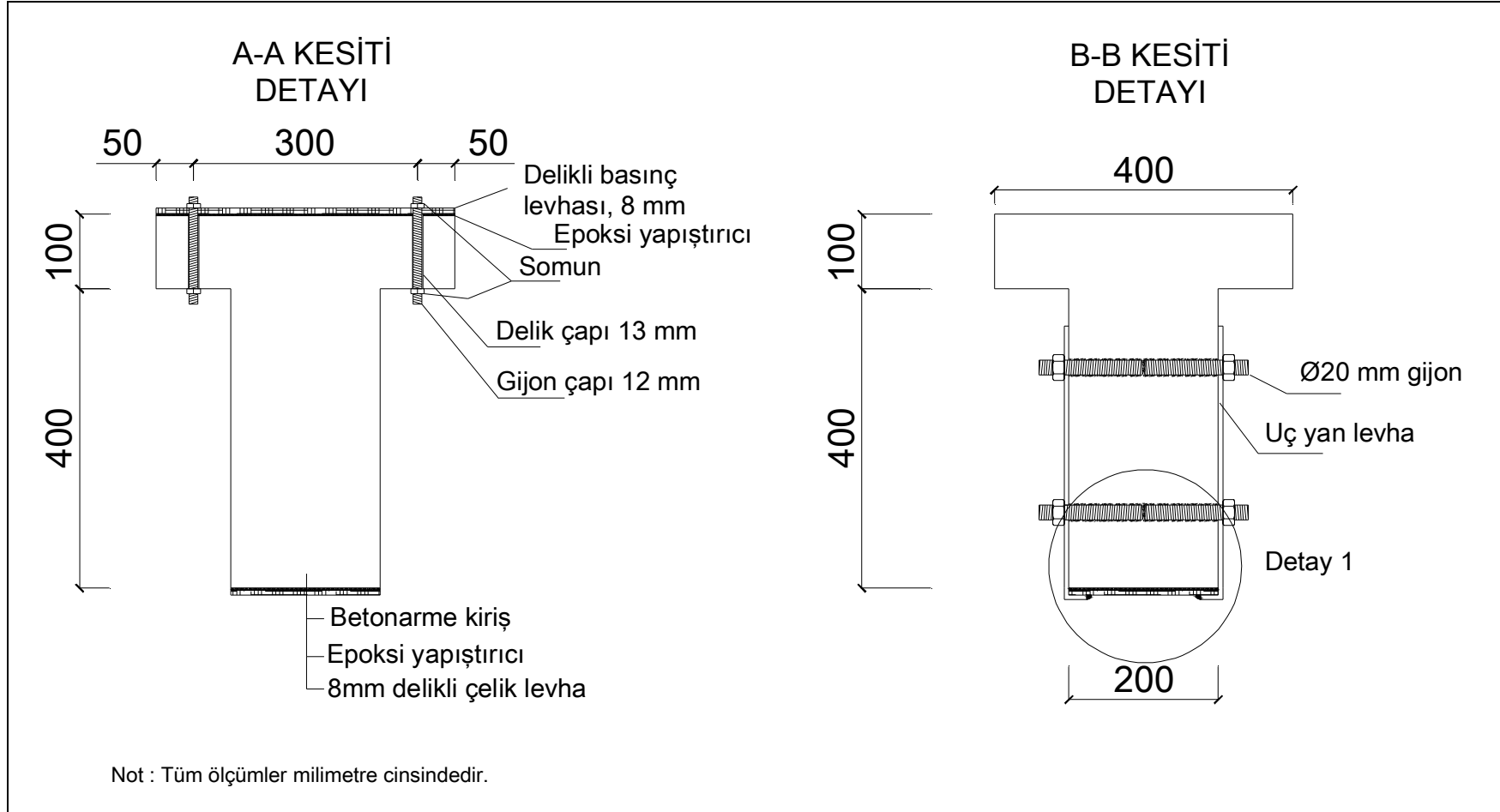
Şekil 4.27. S8 elemanı kesitleri



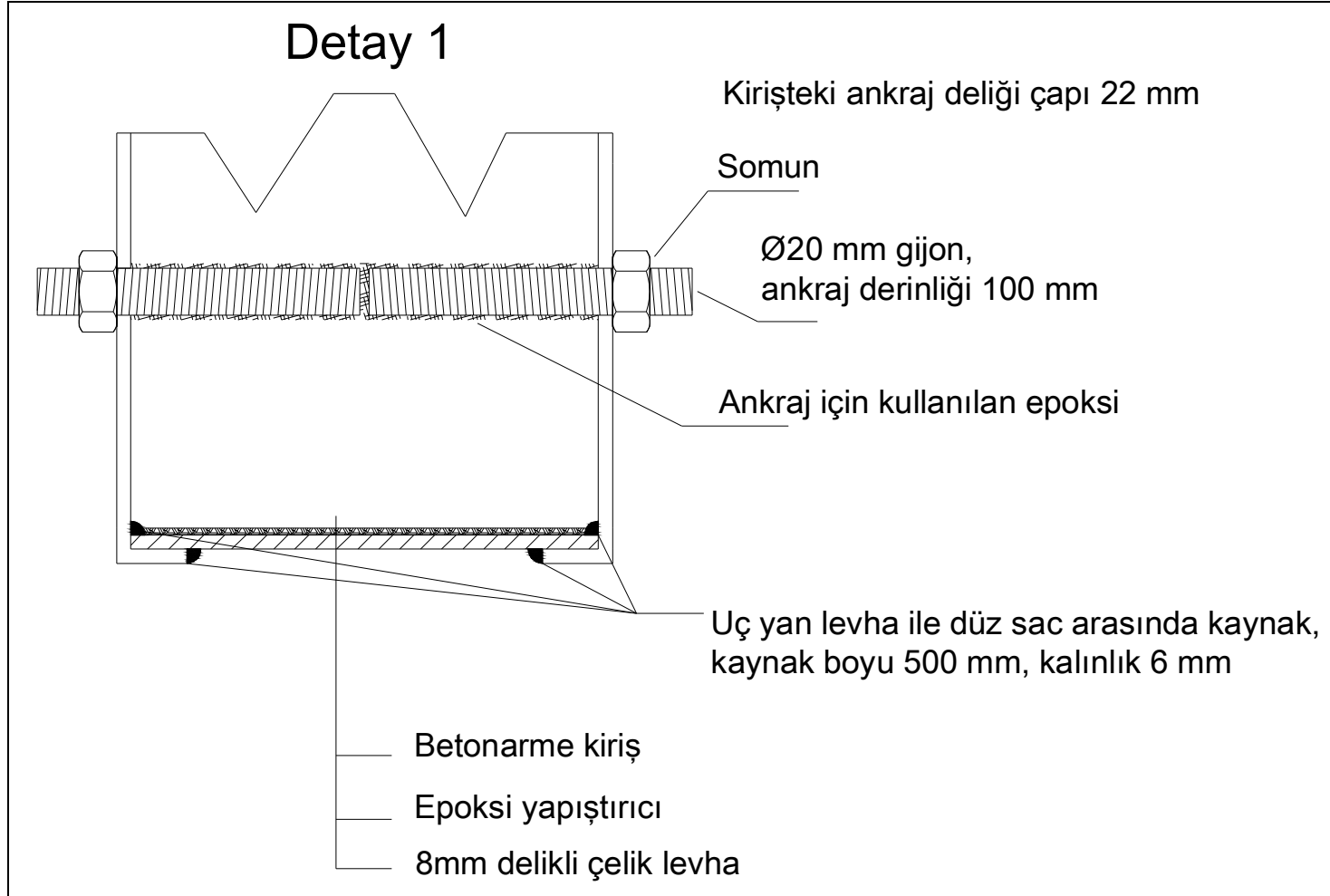
Şekil 4.28. S8 kirişi detayları



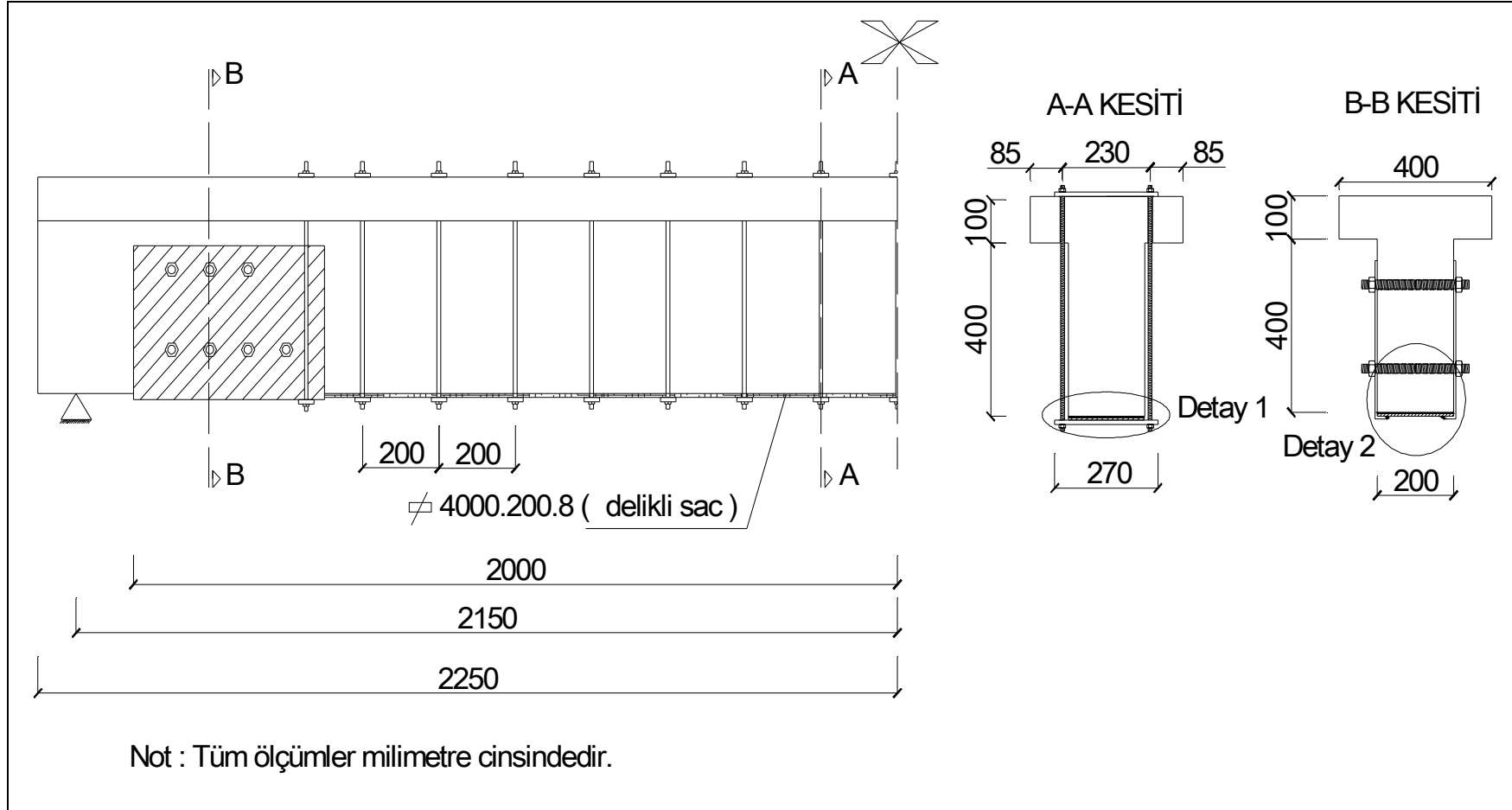
Şekil 4.29. Tam etriyeli deney elemanı S9



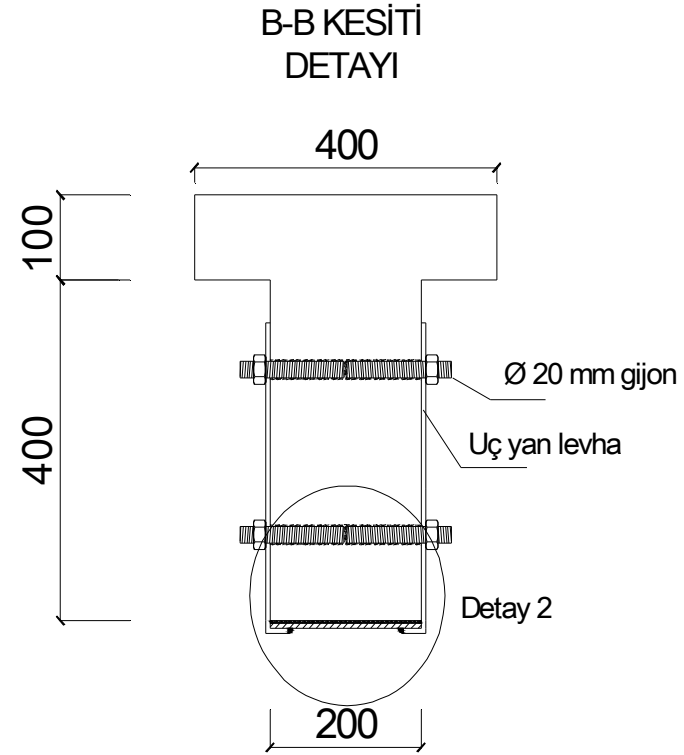
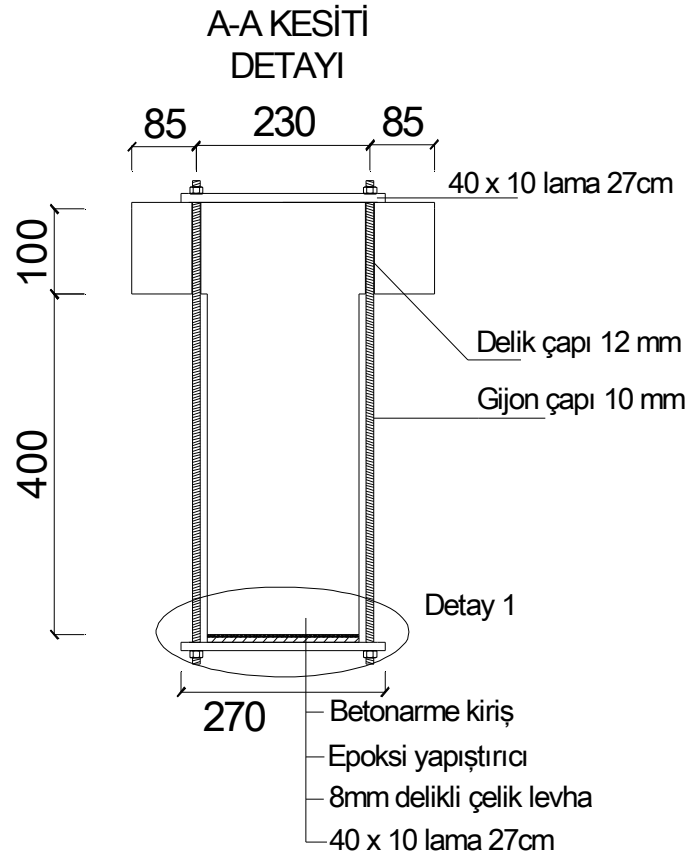
Şekil 4.30. S9 elemanı kesitleri



Şekil 4.31. S9 kirişi detayları

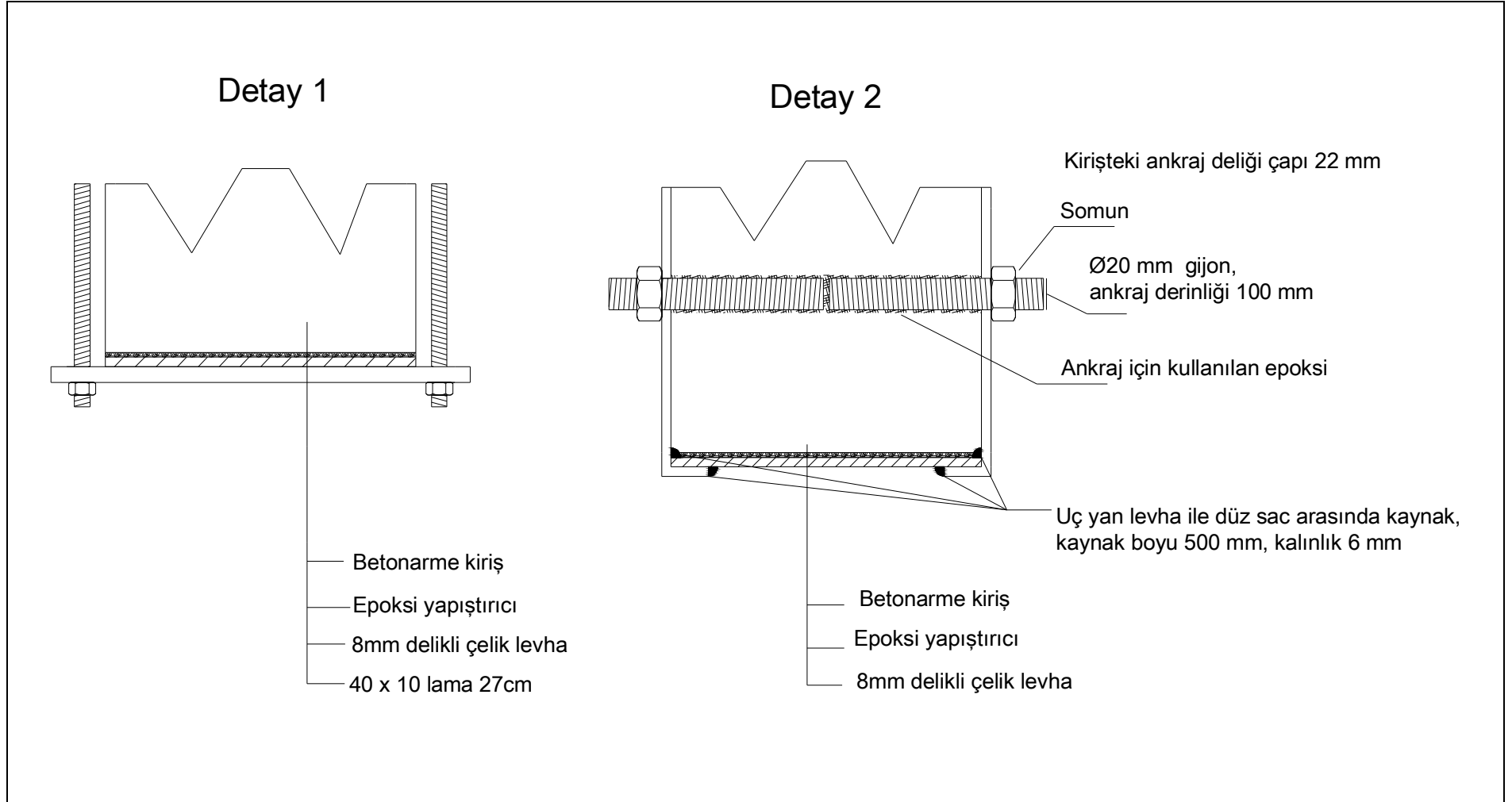


Şekil 4.32. Eksik etriyeli deney elemanı S10

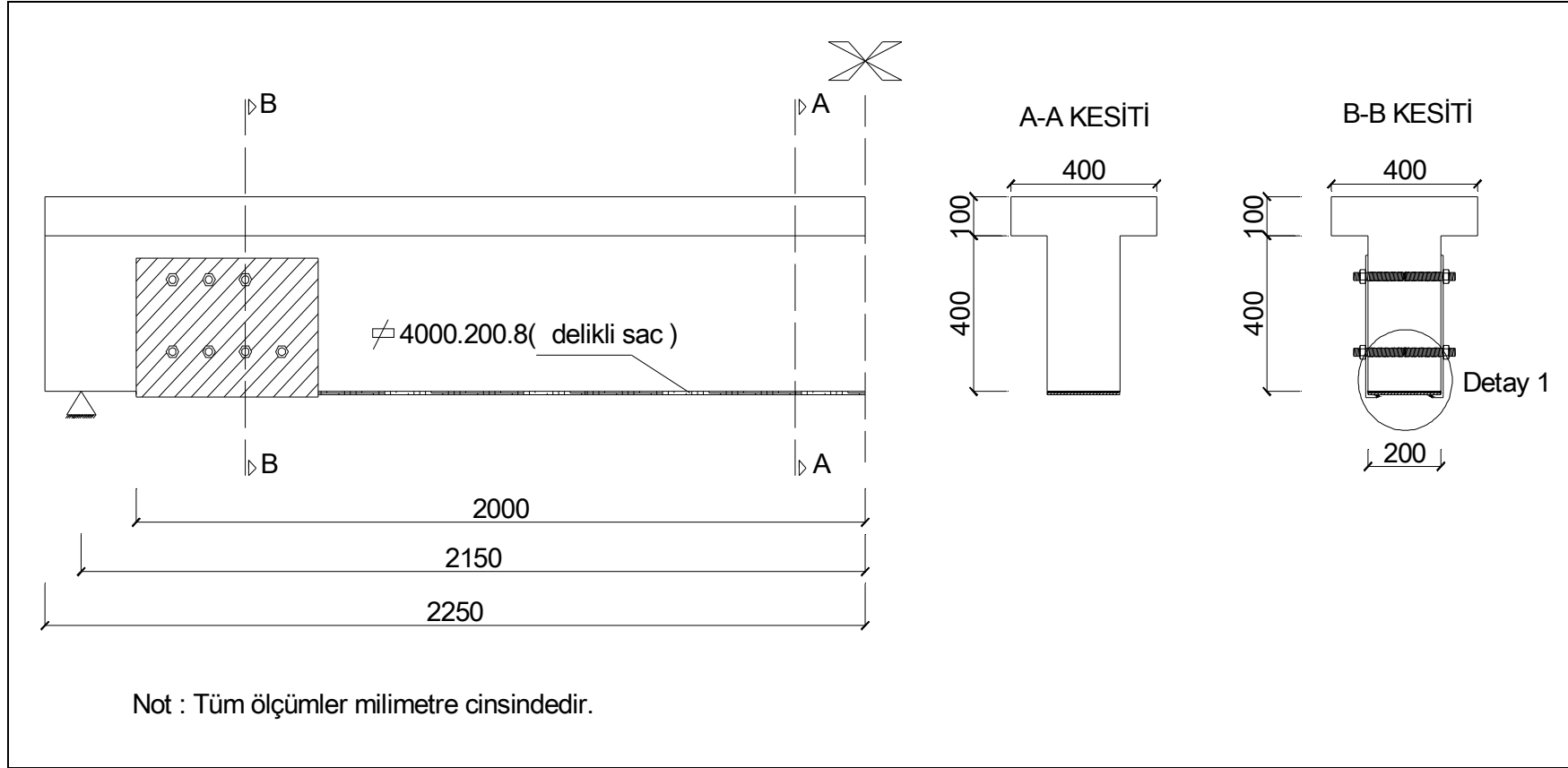


Not : Tüm ölçümler milimetre cinsindedir.

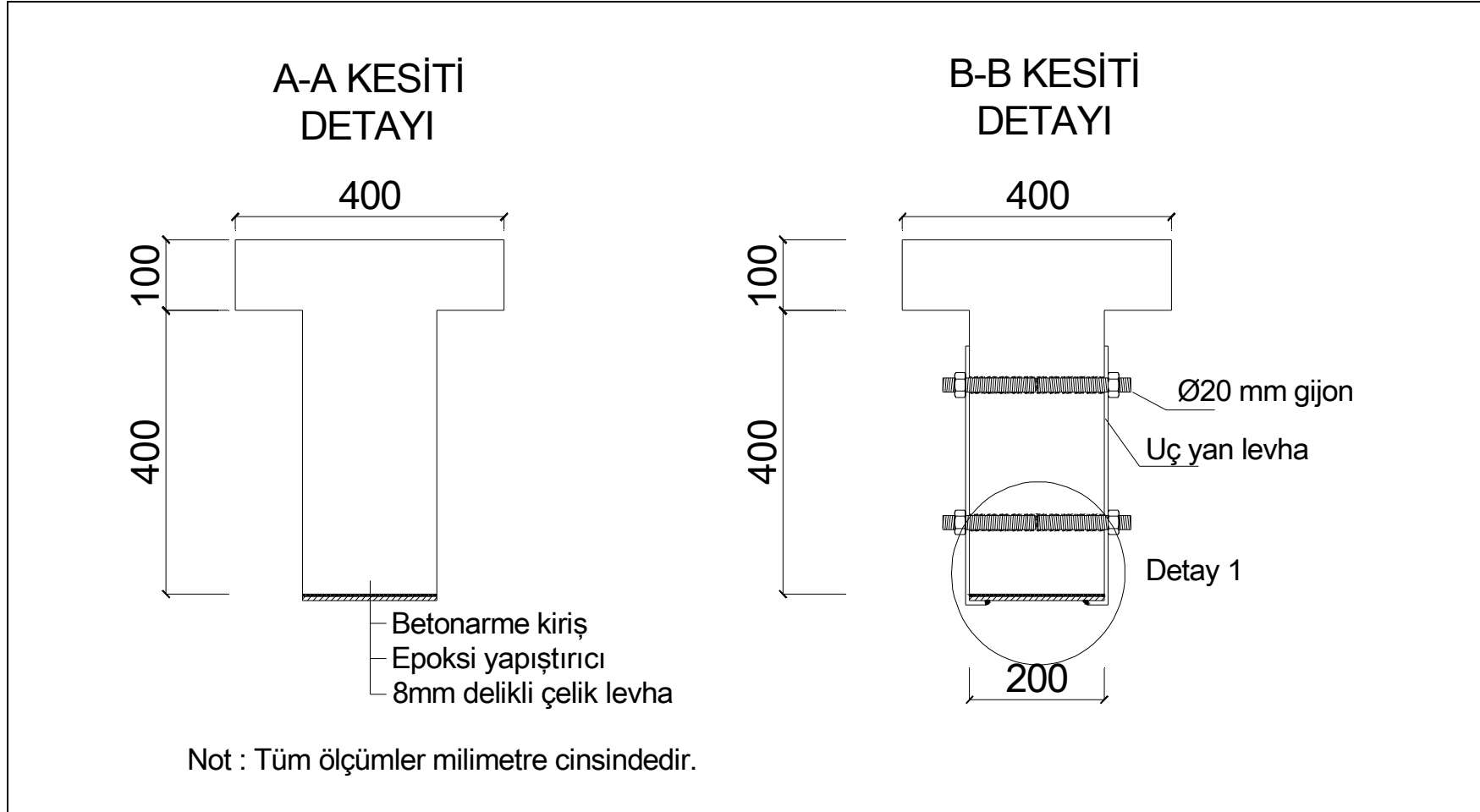
Şekil 4.33. S9 elemanı kesitleri



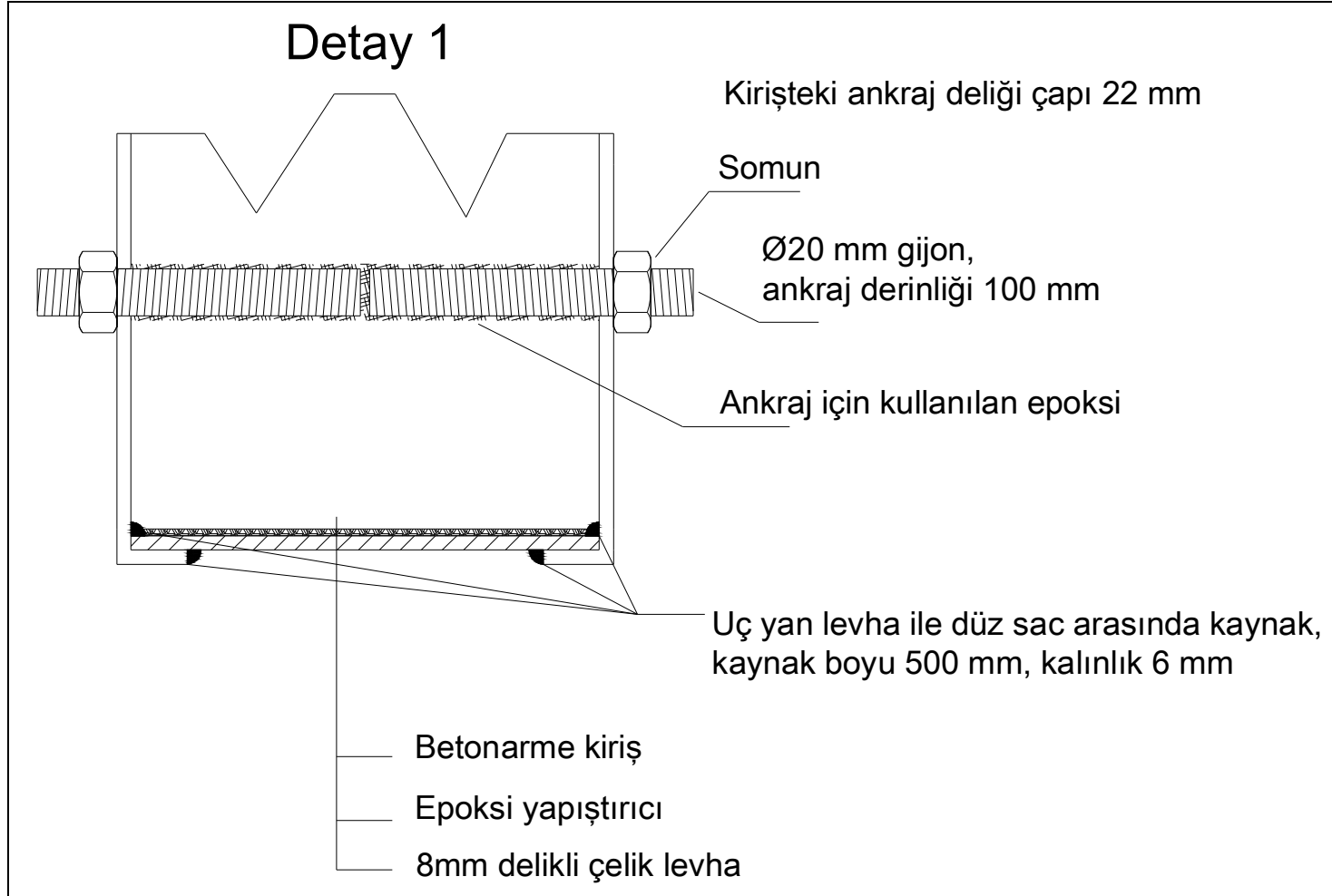
Şekil 4.34. S10 kirişi detayları



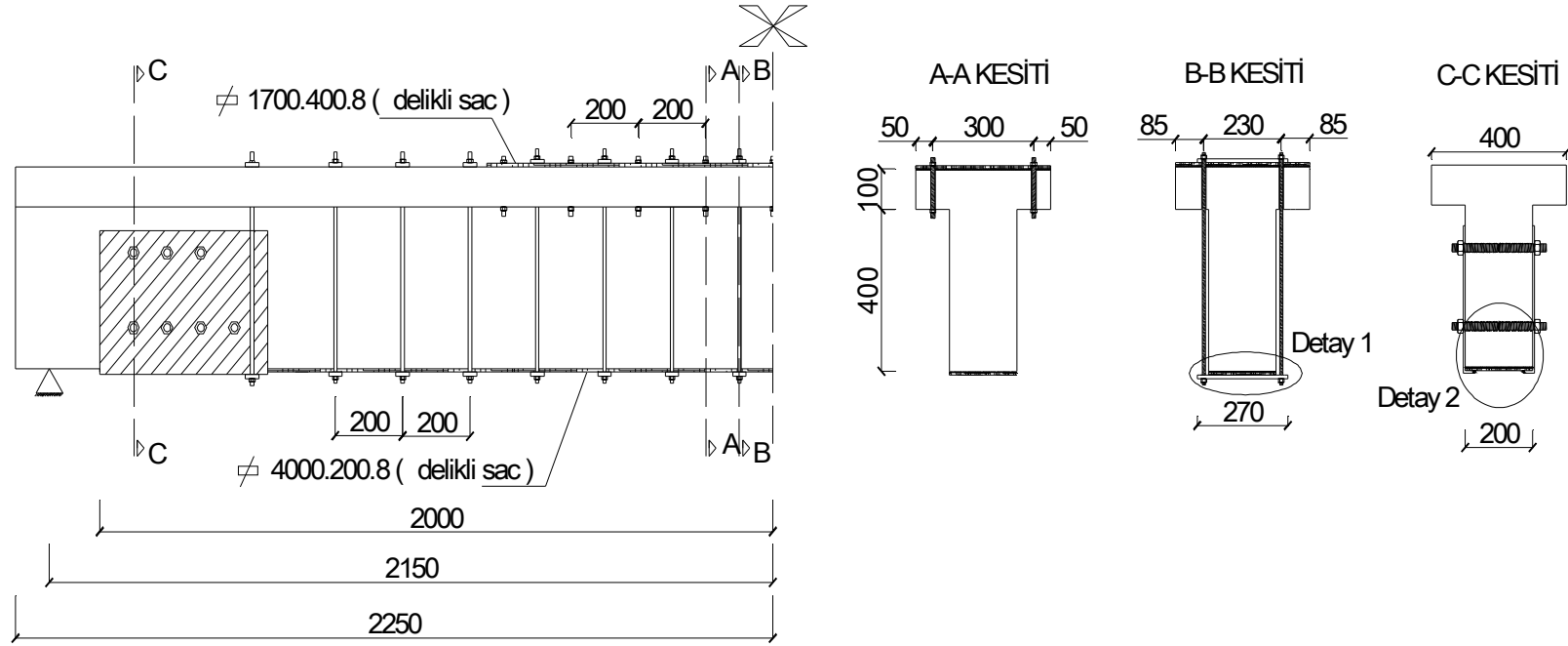
Şekil 4.35. Eksik etriyeli deney elemanı S11



Şekil 4.36. S11 elemanı kesitleri

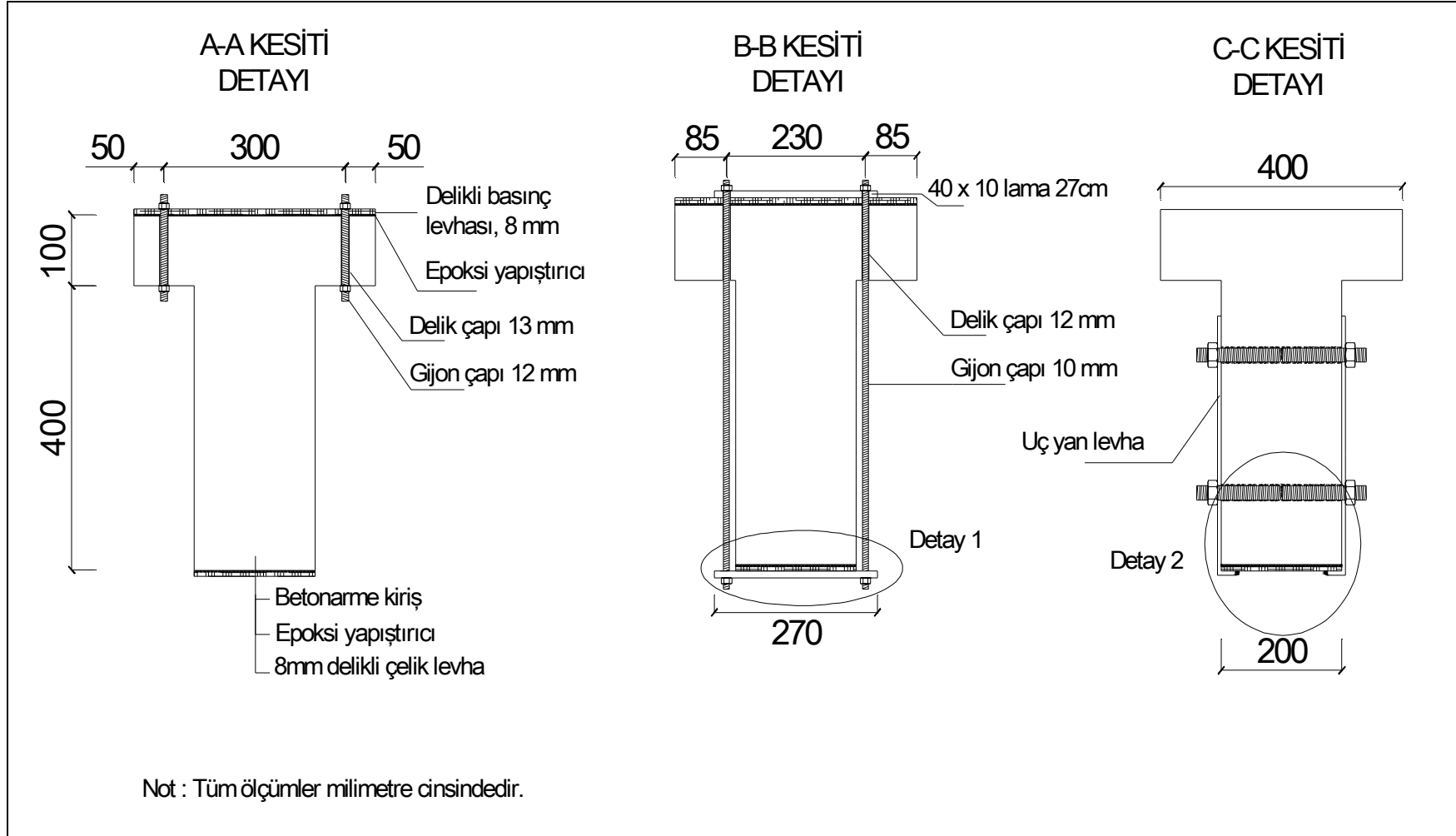


Şekil 4.37. S11 kirişi detayları

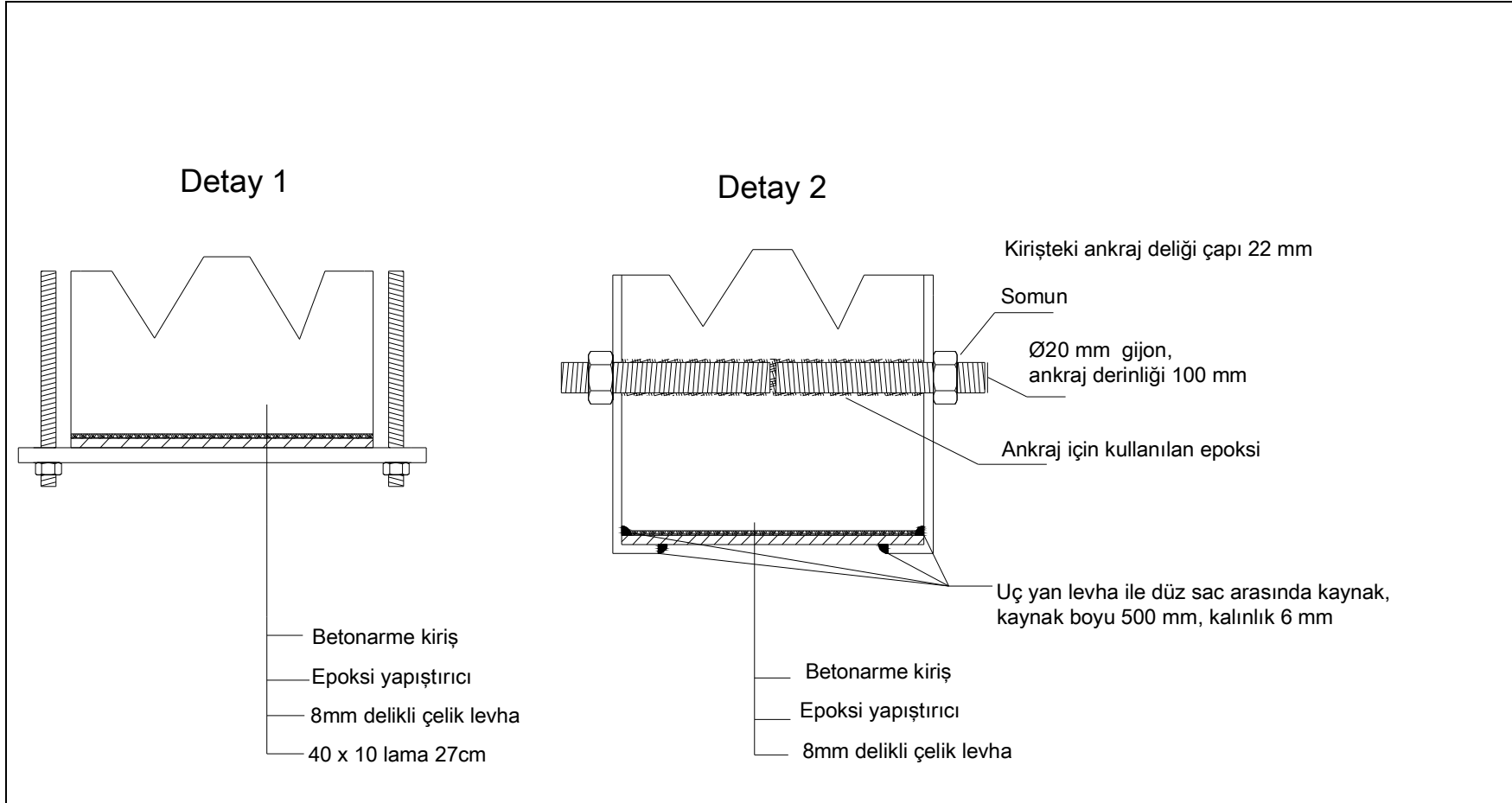


Not : Tüm ölçümler milimetre cinsindedir.

Şekil 4.38. Eksik etriyeli deney elemanı S12



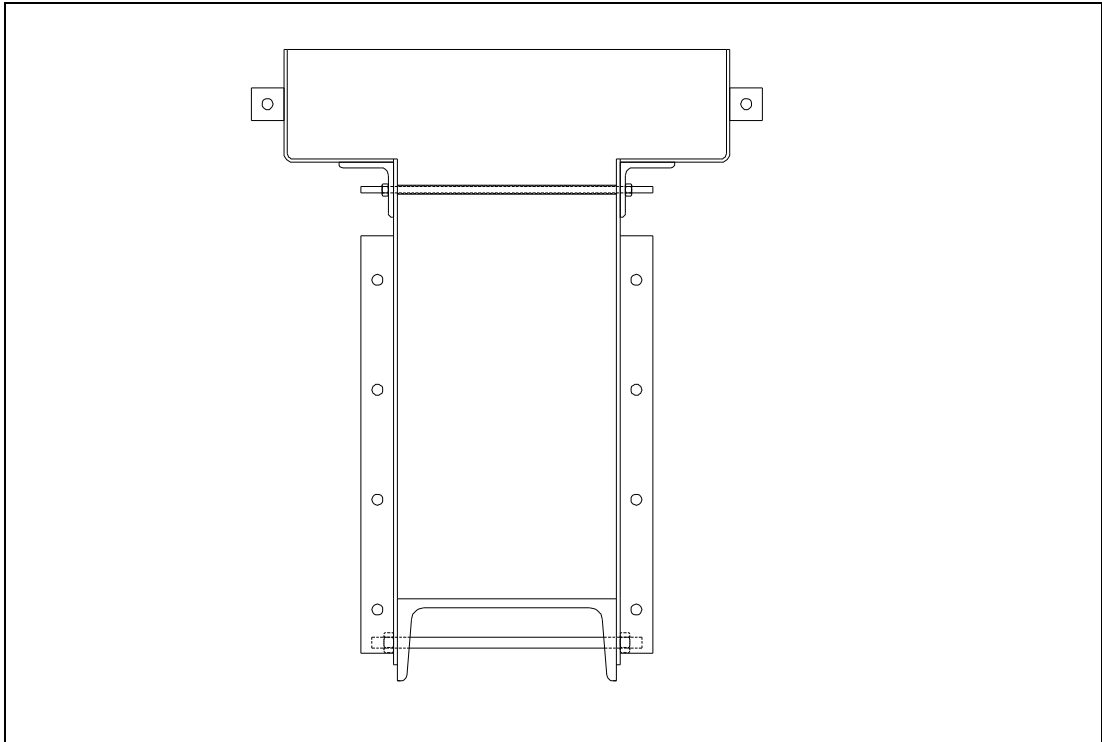
Şekil 4.39. S12 elemanı kesitleri



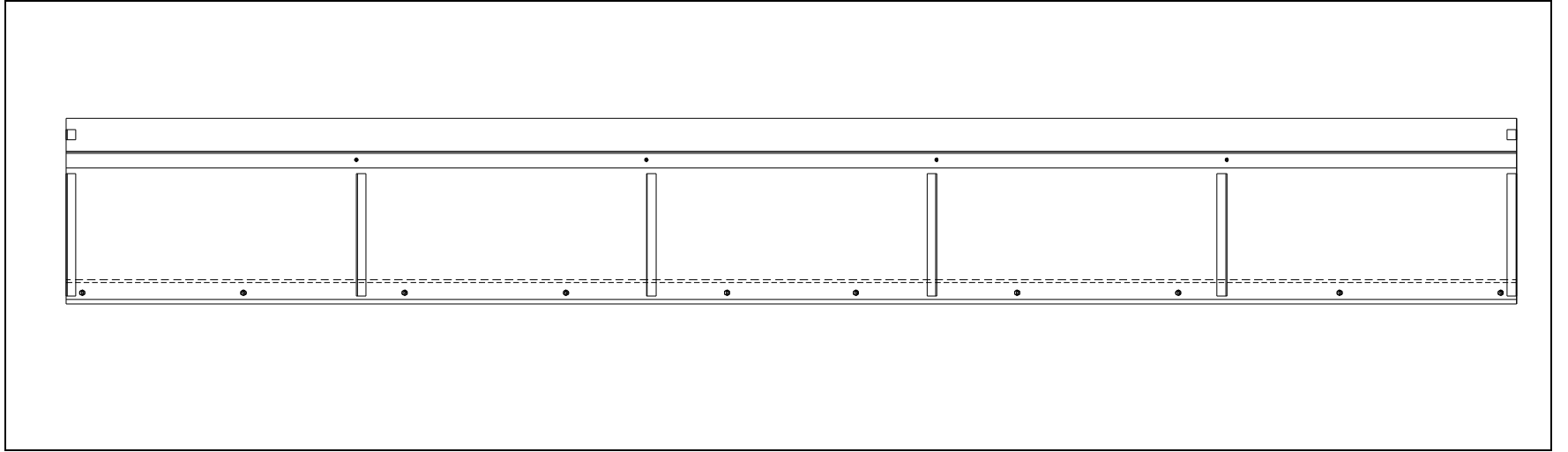
Şekil 4.40. S12 kirişi detayları

4.2. Deney elemanlarının kalıpları

Deney elemanları için bir kalıp tasarlanmış, çelik sac ve profiller kullanılarak imal edilmiştir. Bütün deney elemanları aynı kalıpta teker teker üretilmiştir. Kullanılan sacın kalınlığı 3mm'dir. Sistem basitçe U200 profile oturan ön, arka ve iki yan kapaktan oluşmaktadır. Ön ve arka kapaklar kalıbı rijitleştirmek amacıyla sıkça köşebentlerle berkitilmiştir. Beton dökümünde kalıbın açılarak esnemesini engellenmiştir. Bunun için 20 cm uzunluğunda 10 mm çapında 1 mm et kalınlığında çelik boruların içinden 6 mm'lik gijonlar geçirilmiş bunlar kalıbın içinde kalacak şekilde kalıbın iki kanadından somunla sıkılarak 20 cm genişlik sabitlenmiştir. Eleman kalıbı sökülünce borular betonun içinde kalmakta gijonlarda sökülüp çıkarılmaktadır. Kalıp elemanları birbirlerine bulonlarla bağlanmaktadır. Kalıbı kurması ve sökmesi çok zahmetsizce kısa sürede yapılabilmektedir.



Şekil 4.41. Çelik kalıp yandan görünüm



Şekil 4.42. Çelik kalıp önden görünüm

4.3. Deney Elemanları

Deneylerden elde edilen sonuçların olabildiğince uygulamadaki kirişleri temsil edebilmesi için deney elemanı ölçeğinin 1/1 olmasına karar verilmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 200 x 500 mm boyutlarında, tabliyesi 10 cm kalınlığında bir kiriş kesiti model olarak seçilmiştir. Kiriş boyunun ise 4,5 m alınmasına karar verilmiştir.

Tüm kirişlerde nervürlü 3Ø14, (BÇ-IIIa kalitesinde) çekme donatısı kullanılmıştır. Bu donatı minimum donatı miktarının iki katından biraz fazla olup, uygulamadaki olağan donatılı kirişleri yansıtmaktadır. Tüm kirişlerde nervürlü 2Ø10, (BÇ-IIIa kalitesinde) basınç donatısı kullanılmıştır. Kirişin tabliye kısmının üstünde, gerçekte her iki tarafın döşemesinden gelen pilye demirleri yansıtmaları açısından nervürlü Ø8/150 (BÇ-IIIa kalitesinde) donatı; altında ise gerçekte döşeme açıklığından gelen demirleri temsil etmesi açısından nervürlü Ø8/300 (BÇ-IIIa kalitesinde) donatı yerleştirilmiştir. Ayrıca tabliye boyunca döşeme donatısını temsil etmesi açısından 4Ø8 demir konmuştur.

Eğilme zorlanmasına karşı güçlendirilecek kirişlerde (ilk yedi kiriş) herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılmaması amaçlandığından, tüm kirişler oluşabilecek en büyük kesme zorlamalarını karşılayabilecek şekilde Ø8/100 mm'lik etriyelerle donatılmıştır.

Eğilme+Kesme zorlanmasına karşı güçlendirilecek kirişlerde (yedi kiriş) ise etriyeler Ø8/500 mm olacak şekilde azaltılarak kesme kuvvetine karşı zayıf elemanlar oluşturulmuştur.

Kiriş alt yüzeylerine yapıştırılmak üzere 8mm delikli ya da 6 mm kalınlığında düz çelik levhalar kullanılmıştır. Düz levhada en kesit alanı 1200 mm²'dir. Delikli levhada ise en kesitteki delik çaplarının toplamı düşüldükten sonra

arta kalan metalik alanın genişliği 120 mm'dir (200 mm - 5 adet $\phi 16$ delik=120mm). Buna göre 8 mm'lik levhalarda en kesit alanı $8 \times 120 = 920 \text{ mm}^2$ 'dir. Yani 1200 mm^2 ve 920 mm^2 'lik çekme donatısı olarak çalışacak ek alanlar elde edilmiştir. Önce delikli ve düz sacın etkin en kesit alanları eşit olması planlanmış ve delikli sacın kalınlığı 10 mm olarak düşünülmüştü. Böylece daha doğru bir karşılaştırma yapılabilecekti. Ancak 10 mm kalınlığında sac'ta delik imalatına teknik koşullar el vermediğinden kalınlık 8 mm ye düşürülmek durumunda kalınmıştır. Mevcut çekme donatıları da düşünüldüğünde donatı oranları 6 mm düz ve 8 mm delikli levhali elemanlar için sırasıyla 0,0016 ve 0,014'tür. Model olarak ele alınmış olan 200x500 mm'lik kiriş için basınç donatısı düşünülmendiğinde dengeli donatı oranı $\rho_b = 0.016$ dir. Böylelikle delikli ve düz levhaların aşırı donatılı durumlarda nasıl davranacağını ve basınç levhalarının davranışa etkisinin, katkısının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bütün elemanlarda çekme levhaları; alt yüze yapıştırılsın veya yapıştırılmasın, kiriş ucu yan yüz levhaları ve ankraj bulonları ile kiriş uçlarına mesnetlendirilmiştir.

Seyrek etriyeli diğer altı kiriş ise eğilme zorlanmasına ek olarak dört tanesi kesme kuvvetine karşı da güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirmede kiriş oluşturulan mekanizma ile dışarıdan sarılmıştır. 10 mm'lik saplamanın dış dibi çapı yaklaşık 8 mm'dir. Sıklıkla kullanılan etriye çapı 8 mm olduğundan 10 mm'lik saplama 1/1 ölçekteki eleman için uygun görülmüştür. Kullanılan bu teknik bütün kesme+eğilme elemanlarına aynı şekilde uygulanıp aralarında parametre olmaktan çıkarılmıştır.

4.4. Malzeme Özellik ve Dayanımları

Deney sonucunda elde edilen verileri karşılaştırabilmek ve sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek için, kirişlerin yapımında kullanılan beton ve donatıların aynı mekanik özellikleri göstermesi önemlidir. Tüm deney elemanlarında aynı yerden tek seferde temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan donatılardan alınan numuneler laboratuvarımızda çekme testine tabi tutulmuş ve özellikleri belirlenmiştir.

Deney elemanlarının betonları laboratuvarımızda dökülmüştür. Bütün deney elemanları aynı mevsimde üretilmiş, hepsine aynı kür uygulaması yapılmıştır. Beton karışım oranları aşağıdaki Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Karışıma herhangi bir kimyasal katılmamıştır. Her deney elemanı üretiminde 6 adet silindir numune alınmıştır. Elemana ait silindir numuneler her deney öncesi standart basınç testine tabi tutulmuştur. Deney elemanlarının ortalama karakteristik basınç dayanımları (f_{ck}) 16 MPa’dır.

Çizelge 4.2. Beton karışım oran ve miktarları

1m ³ yaş beton	2330 kg/m ³
Çimento	300 kg/m ³
Su / Çimento	0,6
Su	180 kg/m ³
Kum + Çakıl	1880 kg/m ³
Kum	940 kg/m ³
Çakıl	940 kg/m ³

Donatı olarak 8mm, 10 mm ve 14 mm çaplı nervürlü boyuna donatı kullanılmıştır. Bu donatıların akma dayanımı (f_{yk}) 450 MPa kopma dayanımı (f_u) 620 MPa’dır.

Çelik levhaların akma ve kopma dayanımlarının yaklaşık olarak eşit ve 280 MPa civarında olduğu belirlenmiştir. Çelik levhalarda DKP saçlarından A1 kalitesinden en yumuşak çelik kullanılmıştır.

Piyasa araştırması sonucunda, Sika-Deteks firmasının ürettiği “Sikadur-31” isimli epoksi uygun görülerek kullanılmıştır. Bu epoksi hem levhalarının yapıştırılmasında hem de kiriş uç yan ankrajlarının imalatında kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği özellikler Çizelge 4.3’de sunulmuştur. İki bileşenden oluşan epoksi yapıştırıcının reçinesi beyaz, sertleştiricisi siyah renklidir.

Çizelge 4.3. Yapıştırıcı (epoksi) özellikleri

RENK	Gri (A;Beyaz, B;Siyah)		
KARIŞIM ORANI	A:B 3:1 (Hacimce ve ağırlıkça)		
YOĞUNLUK	1,7 kg/litre = 1,7 gr/cm ³		
KULLANIM ZAMANLARI	°C	Sıcaklığa bağlı olarak 2 kg	5 kg
	40	-	25 Dak.
	30	20 Dak.	- 50 Dak.
	20	40 Dak.	-1,5 Saat
	10	1,5 Saat	-
	5	3,5 Saat	-
BASINÇ DAYANIMI	6,5-6 MPa		
EĞİLME DAYANIMI	3-2,5 MPa		
ÇEKME DAYANIMI	2 MPa		
BETONA YAPIŞMA DAYANIMI	0,35 MPa (Beton dayanmaz)		
ÇELİĞE YAPIŞMA DAYANIMI	2-1,5 MPa		
YOUNG MODÜLÜ	850 MPa		

Kaynak işlerinde elektrikle çalışan ark kaynağı kullanılmıştır. Elektrotlar standart kalitede ve 3,25 mm kalınlığındadır.

4.5. Çekme levhasının kirişe montajı ve uygulama tekniği

Bütün güçlendirme elamanlarında hemen hemen aynı teknik kullanılarak çekme levhaları monte edilmiştir. Aşamalardan şöyle bahsedilebilir;

Laboratuar koşullarında kiriş altına yapılacak uygulamalarda üzerinde rahat çalışabilmek için kirişler ters çevrilmiştir. Uç yan levhaların geleceği bölgelerde delme esnasında etriyeleri kesmemek için dedektörle tarama yapılarak demir haritaları çıkarılmıştır. Daha sonra çekme levhası ve uç yan levhalar epoksi için 2 mm pay bırakılarak düzene uygun yerleştirilmiştir. Orijinal delik yerleşim düzenini fazla bozmadan etriyeye denk gelen delik noktaları biraz sağa sola kaydırılarak delinecek kesin noktalar belirlenmiştir. Uç yan levhalardaki bu noktalar tezgahlı çelik matkabında 13 mm'lik uç ile delinmiştir. Bu delinen levhalar kirişteki kesin yerlerine konup ve işkenceler yardımı ile kaymayacak şekilde sabitlenmiştir.



Resim 4.1.Uç yan levhalar işkence ile sabitlenmiştir



Resim 4.2. 12 mm uç ile betonda ankraj için kılavuz deliklerin açılması

Oluşan bu pafta sayesinde levhadaki delikler yardımı ile kiriş 10 cm derinliğinde 12 mm'lik beton ucu ile olabildiğince dik delinmiştir. Bu aşamadan sonra işkenceler sökülmüş levhalar tezgahlı matkaba götürülerek 13 mm'lik deliklerin çapı 20 mm'ye genişletilmiştir. Betondaki 12 mm çapındaki delikler ise matkapla 22 mm ye çıkarılmıştır. Betonda açılan deliklerin içlerine kompresörle hava basılarak çeperler temizlenmiştir. Sonra uç yan levhalar olması gereken yerlere getirilmiş deliklerin tutarlılığı kontrol edilerek işkencelerle tekrar sabitlenmiştir. Sabitlenen levhalar çekme levhasına yan levha boyunca 6mm kalınlığında köşe kaynağı ile tutturulmuştur. Kaynak işinde elektrikli ark kaynağı kullanılmıştır. Oluşan ana sistem kirişteki yerinden kaldırılmış, ters çevrilerek yere konmuş burada levha içlerine yine boylu boyunca kaynak çekilmiştir.

Etkin bir yapışma gerçekleştirebilmek için yapıştırma yüzeyinin tozdan, yağdan ve nemden arındırılması gerekir. Bunun için çelik levha üzerindeki yağ tabakası tinerle silindikten sonra, zımparalı taşlama ile pas ve diğer

çapaklar temizlenerek iyice parlatılmıştır. Taşlama yönü levhanın kısa doğrultusunda yapılmıştır. Son olarak levha yüzeyleri tiner ile temizlenmiştir. Beton yüzeyler ise silme taşı ile düzeltilmiştir. Yüzeyler kurumadan yapıştırıcı sürülmemiştir.



Resim 4.3. Çekme levhasının epoksi ile yapıştırıldıktan sonra işkencelerle desteklenmesi

Yapıştırıcının kullanıma hazır hale getirilmesi aşamasında, yapıştırıcının A ve B bileşenleri 3/1 oranlarında tartılmış ve iki bileşen 600 devir/dakikayı geçmeyen karıştırıcı ile homojen bir renk elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Karışım üretici firmanın önerileri doğrultusunda, hazırlandıktan sonraki 2 saat içinde kullanılmıştır.

3/4 kutu epoksi yapıştırıcı spatulayla bir kirişin taban yüzeyine homojen olarak boş yüzey görülmeyecek şekilde sürülmüştür. Sürülen epoksi diş dibi derinliği 4mm olan taraklı spatula ile çekilerek yapışma kalınlığının tam 2 mm olmasını sağlanmıştır. Daha önce çelik levhalardan oluşturulmuş sistem her tarafından aynı anda temas edecek şekilde kiriş üzerindeki yerine oturtulmuş, işkencelerle desteklenerek etkin bir yapışma gerçekleştirilmiştir. Eğer

levhalar delikli ise yapıştırma işlemi esnasında levhanın deliklerinin epoksi harcı ile dolması sağlanmıştır. Bu yapıştırma işlemi sonunda kiriş 48 saat süreyle prizini ve mukavemetini alması için üzerinde başka hiçbir işlem yapılmadan bekletilmiştir.

Yapıştırıcı dayanımı alan kirişin, yan yüz delikleri kontrol edilip az miktarda kayma olanları tekrar matkapla genişletilmiştir. Ankraj işine geçilmeden önce ankraj deliklerine basınçlı hava basılarak iyice temizlenmiştir. Epoksi daha önceden anlatıldığı gibi kullanım talimatına göre hazırlanmış, 20 cc'lik enjektörler yardımı ile deliklere doldurulmuştur. Daha önceden 14 cm'lik parçalar halinde kesilen gijonlara da bir miktar epoksi sıvanmış ve bunlar deliklere yerleştirilmiştir. Yerleştirme esnasında dışarı taşan epoksi ankraj güvenilirliği açısından ölçüt olarak kabul edilmiştir. Gijonların dışarıda kalan dişleri somunların rahatça geçebilmesi için epoksi artıklarından priz almadan titiz bir çalışma ile arındırılmıştır.



Resim 4.4. Epoksinin deliklere enjeksiyonu



Resim 4.5.Gijonların kirişe ankraji



Resim 4.6.Gijon başlarının epoksi artıklarından temizlenmesi

4.6. Basınç levhasının kirişe montajı ve uygulama tekniği

Basınç levhaları 40 cm eninde 170 cm boyunda üretilmiştir. Alt yüzdeki levhanın cinsi neyse basınç bölgesinde de aynı cins levhadan kullanılmıştır. Sadece yapıştırmanın; deformasyonun ileri aşamalarında yeterli olmayacağı düşünülerek basınç levhasının bulonlarla tabliyeye bağlanmasına karar verilmiştir. Bunun için önsezi ile kirişin eni olan 20 cm'lik mesafede karar kılınmış ve basınç levhası her 20 cm'de bir tabliyeye bulonlarla bağlanmıştır.

Uygulama tekniğini aşamaları ile şöyle sıralayabiliriz. Düz basınç levhasının tabliyeye bağlanacağı noktalar 20 cm'de bir belirlenmiştir. Eğer eleman kesmeye karşıda güçlendirilecekse, saplamanın geçeceği delikler için işaretleme şaşırtmalı olarak yapılır. Tabliyeye bağlama noktaları ve kesme saplamalarının geçeceği noktalar 13 mm'lik metal ucuyla delinmiştir. Delikli levhalarda herhangi bir delme işlemine gerek duyulmamıştır.



Resim 4.7. Basınç levhası deliklerinin açılması



Resim 4.1. Resim 4.8. Basınç levhasını yapıştırmak için sürülen epoksi



Resim 4.9. Basınç levhasının yapıştırılmış ve desteklenmiş hali

Bu işlemten sonra basınç levhası yapıştırılacaksa, epoksi; yönergesine uygun olarak karıştırılmış, aynı çekme levhası yapıştırmada kullanılan teknikle tatbik edilmiştir. Epoksi prizini aldıktan sonra kiriş tabliyesi delme işine geçilmiştir. Delme boydan boya olduğu için matkap ucu diğer taraftan betonu patlatarak çıkmaktadır. Kirişe verilen bu zararı en aza indirmek için açılması gereken 12 mm'lik delik çapına sırasıyla 6 mm, 8 mm ve 12 mm'lik matkap uçlarıyla ulaşılmıştır. Basınç levhasını bağlayacak gijonlar 12 mm çapındadır. Delikten geçirilen gijonların her iki tarafına somun ve pul takılıp, sıkılmıştır.

4.7. Kesmeye karşı güçlendirme uygulama ve tekniği

Kesmeye karşı güçlendirmede kiriş oluşturulan mekanizma ile dışarıdan sarılmıştır. 10 mm'lik saplamanın dış dibi çapı yaklaşık 8mm'dir. Sıklıkla kullanılan etriye çapı 8 mm olduğundan 10 mm'lik saplama 1/1 ölçekteki eleman için uygun görülmüştür.



Resim 4.10. Kesmeye karşı oluşturulan güçlendirme tekniği

Bu iş için kiriş boyunca ip çekilerek kesme saplamalarının geçeceği deliklerin merkez noktaları belirlenmiştir. Bu noktalarda açılması gereken 12 mm'lik delik çapına kirişe zarar vermeyi önlemek için sırasıyla 6 mm, 8 mm ve 12 mm'lik matkap uçlarıyla ulaşılmıştır.



Resim 4.11. Kesmeye karşı güçlendirme sisteminin genel görüntüsü

Sargılama mekanizması basitçe, bir tanesi kirişin altında bir tanesi üzerinde olan iki tane 27 cm boyunda 40x10 luk lamadan delinerek geçirilmiş, kiriş derinliğince uzanan iki saplamanın somunlarla sıkıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Saplamlar kiriş yüzeyine 1,5 cm uzaklıktadır. Saplamlar torkmetre ile 12 Nm'lik torkla sıkıldı. Bu tork sargılama sistemine zarar vermeyecek şekilde hesaplandı. Bir saplamaya yaklaşık 600 kgf yük düşmektedir.

4.5. Deney Düzeni

4.5.1. Deney çerçevesi

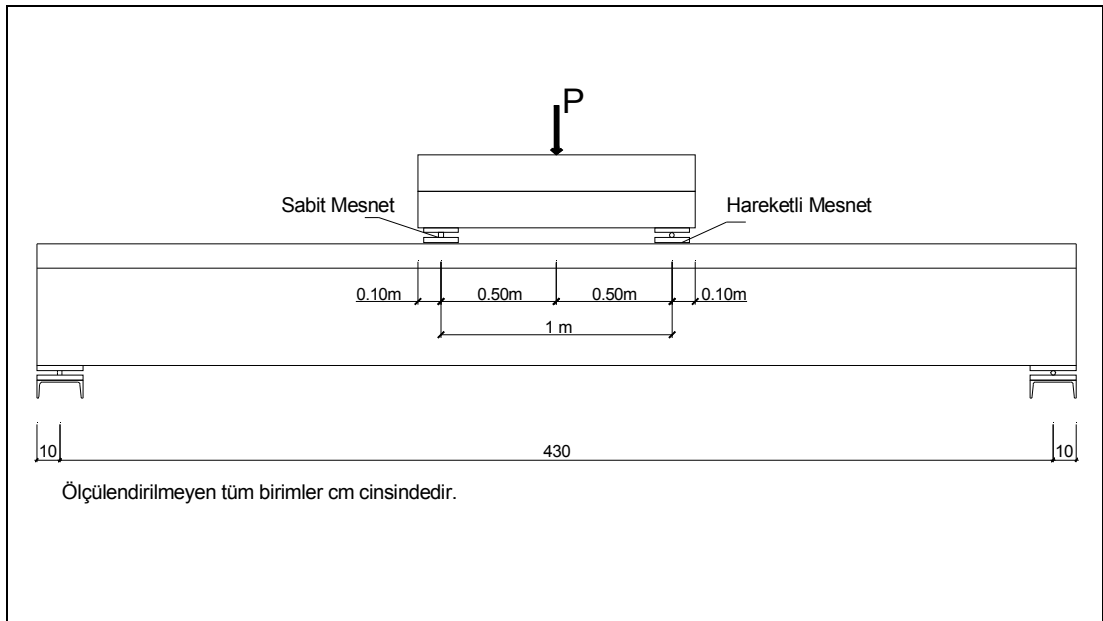
Deneyler Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği laboratuvarında kapasitesi 200 kN olan çelik deney çerçevesinde yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce çelik çerçeve, 400 kN yükleri taşıyabilecek şekilde çelik çaprazlarla desteklenerek güçlendirilmiştir. Çerçeve, reaksiyonları kendi içinde deney elemanına iletmektedir. Deney elemanına iki noktalı yükleme yapılmıştır. Yük aralığı düzgün yayılı yük altında oluşan moment diyagramını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Yük hidrolik krikolo ile verilmiş, yükün büyüklüğü yük hücresi ile ölçülmüştür. Şekil 4.43’de görüldüğü gibi yük hücresi çelik kirişin ortasına yerleştirilmiştir.

4.5.2. Yükleme düzeni

Deney elemanları çerçevede iki ucundan basit kiriş gibi mesnetlenmiştir. deney modellerinde kesme kuvvetinin olmadığı, basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanarak Şekil 4.43’de görülen yükleme sistemi tasarlanmıştır. Oluşturulan iki noktalı yükleme sisteminin yük aralıkları, düzgün yayılı yükler altında oluşacak moment diyagramını yaklaşık olarak kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu amaçla deney elemanının simetri ekseninden 500 mm kenarlara biri sabit diğeri hareketli olarak mesnetlenen, son derece rijit bir şekilde boyutlandırılmış üst üste kaynaklanmış 4 adet U 200 çelik profil kullanılmıştır. Yük aktarımında kutu profilin mesnetlenmesi iki çelik lama arasına konulan yuvarlak ve kare çelik çubuklarla yapılmıştır.



Yani sistem tamamen izostatik hale getirilmiştir. Kutu profil üzerine yükün uygulanabilmesi için 600 kN kapasiteli bir hidrolik krika ile yük kontrolü için 400 kN kapasiteli yük hücresi (load-cell) simetri merkezleri çakıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir. Çerçeveedeki çelik çaprazlar her deney öncesinde kontrol edilmiş, eğer her hangi bir gevşeme varsa eşit miktarlarda sıkılarak, elemana ilk yük aktarımıyla beraber çalışması sağlanmıştır. Yüklemenin her deneyde tamamen düzeneğin simetri eksenlerinden geçmesine titizlikle dikkat edilmiştir.



Şekil 4.44. Yükleme noktalarının yerleri

4.5.3. Ölçüm düzeni

Deneyler sırasında yük ölçümü için 40 ton kapasiteli bir yük hücresi, çeşitli yön ve doğrultudaki deplasman ölçümleri için, 0,01 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, elektronik deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bu LVDT'lere gelen veriler bir okuyucu tarayıcıdan geçtikten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında kirişteki maksimum deplasman ile yükün değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir. Her deney öncesinde LVDT'lerin kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Ölçüm sisteminde

toplam 11 adet LVDT kullanılmış ve her LVDT ye 'D' ile başlayan ve sonunda LVDT numarası olan bir ad verilmiştir. Ölçüm sisteminde düşey deplasmanları ölçen LVDT'ler (D1, D2, D3, D4, D5'tir). D4 ve D5 mesnet çökmelerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Diğer LVDT'ler ise eğrilik ölçümleri alabilmek için deney elemanı üzerinde daha beton döküm aşamasında konulmuş yuvalara 6 mm'lik gijonlarla bağlanmıştır. Bu yuvalar 6 mm'lik mekanik dübellerin sıkıştırma kanatları 45 derece açılarak içindeki çekirdeğin çıkarılmasıyla oluşturulmuştur. Hazırlanan yuvaların ölçüm noktalarına denk gelecek şekilde kalıpta yerleri delinmiştir. Vidalı kısımlarına beton girmeyecek şekilde önlemleri alınmıştır. Bu işlem sayesinde her seferinde kirişin aynı noktalarından, çok daha kolay bir şekilde, delip etriyelere zarar verme olasılığı olmadan ve kaymadığı içinde çok daha sağlıklı ölçümler alınmıştır.

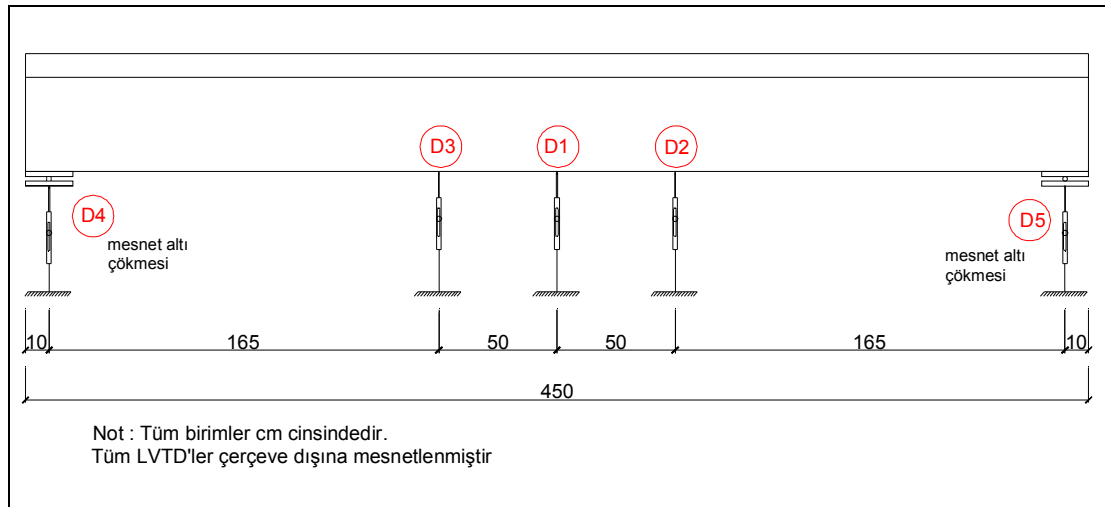


Resim 4.12.LVDT gijonlarının gireceği hazırlanan yuvalar.

Deney elemanı 50 cm'lik üç ölçüm bölgesine ayrılmış ve eleman üzerine mesnetlenmiş olan LVDT'ler bu bölgelere yerleştirilmiştir (Şekil4.45).

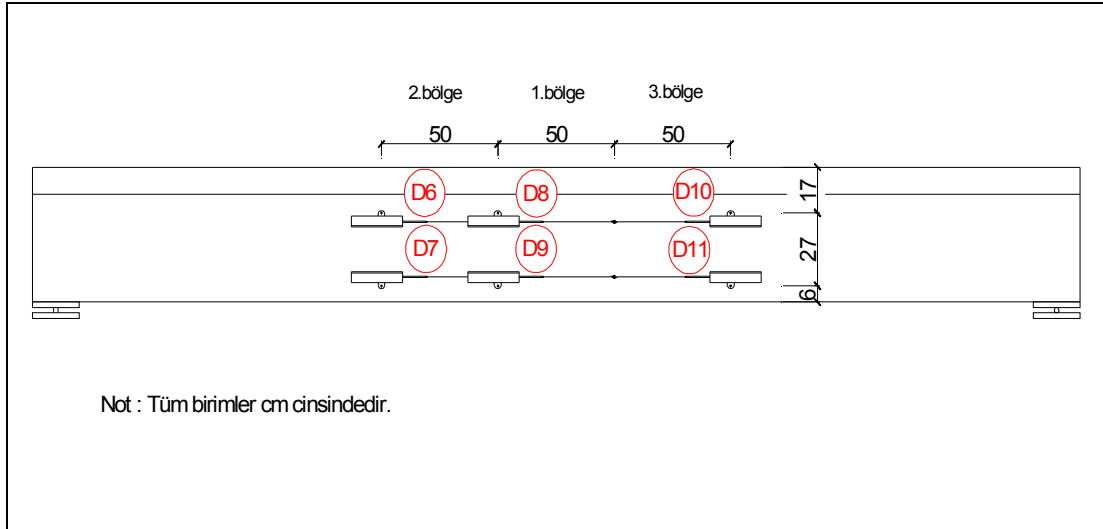
Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'lerin ölçüm amaçları aşağıda belirtilmiştir.

- D1 : Orta nokta düşey deplasmanı
- D2 : Sağ taraf düşey deplasmanı
- D3 : Sol taraf düşey deplasmanı
- D4 : Sol yük mesnedi düşey deplasmanı
- D5 : Sağ yük mesnedi düşey deplasmanı
- D6 : Sol bölge üst eğrilik ölçümü
- D7 : Sol bölge alt eğrilik ölçümü
- D8 : Orta bölge üst eğrilik ölçümü
- D9 : Orta bölge üst eğrilik ölçümü
- D10 : Sağ bölge üst eğrilik ölçümü
- D11 : Sağ bölge alt eğrilik ölçümü



(a)

Şekil 4.45. Ölçüm düzeneği a) Ön yüzü b) Arka yüzü



(b)

Şekil 4.46. (Devam) Ölçüm düzeneği a) Ön yüzü b) Arka yüzü

4.6. Deneyler

Bölüm 4.1’de özellikleri anlatılan deney modellerinin deney çerçevesine yerleşilmesinden sonra Şekil 4.43’de gösterilen deney düzeni, yükleme ve ölçüm aletlerinin bağlanmasıyla hazır hale getirilmiştir. Eğrilik değerlerinin bulunmasını sağlayan çerçeve sisteminin boyutları ile referans olarak tüm ölçüm aletlerinden alınan sıfır okumalarından sonra yükleme programına geçilmiştir. Tüm modellerde yük 3 kN–6 kN arasında değişen yük adımları ile artırılarak uygulanmıştır. Yük artırım değerleri kirişin deney sırasındaki davranışına göre belirlenmiştir. Deneyler sırasında mesnetlerdeki çökmeler nedeniyle gerekli düzeltmeler yapılmadan yük-deplasman eğrileri de çizilmiş ve deneyin gelişimi adım adım izlenmiştir. Deney grafiklerinde yükün sıfırlandığı ve tekrar çıkarak yaklaşık eski yük değerinden devam ettiği görülecektir. Bu kısımlar aksi belirtilmediği sürece, krikonun 150 mm’lik kapasitesinin dolmasıyla yükün boşaltılıp yükleme noktasının altının plakalarla beslendikten sonra yeniden yüklemeye devam edildiği bölümlerdir.

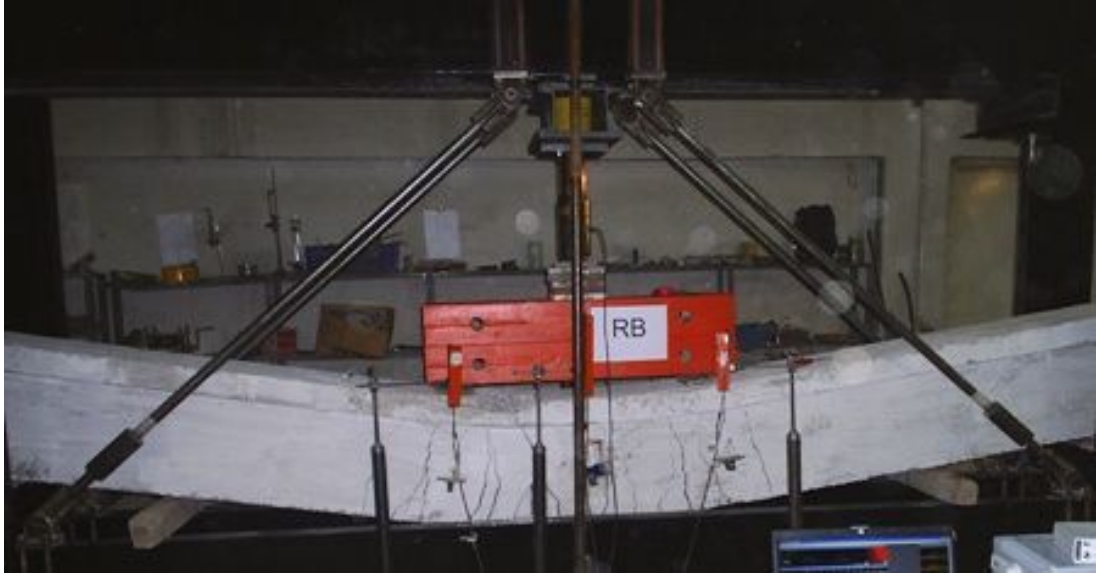
4.6.1. RB: Tam etriyeli yalın kiriş (Referans kirişi)

Eğilmeye karşı güçlendirilen kirişler için referans elemanı olarak, tam etriyeli yalın RB kirişi düzenlenmiştir. Bölüm 4.1’de belirtilen özelliklerdeki kirişe herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmadan deney gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.13.RB deney elemanı

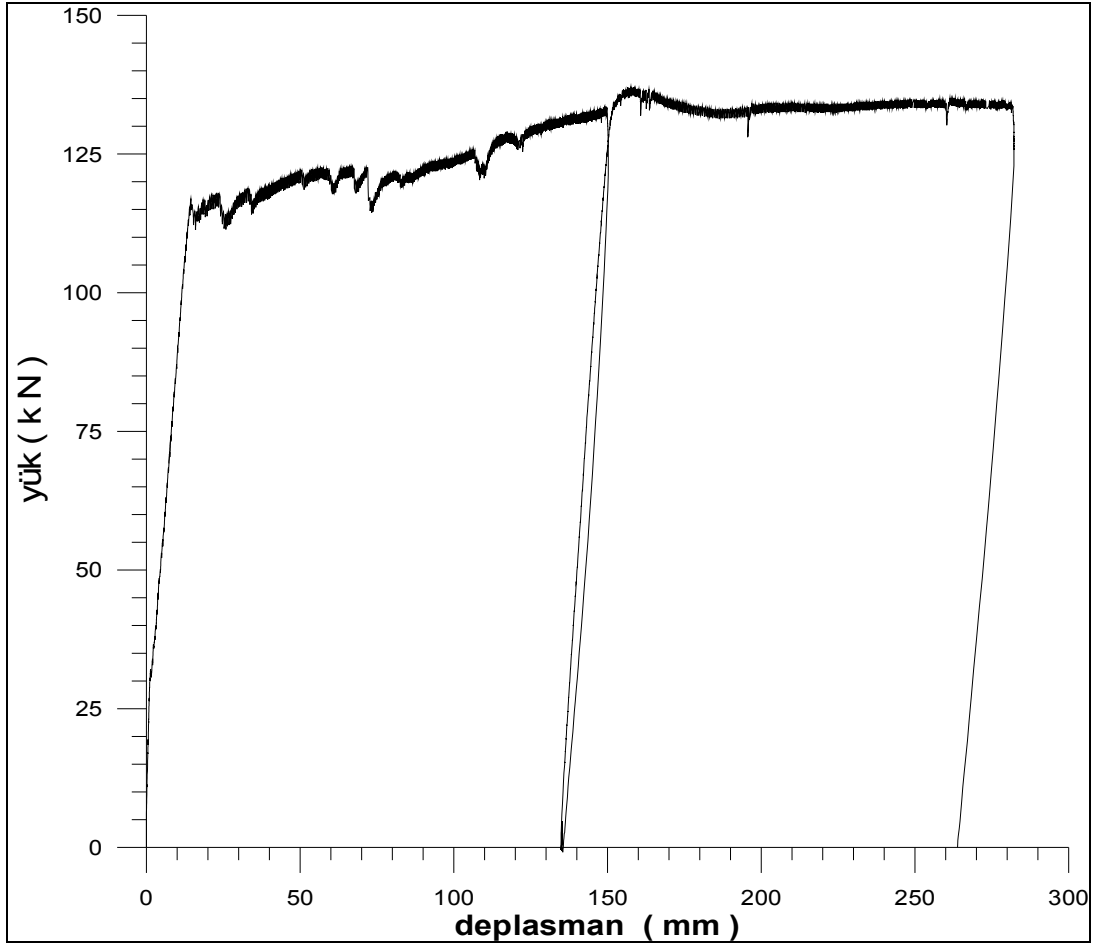
Yükleme başladıktan sonra ilk eğilme çatlakları 30 kN civarında gözlemlenmiştir. Elemanın çekme donatısı 117 kN yük 14 mm deplasmanda akmıştır. Bütün hasarlar orta 100 cm’lik bölgede oluşmaya başlamış ve devam etmiştir. 134 kN yük, 150 mm de sol yükleme noktasına yakın bölgede ezilme gerçekleşmiştir. Pekleşmenin etkisiyle elemanın ulaştığı maksimum yük 135 kN’dur. Deneye 130 kN yük 280 mm deplasman da son verilmiştir. Çok ileri düzeyde deformasyon olmasına rağmen kiriş başlıklarında, donatıda herhangi bir sıyrılma belirtisi görülmemiştir. Tam anlamıyla bir eğilme davranışı gerçekleşmiştir.



Resim 4.14.RB deney elemanı deney sonunda hasar durumu



Resim 4.15.RB elemanı beton ezilme bölgesi



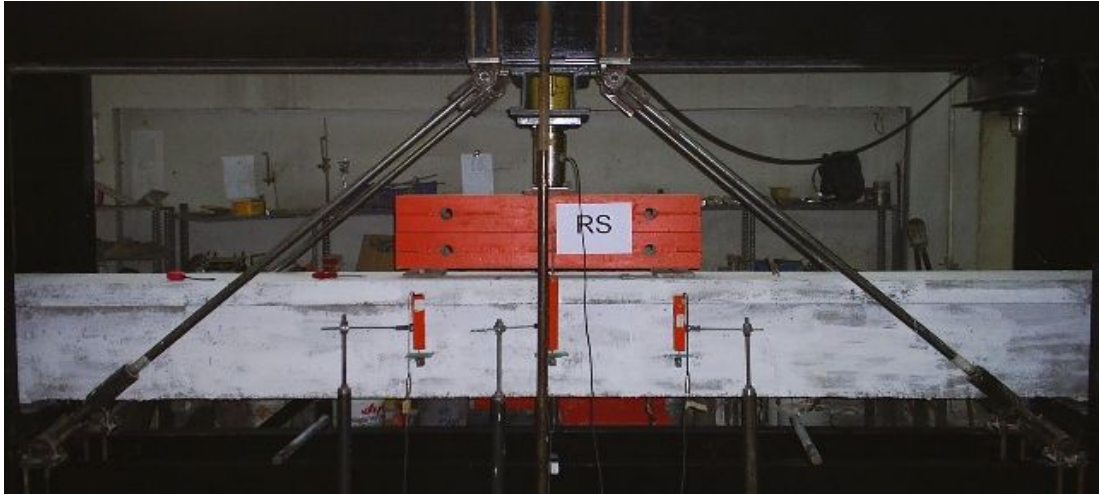
Şekil 4.47.RB elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.2. RS: Eksik etriyeli yalın kiriş (Referans kirişi)

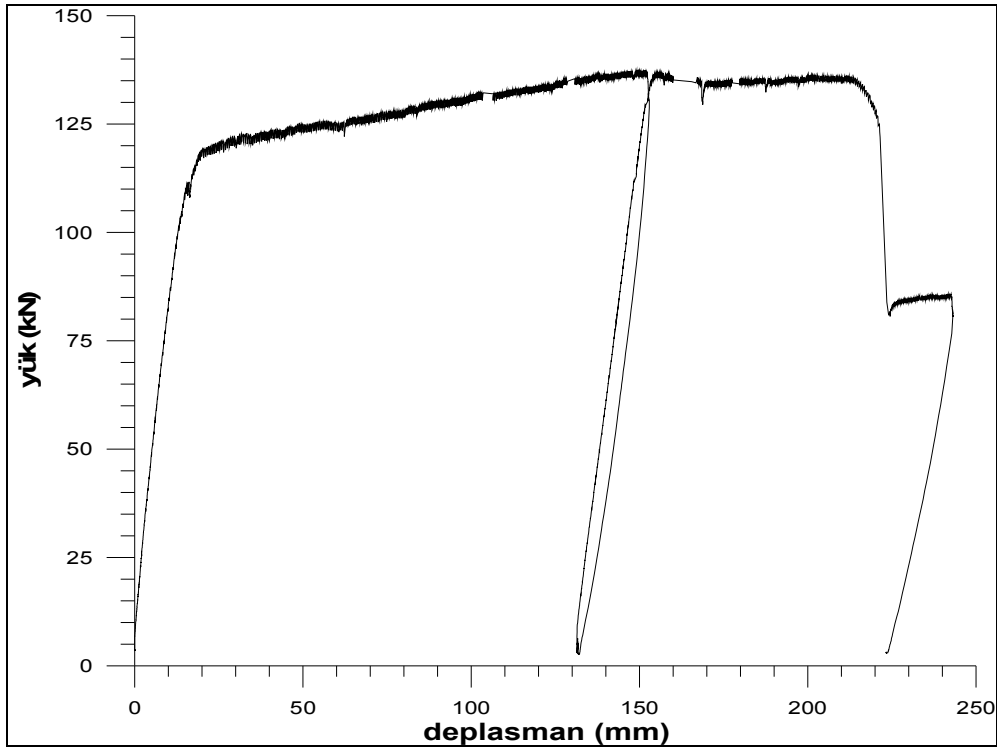
Eğilme-kesmeye karşı güçlendirilen kirişler için referans elemanı olarak, eksik etriyeli yalın RS kirişi düzenlenmiştir. Bölüm 4.1.'de belirtilen özelliklerdeki kirişe herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmadan deney gerçekleştirilmiştir.

Yükleme başladıktan sonra 25 kN değerinde ilk eğilme çatlağı oluşmuş devamında 60 kN değerinde ilk kesme çatlağı oluşmuştur. Bu noktadan itibaren kesme çatlakları eğilme çatlaklarından önde gitmeye başlamıştır. Yükleme devam ettikçe ani kesme çatlakları oluşmuştur. 100 kN yük değerinden itibaren kesme çatlaklarının açılması yavaşlamış, eleman eğilme karakterine geçmeye başlamıştır. Çekme donatıları 117 kN değerinde

akmiştir. 130 kN yük, 100 mm de sağ yükleme noktasına yakın bölgede ezilme gerçekleşmiştir. Eleman 136 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. 134 kN yük, 210 mm deplasman değerinde çekme donatılarının biri kopmuş ve deneye bu aşamada son verilmiştir. Sonuçta eleman ağır kesme hasarları almasına rağmen eğilme davranışı göstermiştir.



Resim 4.16. RS elemanı



Şekil 4.48. RS elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.17. RS elemanında görülen çatlaklar

4.6.3. S1: Güçlendirilmiş kiriş

Eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden 6mm kalınlığında düz çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır. Güçlendirmede epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır.

Yüklemeye başladıktan sonra ilk çatlak orta bölgede 100 kN yük, 3 mm deformasyonda oluşmuştur. Yüklemeye devam edildiğinde eğilme çatlakları gelişmiş, kesme çatlakları kılcal düzeyde kalmıştır. 293 kN yük değerinde eleman akmaya başlamıştır. Yük 300 kN, deplasman 60 mm'ye geldiğinde çekme levhasında aderans çatlakları belirmiştir. 305 kN, 78 mm'de sağ yük noktasına yakın bir yerden beton ezilmiştir.



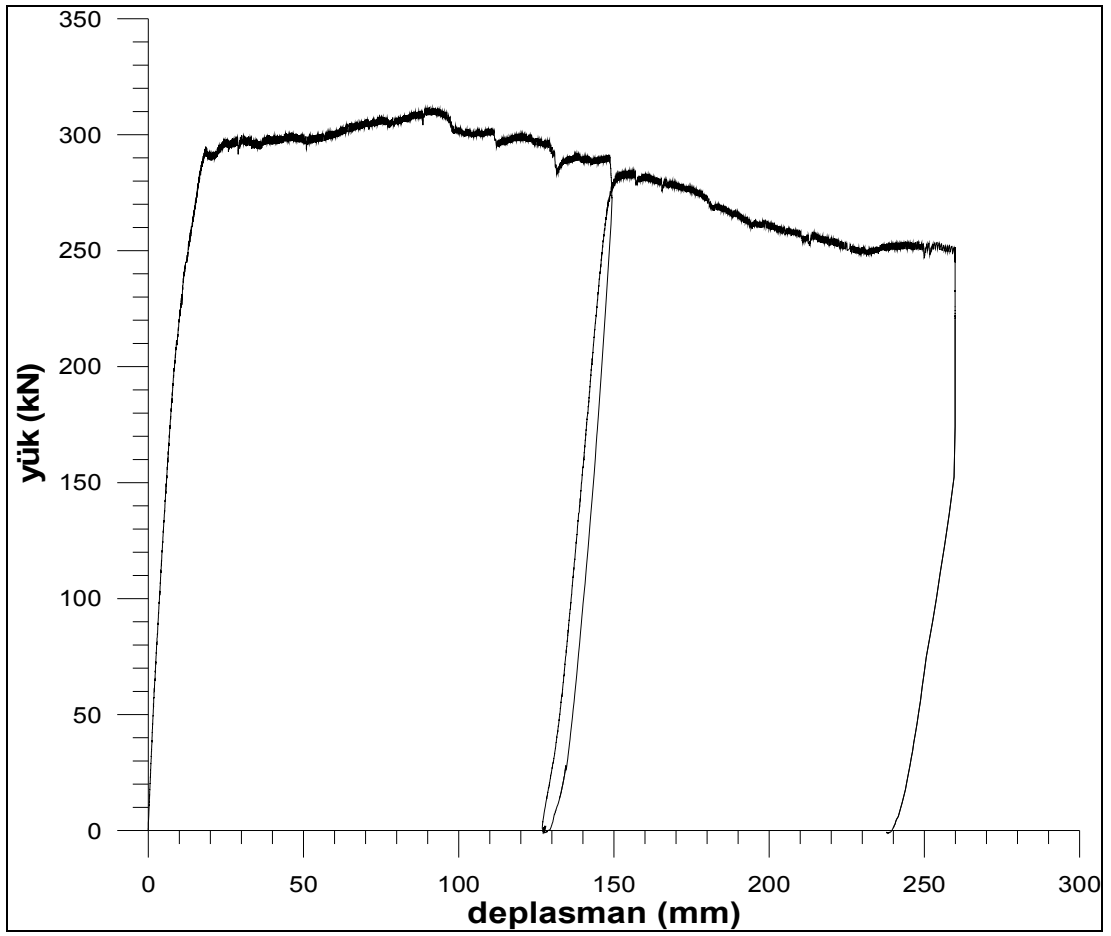
Resim 4.18. S1 deney elemanı



Resim 4.19. S1 deney elemanı deney sonunda hasar durumu

Eleman maksimum yüküne 310 kN'da ulaşmıştır. Deneye devam edildiğinde ezilme orta bölgede tüm tabliye yüksekliğince yayılmış, yapıştırma bölgesinde aderans çözümleri oluşmuştur. Ancak çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir olumsuz gelişim gözlenmemiştir. Sargılı basınç donatılarında burkulma olmuştur. Deplasman 260 mm'ye geldiğinde kapasite dolduğu için deneye son verilmiştir.

Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 80 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 6 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Kalınlıkta bir değişim oluşmamıştır. Çekme levhası etkinliğini deney sonuna kadar sürdürmüştür.



Şekil 4.49. S1 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.4. S2: Güçlendirilmiş kiriş

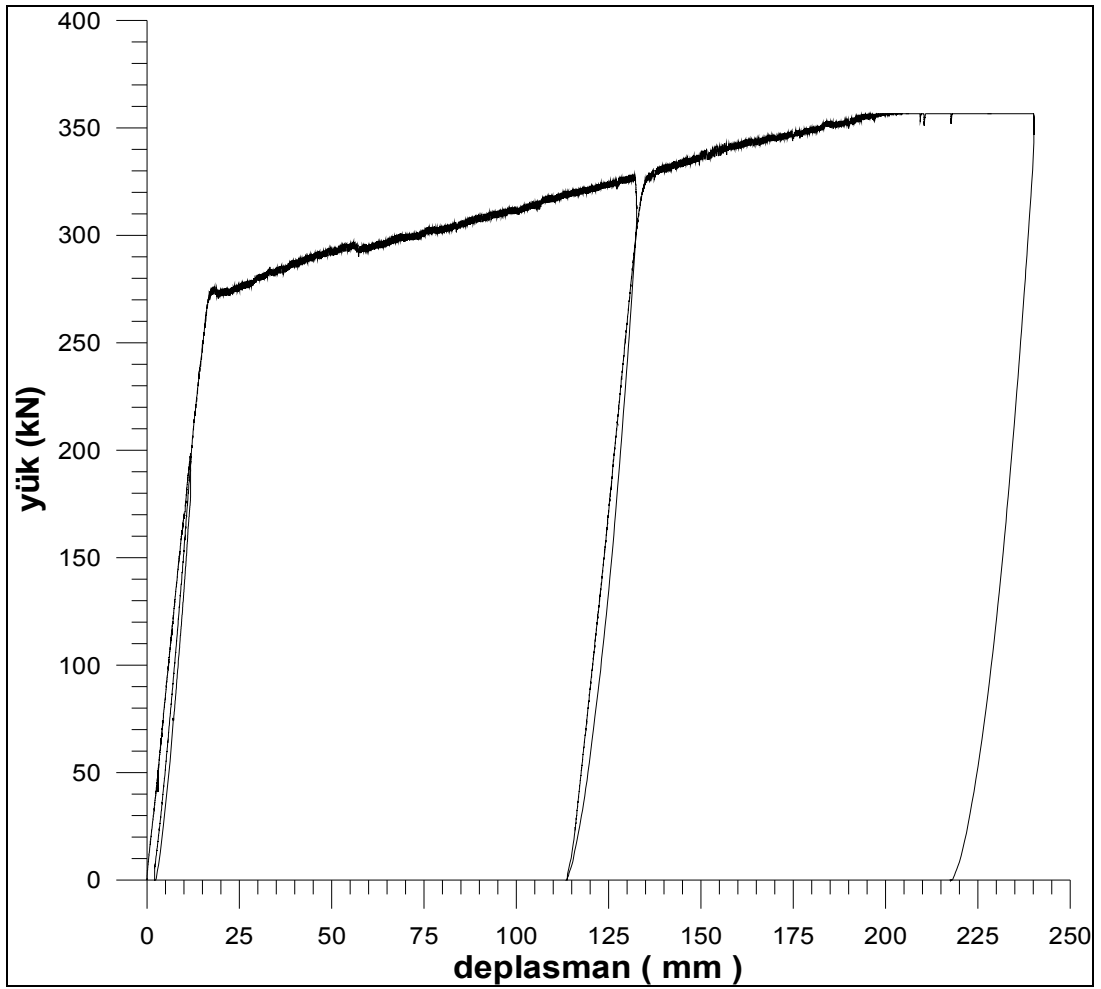
S2, eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha ile epoksi yapıştırıcı kullanılmadan güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır. Eleman çerçeveye yerleştirildiğinde çekme levhası epoksi ile yapıştırılmadığı için, levhada sarkma oluşmuştur. Kiriş alt yüzünden maksimum sarkma miktarı 10 mm olarak ölçülmüştür.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlağı 35 kN yük, 2 mm deplasmanda oluşmuştur. 3,5 mm deplasmanda levha ile kiriş alt yüzü arasındaki boşluk tamamen kapanmış, levha çalışmaya başlamıştır. Yükleme devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlakları sınırlı ve kılcal düzeyde kalmıştır. Yük 190 kN olduğunda hidrolik yük pompası sorun çıkardığı için deneye ara verilmiş, yerine el pompası takılarak yükleme devam edilmiştir. 272 kN yük, 18 mm deplasmanda eleman akmaya girmiştir. Deney devam ettikçe eğilme çatlakları genişlemeye devam etmiştir. 355 kN yük, 129 mm deplasmanda tabliyede ezilme oluşmuştur. 360 kN yüke gelindiğinde yük hücresi ölçüm kapasitesi dışına çıkmıştır. Bu noktadan sonra kirişe bir miktar daha sehim yaptırılmış, deplasman 240 mm'ye geldiğinde deneye devam etmenin bir anlamı olmadığı düşünülmüş, deneye son verilmiştir.

Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Basınç levhası bulonlarından uçlarda olanları eğilmiştir, kesilme çok az olmuş ve bulon çaplarının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Çekme levhasının boydan 120 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 5 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Kalınlıkta bir değişim oluşmamıştır. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deney sonuna kadar sürdürmüştür. Yalnız çekme levhası kesitinin ortadan kenara doğru akmaya başladığı deney sırasında gözlenmiştir. Levha gerildikçe kenarlar kirişten uzaklaşarak balık sırtı şeklini almıştır.



Resim 4.20. S2 deney elemanı



Şekil 4.50. S2 elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.21. S2 elemanında görülen hasarlar



Resim 4.22 Basınç levhasını tutan bulonlardan biri

4.6.5. S3: Güçlendirilmiş kiriş

S3, eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha yapıştırılarak güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır.

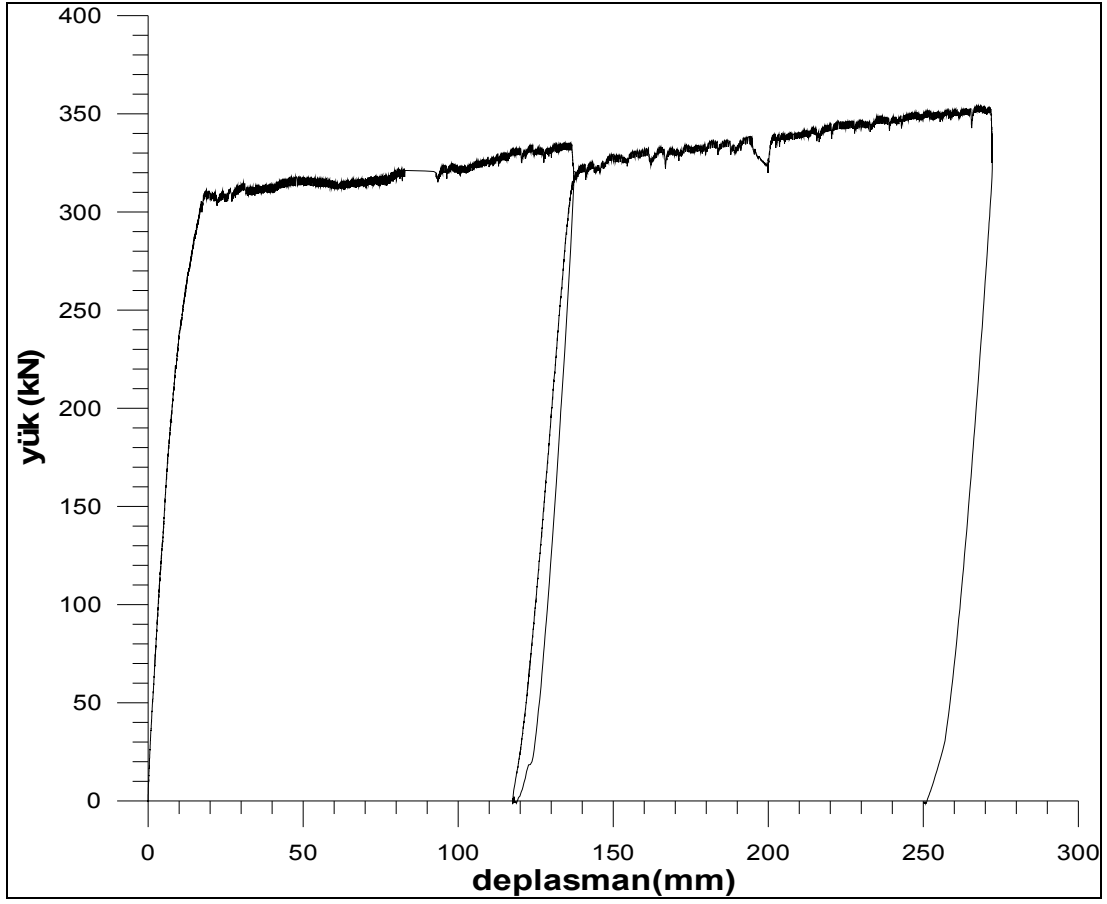
Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlağı 80 kN yük, 2,5 mm deplasmanda oluşmuştur. 309 kN yük, 20 mm deplasmanda eleman akmıştır. Yüklemeye

devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlakları sınırlı ve kılcal düzeyde kalmıştır. Deney boyunca betonda ezilme gerçekleşmemiştir. Deney süresince eleman dayanım kaybetmeden deplasman yapmış, 350 kN yük, 270 mm deplasmanda çerçeve ve yük hücresinin kapasitesi dolduğu için deney durdurulmuştur.

Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Basınç levhasını tabliyeye tutturun bulonlarda oluşan yüksek gerilmelerden dolayı tabliyede çatlaklar oluşmuştur. Çekme levhasının boydan 125 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 5 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Levhalar aynı zamanda yapıştırıldığı için kirişle beraber yük almaya başlamıştır. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür.



Resim 4.23. S3 deney elemanı



Şekil 4.51. S3 elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.24. S3 elemanında görülen hasarlar

4.6.6.S4: Güçlendirilmiş kiriş

S4, eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt yüzden düz çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Yapıştırımda epoksi kullanılmıştır. Deneyden önce kesme gijonları 12 Nm torkla (yaklaşık 600 kgf) sıkılmıştır.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlak 135 kN yük, 7,5 mm deplasmanda oluşmuştur. Deney ilerledikçe eğilme çatlakları ile beraber ani gelişen kesme çatlakları oluşmuştur. Mesnet bölgesinde çatlak olunca rijitlikte değişim olmuştur. 280 kN yük, 20 mm deplasmanda eleman akmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlakları sınırlı ve kılcal düzeyde kalmıştır. Kesme gijonlarının baskısıyla alt levhada dalgalanmaya benzer şekiller oluşmuştur. 300 kN yük, 100 mm deplasmanda ortada geniş bir bölgeyi kaplayacak şekilde tabliye ezilmiştir. Tabliye 8 mm donatıları akabinde burkulmuştur. Eleman maksimum 321 kN yüke çıkmış, 150 mm deplasmandan sonra hızla yük kaybetmiştir. Eleman bir miktarda yanal burkularak eğilmeden göçmüştür.

Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 55 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 3,5 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Çekme levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür. Deney sonunda kesme saplamalarında bir gevşeme olmamıştır. Alt levhada iki saplama arasında kalan kısımda oluşan hilal şekilleri, deformasyonların saplamalardaki art germeden dolayı sınırlı alanda kalmasından oluşmaktadır. Böylece bazı bölgelerde diğerlerine göre oldukça fazla gerilme yığılması oluşmaktadır. Bu gerilme yığılmaları ise levhanın boylu boyunca uzamasını engellemekte sadece birkaç bölgenin deformasyon yapmasına neden olmaktadır.



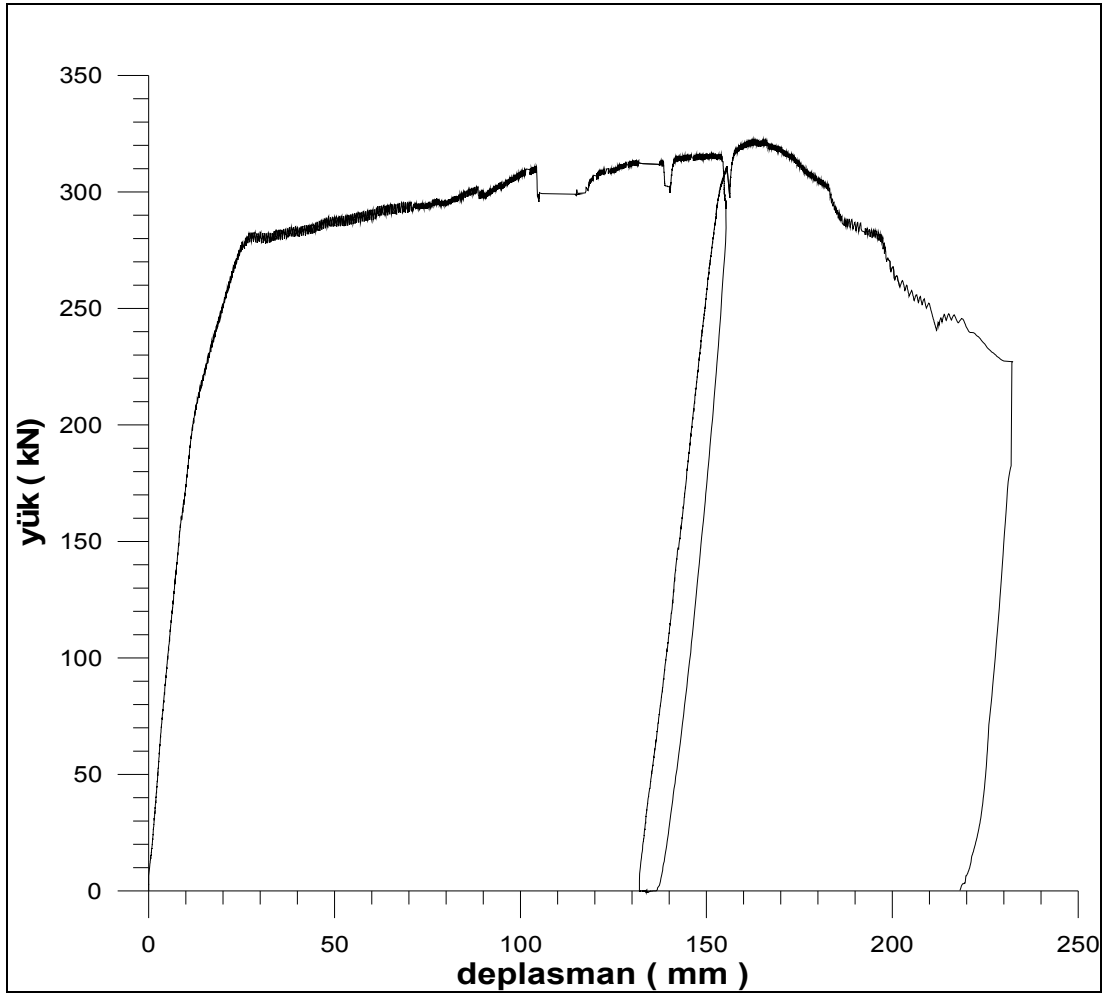
Resim 4.25. S4 deney elemanı



Resim 4.26.S4 deney elemanı hasarlarının yoğunlaştığı orta bölge



Resim 4.27.Çekme levhasında oluşan yay şeklinde deformasyon



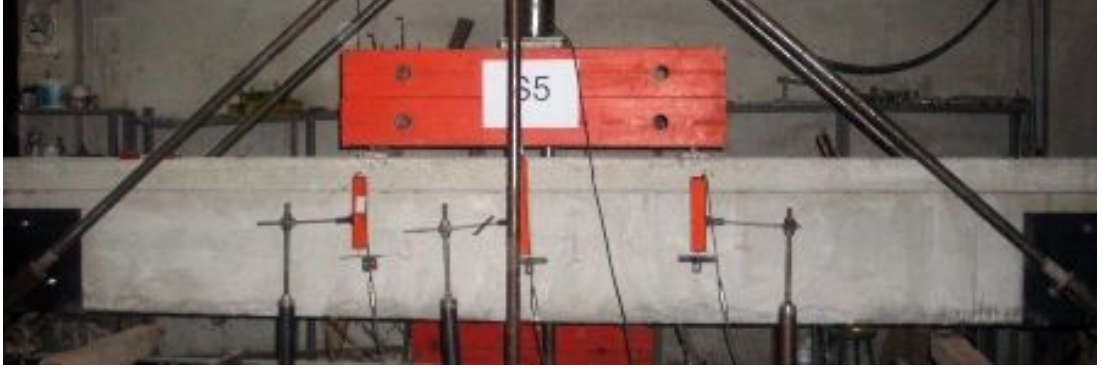
Şekil 4.52. S4 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.7. S5: Güçlendirilmiş kiriş

Eğilme zorlanmasına karşı sadece alt yüzden düz çelik levha ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Elemanın kesmeden gitmesi beklenmektedir.

İlk çatlak, 126 kN yük, 6 mm deplasmanda kesme karakterinde oluşmuştur. Yük arttıkça kesme çatlakları gelişim göstermiş, eğilme çatlağı oluşmamıştır. İlk eğilme çatlağı ise 180 kN, 9 mm deplasmanda oluşmuştur. Eğilme çatlağından sonra kesme çatlakları yaygınlaşmaya ve aralıkları açılmaya devam etmiştir. Maksimum kesme çatlağı açıklığı 1,5 mm'ye çıkmıştır. 290 kN yük, 18mm deplasmanda deney grafiğinde yatay hareket başlamıştır. 294 kN yüke gelindiğinde hidrolik yük ünitesi sorun çıkarmış, yük boşaltılarak el pompası takılmış ve deneye devam edilmiştir. Yük eski değerine geldiğinde grafiğin gidişatına bakılmış ve elemanın 290 kN yük, 18mm deplasmanda aktığı kanaatine varılmıştır. 295 kN yük, 24 mm deplasmana gelindiğinde eğilme çatlakları belirginleşmiştir. Yük 300 kN olduğunda eleman kesme ve eğilme göçmesi arasında kritik duruma girmiştir. Yük maksimum 323 kN değerine çıkmıştır. 320 kN yük, 102 mm deplasmanda tabliye yaygın bir alanda aniden ezilmiş, basınç donatıları burkulmuş ve yükte büyük kayıp olduğundan deneye son verilmiştir.

Sonuçta deney elemanı kesmeden çok ağır hasarlar alsa da sınır durumda eğilmeden gitmiştir. Bu duruma sebep olarak uç yan levha ve bulonlarının kesmeye karşı etkisi, düz çelik levhanın kaldıraç etkisi düşünülebilir. Ancak etriyeler eksik ($\varnothing 8/500$) olduğu için beton basınç bölgesi sargılama yetersizliğinden dolayı beton ezilmiş, basınç donatıları burkularak nispeten az sünek davranış sergilemiştir. Deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 40 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 3 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Çekme levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür.



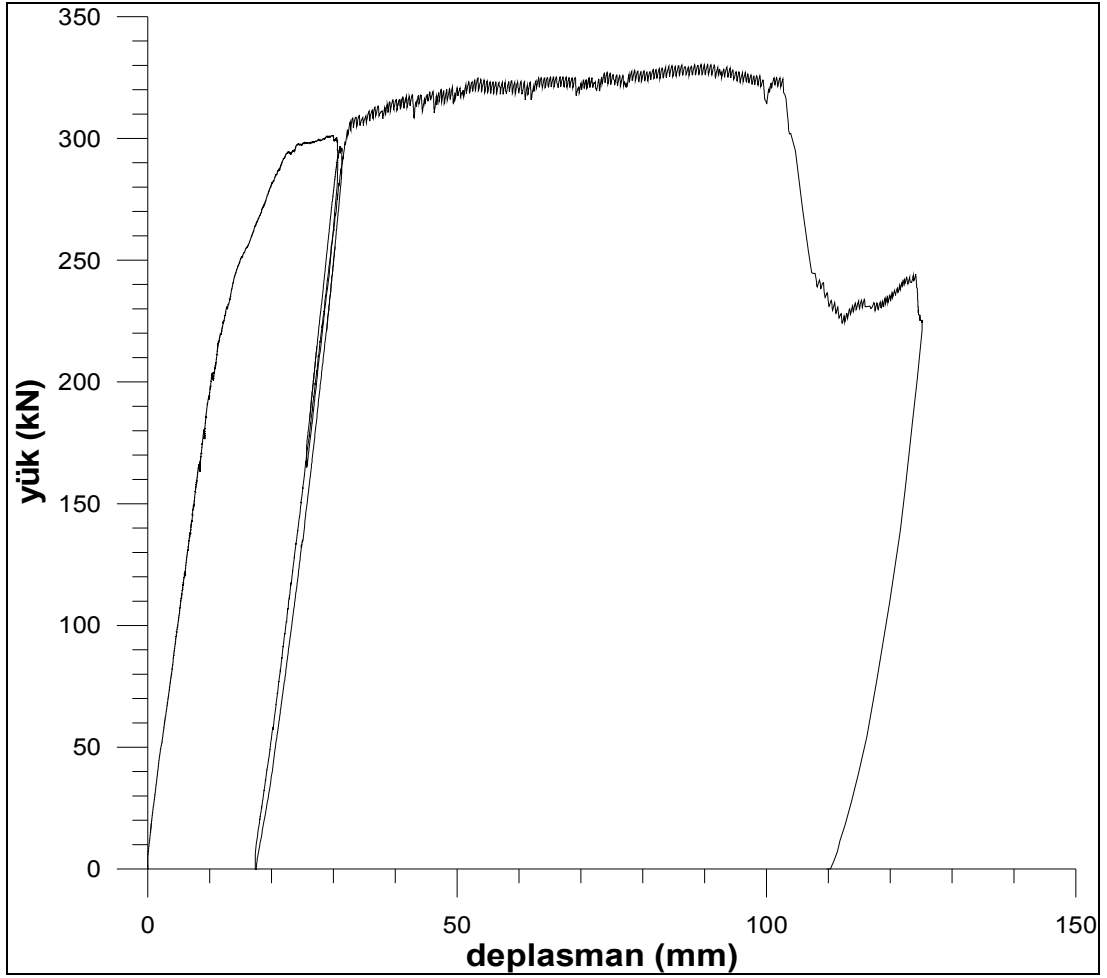
Resim 4.28. S5 deney elemanı



Resim 4.29. S5 deney elemanı hasarları genel görünüm



Resim 4.30. S5 deney elemanı ezilme bölgesi, molozlardan temizlenmiş



Şekil 4.53. S5 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.8. S6: Güçlendirilmiş kiriş

S6; eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden düz çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Levhalar epoksi ile yapıştırılmıştır. Deneyden önce kesme gijonları 12 Nm torkla (yaklaşık 600 kgf) sıkılmıştır.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlakları 175 kN yük, 6,5 mm deplasmanda oluşmuştur. Deney ilerledikçe eğilme çatlakları ile beraber ani gelişen kesme çatlakları oluşmuştur. Kesme çatlakları sağ ve solda simetrik olarak oluşmuştur. 300 kN yük, 23 mm deplasmanda eleman akmıştır. Yüklemeye

devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlaklarının gelişmesi yavaşlamıştır. Kesme gijonlarının baskısıyla alt levhada dalgalanmaya benzer şekiller oluşmuştur. Eleman yük kaybetmeden deney sonuna kadar deformasyon yapmıştır. 360 kN yüke gelindiğinde yük hücresi ölçüm kapasitesi dışına çıkmıştır. Bu noktadan sonra kirişe bir miktar daha sehim yaptırılmış, deplasman 280 mm'ye geldiğinde deneye devam etmenin bir anlamı olmadığı düşünülmüş, deneye son verilmiştir. Deney sonunda yeni yeni betonda ezilme belirtileri olduğu görülmüştür.

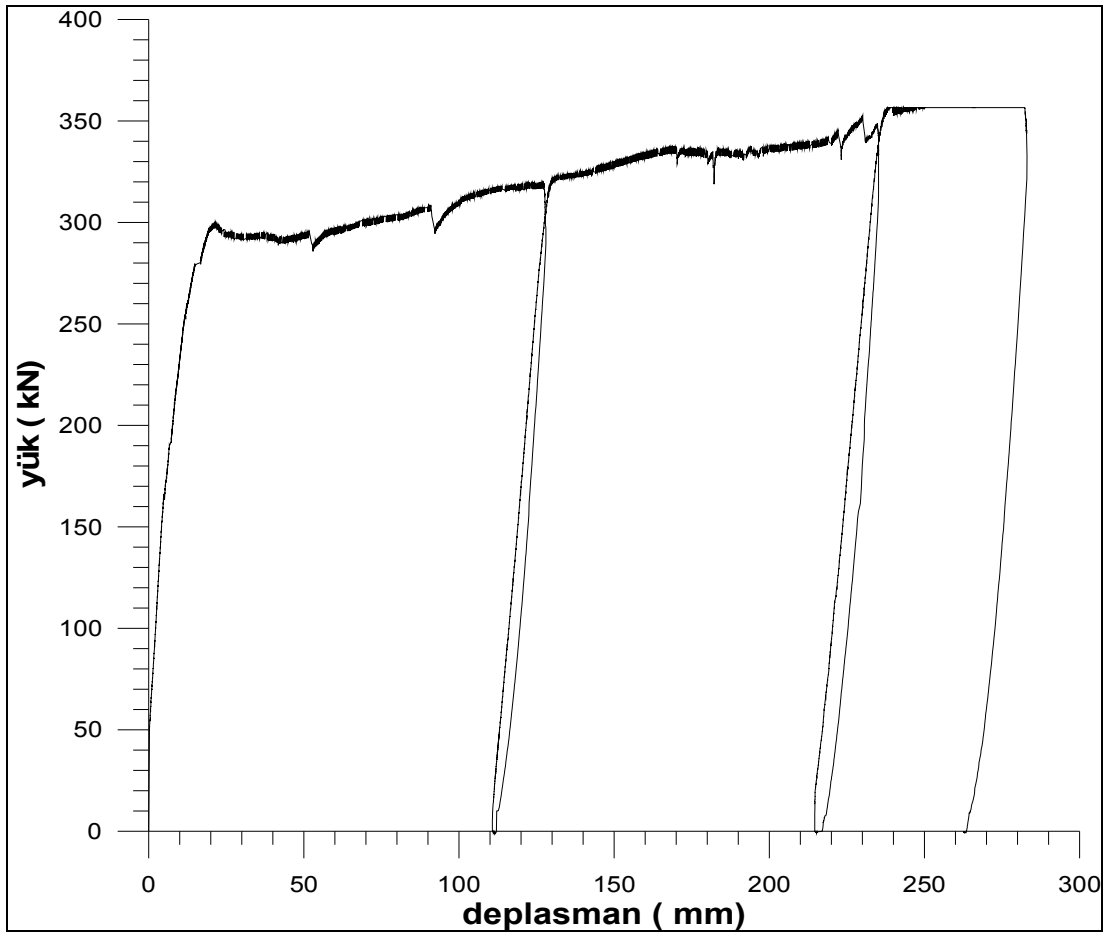
Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 127 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 6 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür. Deney sonunda kesme saplamalarında bir gevşeme olmamıştır. Alt levhada iki saplama arasında kalan kısımda oluşan hilal şekilleri, deformasyonların saplamalardaki art germeden dolayı sınırlı alanda kalmasından oluşmaktadır.



Resim 4.31. S6 deney elemanı



Resim 4.32. S6 deney elemanı hasarları genel görünüm



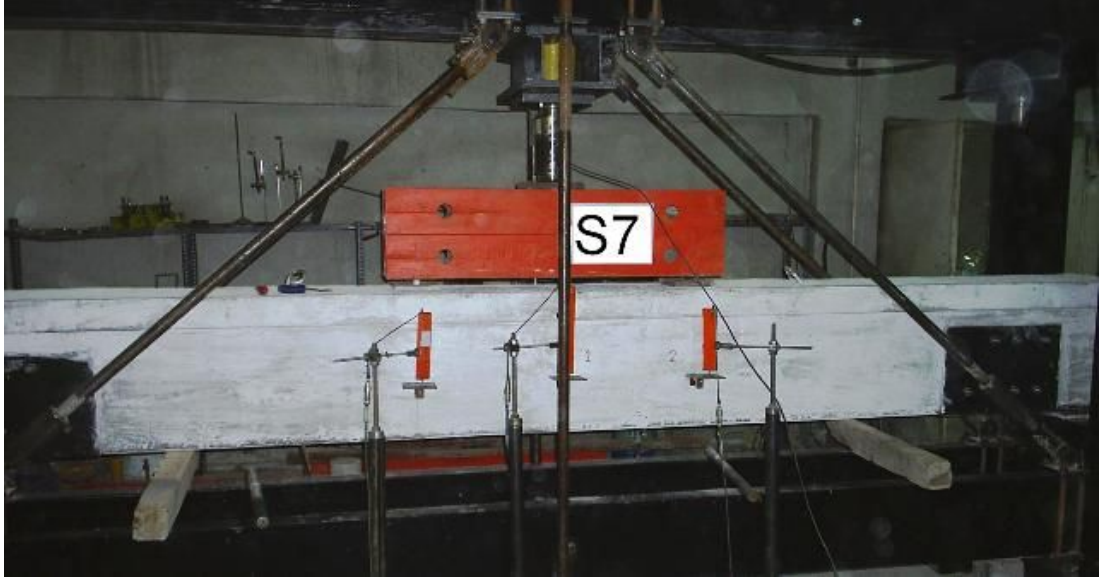
Şekil 4.54. S6 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.9. S7: Güçlendirilmiş kiriş

S7; eğilme zorlanmasına karşı alt yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır. Güçlendirmede epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır.

Yükleme başladıktan sonra ilk çatlak sol kesme bölgesinde 75 kN yük, 5 mm deformasyonda oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları ise 100 kN yük, 6 mm deplasmanda oluşmuştur. Yükleme devam edildiğinde eğilme çatlakları gelişmiş, kesme çatlakları kılcal düzeyde kalmıştır. 221 kN yük, 20 mm deformasyon değerinde eleman akmaya başlamıştır. Yük 228 kN, deplasman 36 mm'ye geldiğinde çekme levhasında aderans çatlakları belirmiştir. 238 kN, 81 mm'de beton ezilmiştir. Elemanın ulaşabildiği maksimum yük 240 kN olmuştur. 225 kN, 102 mm'de tabliye 8'lik donatıları burkulmuştur. 158 mm deplasmanda yükte büyük miktar düşme yaşandığı için deneye son verilmiştir.

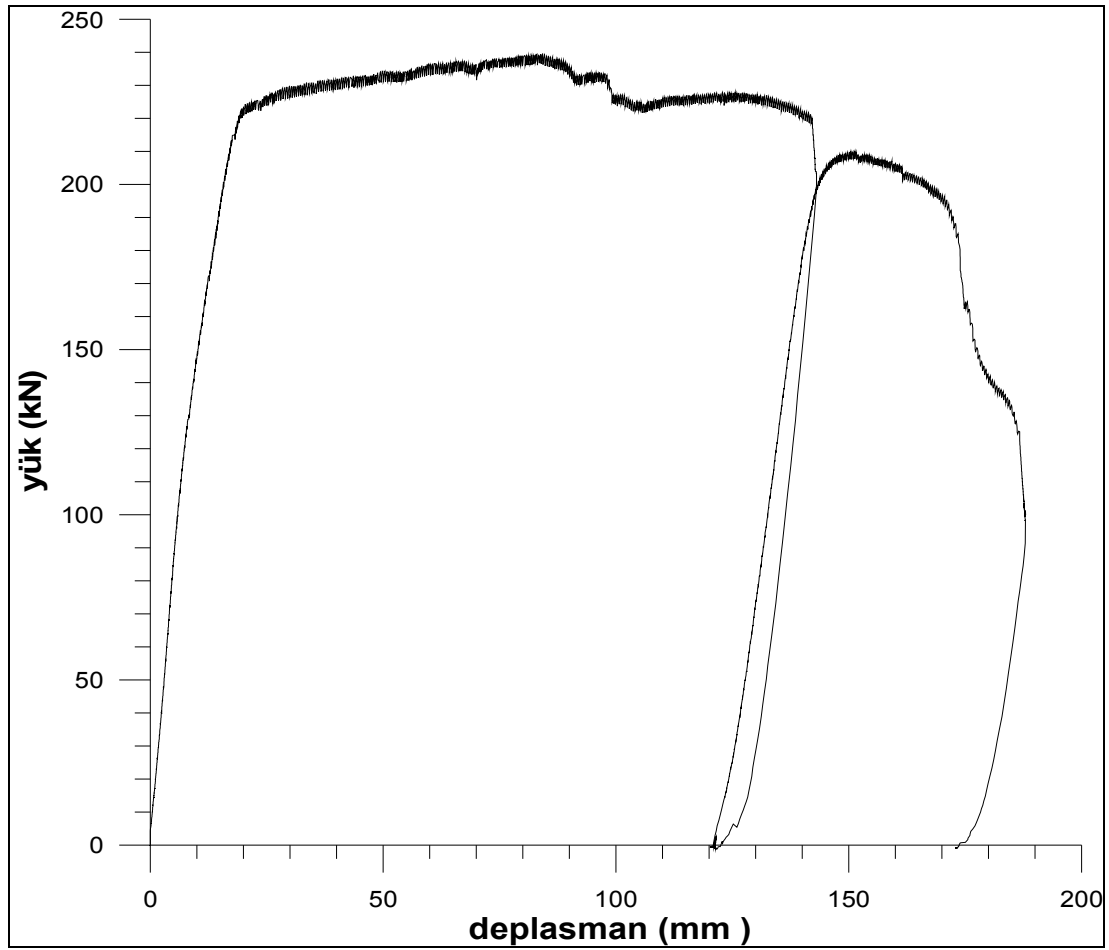
Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 65 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 3 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Kalınlıkta bir değişim oluşmamıştır. Çekme levhası etkinliğini deney sonuna kadar sürdürmüştür.



Resim 4.33. S7 deney elemanı



Resim 4.34. S7 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge



Şekil 4.55. S7 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.10. S8: Güçlendirilmiş kiriş

S8; eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ile epoksi yapıştırıcı kullanılmadan güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır. Eleman çerçeveye yerleştirildiğinde çekme levhası epoksi ile yapıştırılmadığı için, levhada sarkma oluşmuştur. Kiriş alt yüzünden maksimum sarkma miktarı 10 mm olarak ölçülmüştür.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlakları 45 kN yük, 2 mm deplasmanda oluşmuştur. 3,5 mm deplasmanda levha ile kiriş alt yüzü arasındaki boşluk tamamen kapanmış, levha çalışmaya başlamıştır. Yükleme devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlakları sınırlı ve kılcal

düzeyde kalmıştır. Yük 225 kN olduğunda hidrolik yük pompası patlamış deneye ara verilmiş, hortum onarılmış, yerine el pompası takılarak yüklemeye devam edilmiştir. 230 kN yük, 30 mm deplasmanda eleman akmaya girmiştir. Deney devam ettikçe eğilme çatlakları genişlemeye devam etmiştir. 270 kN yük, 84 mm deplasmanda tabliyede ezilme oluşmuştur. Yük artarak 280 kN'a deplasman da artarak 285 mm'ye geldiğinde yükleme çerçevesinin kapasite sınırına yaklaşıldığı için, deneye son verilmiştir.

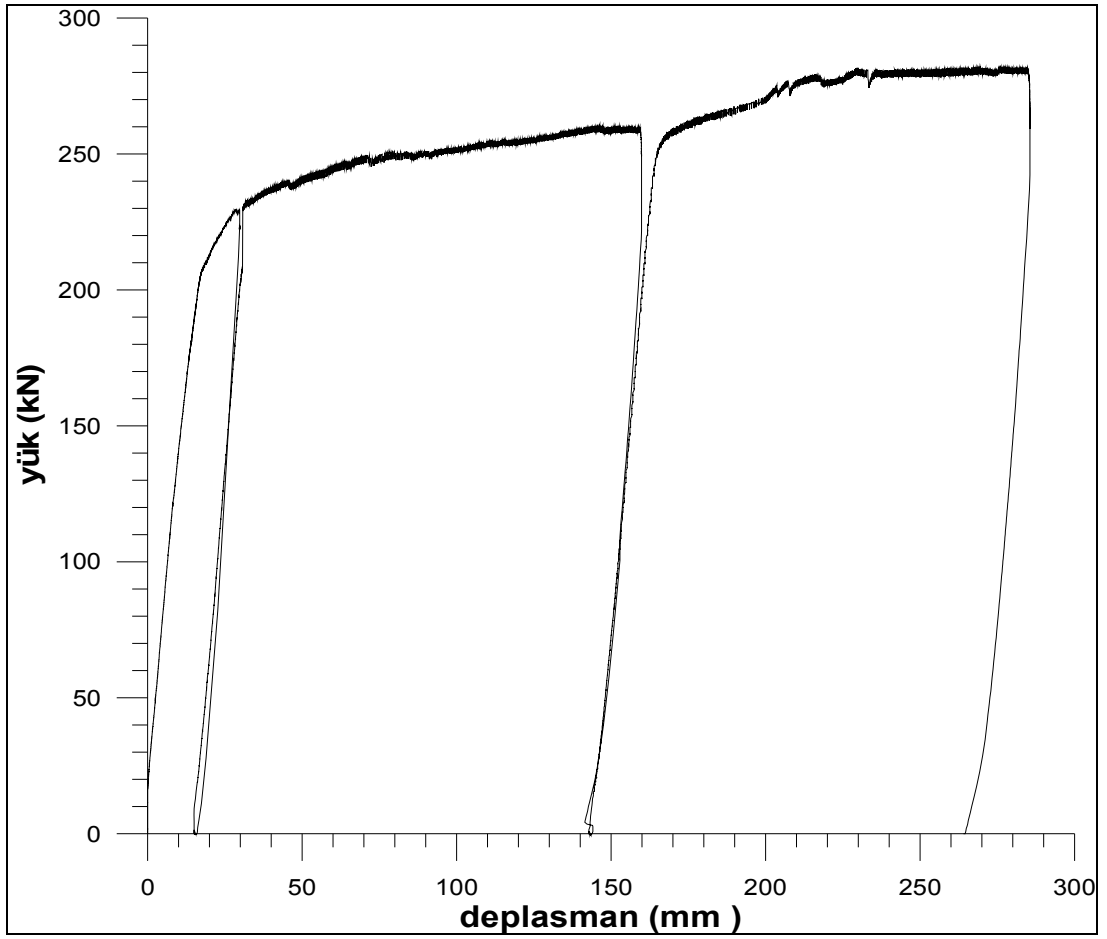
Sonuçta deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Basınç levhası bulonlarının kesme kuvveti almasıyla, tabliyede kılcal düzeyde çatlaklar oluşmuştur. Çekme levhasının boydan 130 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 6 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Levhadaki delikler ovalleşerek elips şeklini almıştır. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deney sonuna kadar sürdürmüştür. Yalnız çekme levhası kesitinin ortadan kenara doğru akmaya başladığı deney sırasında gözlenmiştir. Levha gerildikçe kenarlar kırıktan uzaklaşarak balık sırtı şeklini almıştır.



Resim 4.35.S8 deney elemanı



Resim 4.36. S8 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge



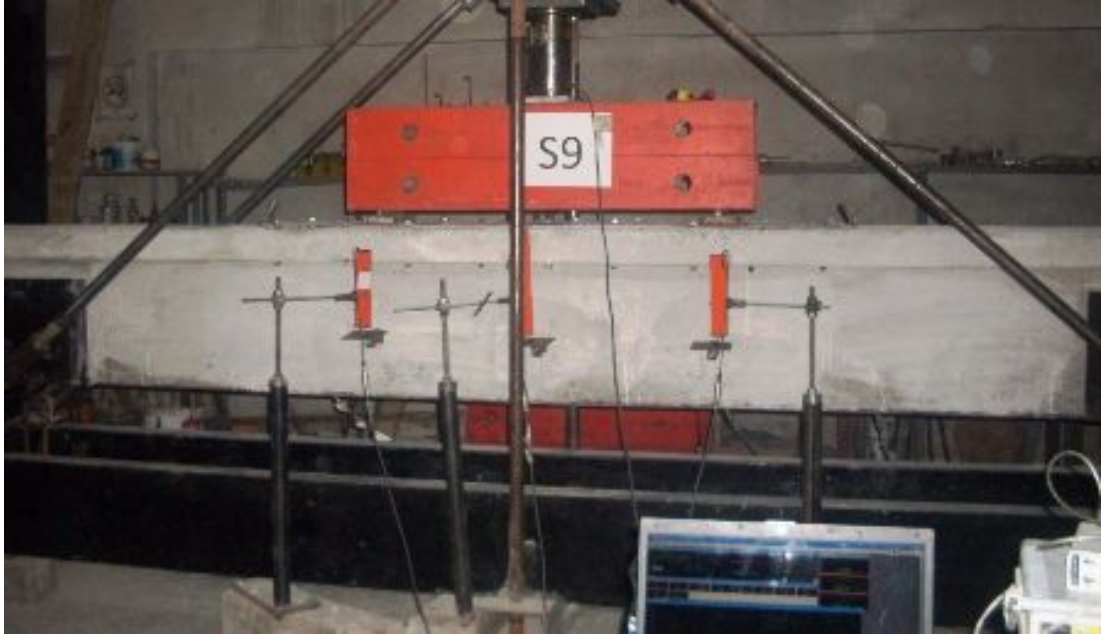
Şekil 4.56. S8 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.11. S9: Güçlendirilmiş kiriş

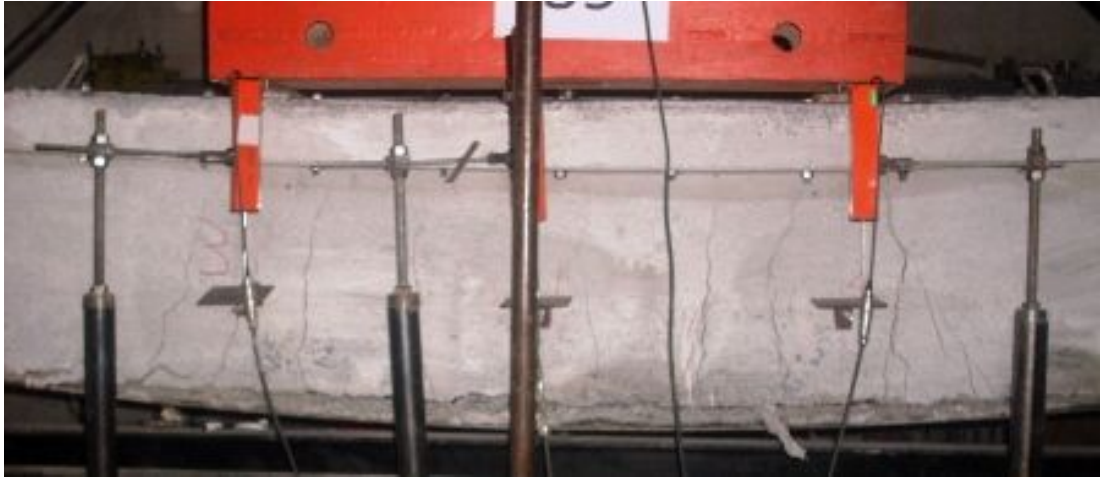
S9; eğilme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen tam etriyeli deney elemanıdır. Yapıştırma epoksi kullanılmıştır.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlağı 80 kN yük, 3,8 mm deplasmanda oluşmuştur. 270 kN yük, 25 mm deplasmanda eleman akmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlakları sınırlı ve kılcal düzeyde kalmıştır. 298 kN yükte çekme levhasında aderans çözümleri oluşmuştur. Deney süresince eleman dayanım kaybetmeden deplasman yapmış, 300 kN yük, 210mm deplasmanda ard arda kirişin ana çekme donatıları koptuğu için deney tamamlanmıştır. Deney sonuna doğru betonda ezilme yeni başlamıştır.

Sonuçta delikli levhanın deformasyon yeteneği o kadar fazla ki levhada yırtılma olmamış, ondan önce 3 adet çekme donatısı kopmuştur. Deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Çekme levhasının boydan 130 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 8 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Levhalar aynı zamanda yapıştırıldığı için kirişle beraber yük almaya başlamıştır. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür.



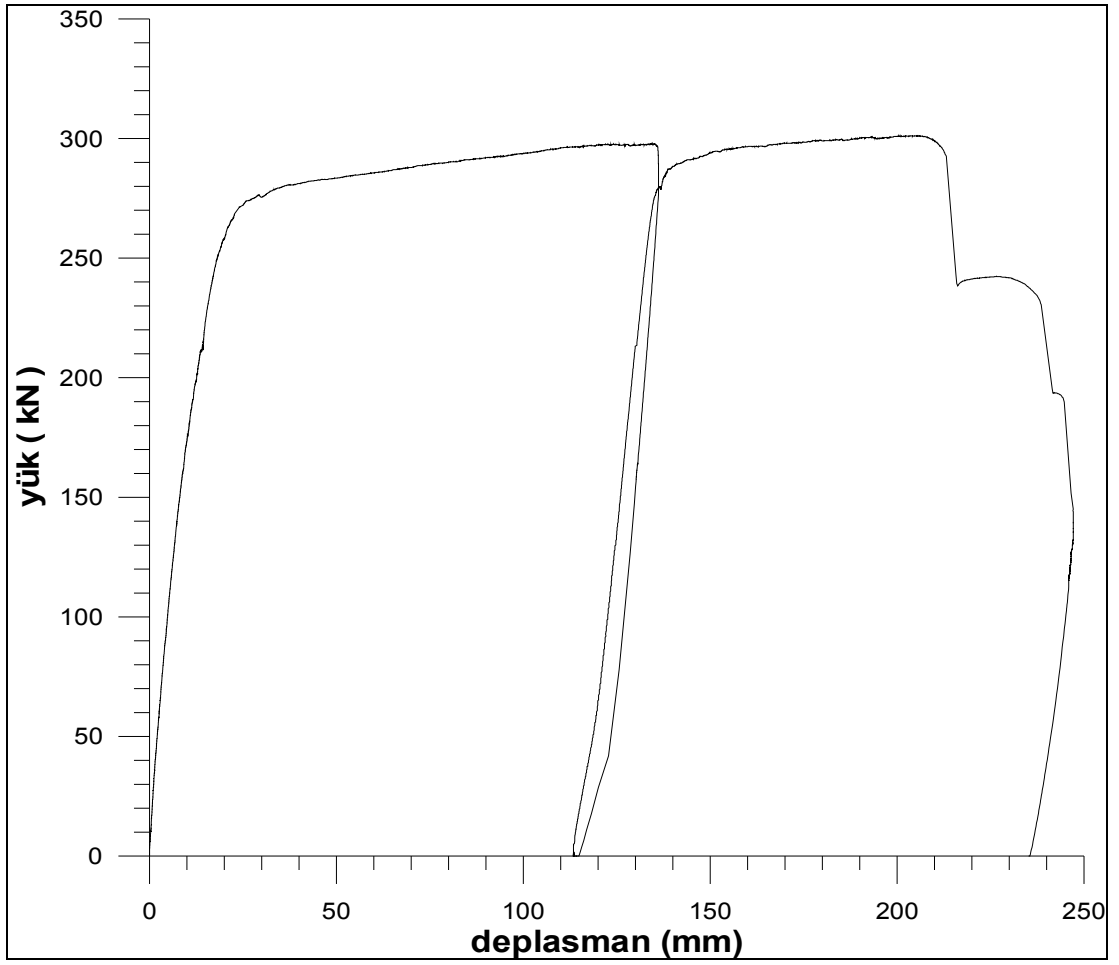
Resim 4.37. S9 deney elemanı



Resim 4.38. S9 deney elemanı hasarların yoğunlaştığı bölge



Resim 4.39.S9 deney elemanında kopan çekme donatıları



Şekil 4.57. S9 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.12. S10: Güçlendirilmiş kiriş

S10; eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt yüzden delikli çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Yapıştırırmada epoksi kullanılmıştır.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlak 100 kN yük, 6,7 mm deplasmanda oluşmuştur. 130 kN yük 10 mm deplasmanda sağ mesnete yakın bölgede kesme çatlak oluşmuştur. Yüklemeye devam edildikçe kesme çatlaklarının sayısında artma olmuştur. 200 kN yük, 20 mm deplasmanda elemanda akma belirtisi olmuştur. 195kN yük, 50 mm deplasmanda tabliye betonu ezilmiştir. Bu yük değerinde delikli levha koptuğu için deneye son verilmiştir.

Sonuçta, saplamalardaki ard germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında yoğunlaşmış ve levha kopmuştur. Çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi olmamıştır.



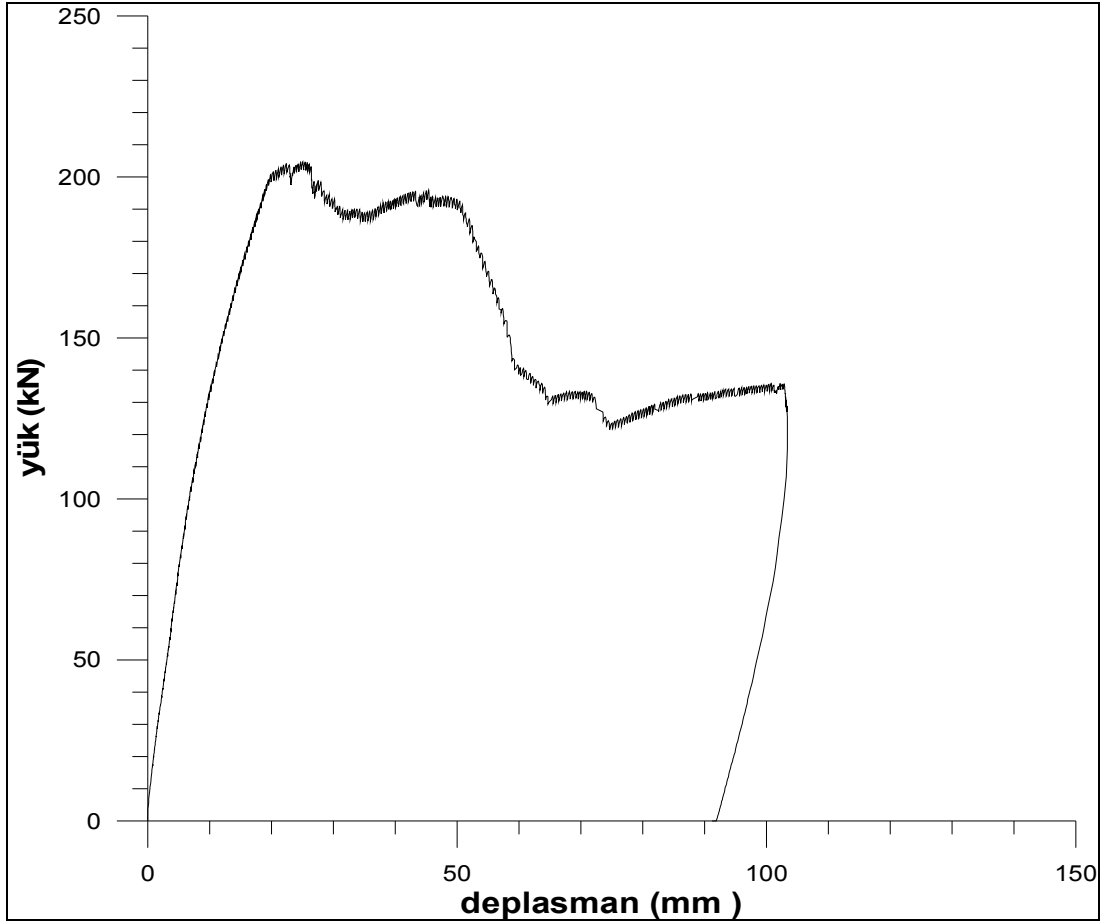
Resim 4.40.S10 deney elemanı



Resim 4.41.S10 deney elemanı levhanın koptuğu bölge



Resim 4.42.S10 deney elemanı kopan levha



Şekil 4.58. S10 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.13. S11: Güçlendirilmiş kiriş

S11, eğilme zorlanmasına karşı sadece alt yüzden delikli çelik levha ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Yapıştırımda epoksi kullanılmıştır. Elemanda kesme kırılması beklenmektedir.

Deney başladıktan sonra ilk eğilme çatlağı 50 kN yük, 2,2 mm deplasmanda oluşmuştur. 95 kN yük 6 mm deplasmanda sağ ve sol kesme bölgesinde çatlak oluşmuştur. Yükleme devam edildikçe kesme çatlaklarının sayısında artma olmuş ve kesme çatlakları eğilme çatlaklarından çok daha kritik duruma gelmiştir. 216 kN yük, 25 mm deplasmanın hemen ardından eleman sağ kesme bölgesinden gitmiştir.

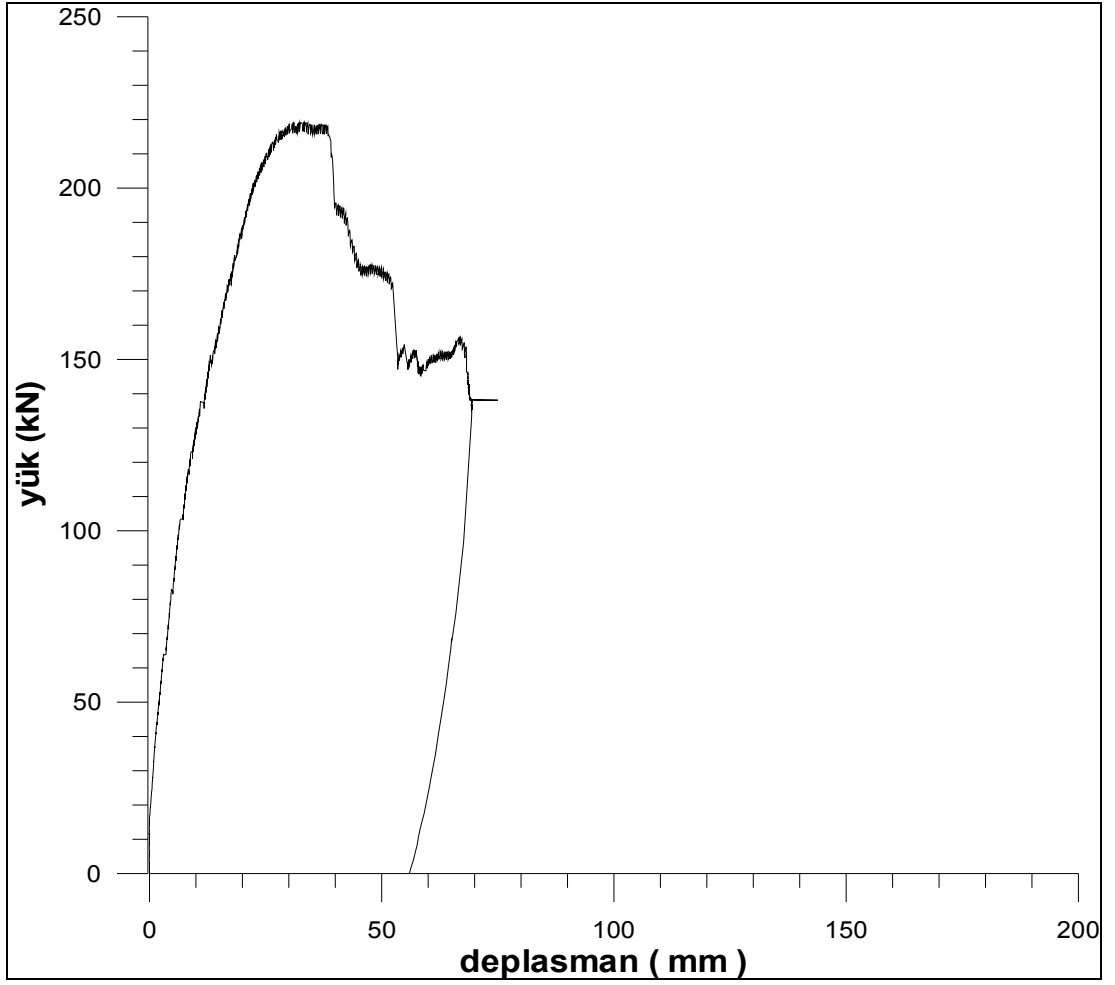
Sonuçta eleman beklendiği gibi kesmeden kırılmıştır. Delikli levha düz levhaya göre daha fazla deformasyona müsaade ettiği için kesme kuvvetine karşı kaldıraç etkisi sınırlı kalmıştır. Deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Çekme levhasının boydan 10 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 1 mm kısaldığı tespit edilmiştir.



Resim 4.43.S11 deney elemanı



Resim 4.44.S11 deney elemanındaki kesme kırılması



Şekil 4.59. S11 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.14. S12: Güçlendirilmiş kiriş

S12; eğilme-kesme zorlanmasına karşı alt ve üst yüzden delikli çelik levha ve kesme gijonları ile güçlendirilen eksik etriyeli deney elemanıdır. Yapıştırırmada epoksi kullanılmıştır. Deneyden önce kesme gijonları 12 Nm torkla (yaklaşık 600 kgf) sıkılmıştır.

Yükleme başladıktan sonra ilk çatlak eğilme karakterinde 75 kN yük, 4mm deplasmanda oluşmuştur. İlk kesme çatlağı ise 115 kN yük, 6,5 mm deplasmanda oluşmuştur. Deney ilerledikçe eğilme çatlakları ile beraber gelişen kesme çatlakları oluşmuştur. 250 kN yük, 23 mm deplasmanda

eleman akmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde eğilme çatlakları hızla ilerlemiş, kesme çatlaklarının gelişmesi yavaşlamıştır. Kesme gijonlarının baskısıyla alt levhada dalgalanmaya benzer şekiller oluşmuştur. Tabliyede yatay çatlaklar oluşmuş bu da basınç levhası bulonlarının kesmeye çalışmasından kaynaklanmıştır. Yük 275 kN, deformasyon 142 kN olduğunda iç çekme donatıları kopmuş, dolayısıyla deneye son verilmiştir.

Sonuçta delikli levhanın deformasyon yeteneği o kadar fazla ki levhada yırtılma olmamış, ondan önce çekme donatıları kopmuştur. Deneyin sonunda bile çekme levhasını tutan uç yan levha ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Çekme levhasının boydan 135 mm uzadığı, enden orta bölgede maksimum olarak 15 mm kısaldığı tespit edilmiştir. Çekme ve basınç levhası etkinliğini deneyin başından sonuna kadar sürdürmüştür. Deney sonunda kesme saplamalarında bir gevşeme olmamıştır. Alt levhada iki saplama arasında kalan kısımda oluşan hilal şekilleri, deformasyonların saplamalardaki art germeden dolayı sınırlı alanda kalmasından oluşmaktadır.



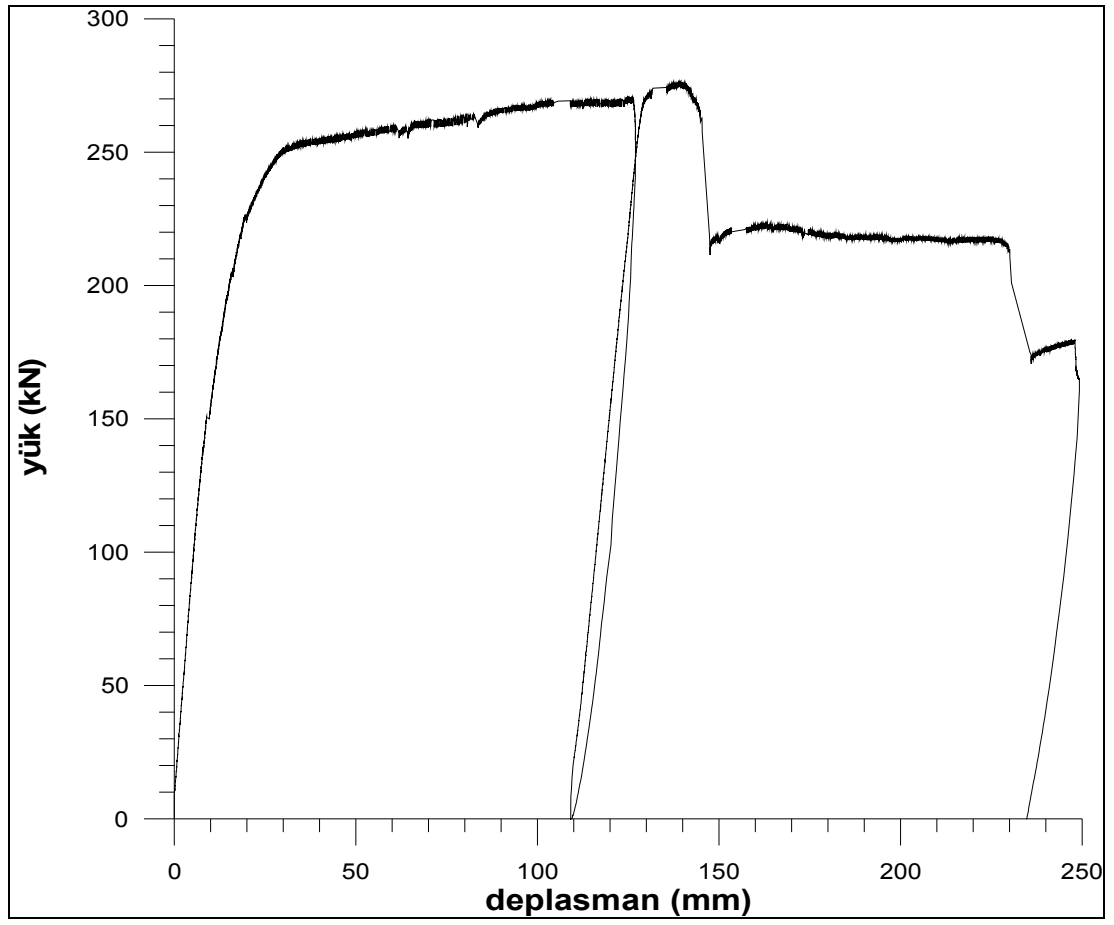
Resim 4.45. S12 deney elemanı



Resim 4.46.S12 deney elemanı hasarları



Resim 4.47.S12 deney elemanı kopan çekme donatısı



Şekil 4.60. S12 elemanı yük-deplasman ilişkisi

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Genel

Bu bölümde, 4. bölümde anlatılan sistem ve yöntemlerle gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen bilgiler; taşıma güçlerine, süneklik oranlarına, enerji tüketme yeteneklerine ve eğilme rijitliklerine göre değerlendirilmesi ve uygun olanlar arasında karşılaştırmaları yapılmıştır.

Ayrıca analitik olarak hesaplanmış ve deneylerden elde edilmiş akma dayanımları birbiriyle de kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar grafikler ve çizelgelerle ifade edilmiştir.

Delikli çekme levhasının eş değer en kesit alanı $9,6 \text{ cm}^2$, düz levhanın en kesit alanı ise 12 cm^2 'dir. Bundan dolayı delikli ve düz levhalı elemanlar arasında kıyaslama yapılırken, o elemanların analitik akma hesap dayanımları oranlanmış, çıkan katsayı çarpanıyla delikli levha kullanılan elemanların yük verileri sanki her iki elemanda eşit en kesit alanlı levhalar kullanılmışçasına normalize edilmiştir.

İkinci aşama olarak sonuçlar Uysal'ın [1] çalışmasıyla karşılaştırılmış ve delikli ve deliksiz levhalarla güçlendirme uygulamaları değerlendirilmiştir.

5.2. Deneylerden Elde Edilen Akma Dayanımlarının Analitik Olarak Hesaplanan Akma Dayanımları ile Karşılaştırılması

Çizelge 5.1. Elemanların hesap ve deneysel akma yükleri

Eleman	Eksik Dayanım Türü	Saç Levha Türü	Saç Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme	Py Deney (kN)	Py Hesap (kN)	P_Den/ P_Hes
RB	Eğilme	---	---	---	117	117	1.00
RS	Eğilme+Kesme	---	---	---	117	117	1.00
S1	Eğilme	Düz	Alt yüz, Epoksili	---	293	298	0.98
S2	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	272	335	0.81
S3	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	309	335	0.92
S4	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Var	280	298	0.94
S5	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Yok	290	298	0.97
S6	Eğilme+Kesme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	300	335	0.90
S7	Eğilme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	---	221	263	0.84
S8	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	230	292	0.79
S9	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	270	292	0.92
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Var	200	263	0.76
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Yok	216	263	0.82
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	250	292	0.86

Çizelge 4.3.'den de anlaşılacağı gibi RB ve RS yalın elemanlarının hesap ve deneysel akma yükü aynıdır. Buradan betonarme kirişlerin ve kullanılan

malzemenin eğilmeye karşı büyük ölçüde tasarımıdaki gibi olduğu ve üretildiği sonucu çıkmıştır.

Levhaların epoksi ile yapıştırıldığı elemanlar karşılaştırıldığında düz levha yapıştırılmış elemanların hesaplanan akma yüküne ortalama %94 yakınlıkta, delikli levha yapıştırılmış elemanların ise hesaplanan akma yüküne ortalama %84 yakınlıkta olduğu görülmektedir. Aradaki bu farkın delikli levhanın en kesit yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Buradan çıkan en çarpıcı sonuç, levhanın yapıştırılmadığı elemanlarda levhadaki akma tüm liflerde aynı anda başlayamadığından akma kesite ortadan kenara doğru ve yavaş yavaş yayılmaya başlıyor. Bundan dolayı hesaplanan akma yükünün %80'i dolaylarında bu elemanlar akmıştır. Ancak bu elemanlar olması gereken nihai dayanımına bir süre deformasyondan sonra ulaşmıştır (bkz.Çizelge 5.2).

Bu veriler ele alındığında deney akma yükleri oldukça tutarlı sonuçlar vermiştir. Oluşan sapmaların nedenleri açıktır. Bu tekniklerle güçlendirilen kirişlerin hesaplamalarında bir takım azaltma katsayılarıyla birlikte klasik yolların kullanılabileceği görülmüştür.

5.3 Taşıma gücü

Çizelge 5.2. Elemanların deneysel akma ve maksimum yükleri

Eleman	Eksik Dayanım Türü	Saç Levha Türü	Saç Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme	Py Deney (kN)	Pu Deney (kN)	Py/ Pu
RB	Eğilme	---	---	---	117	135	1,15
RS	Eğilme+Kesme	---	---	---	117	136	1,16
S1	Eğilme	Düz	Alt yüz, Epoksili	---	293	310	1,06
S2	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	272	>350	1,29
S3	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	309	>350	1,13
S4	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Var	280	321	1,15
S5	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Yok	290	323	1,11
S6	Eğilme+Kesme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	300	>350	1,17
S7	Eğilme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	---	221	240	1,09
S8	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	230	280	1,22
S9	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	270	300	1,11
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Var	200	202	1,01
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Yok	216	217	1,00
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	250	275	1,10

Çizelge 5.2 ve deneylerin gelişimi ışığında elemanlar, taşıma güçleri açısından beraber değerlendirildiğinde;

Yalın elemanla kıyaslandığında düz levha kullanılan elemanların taşıma gücü yaklaşık 2,5 kat artmış, delikli levha kullanılanları ise yaklaşık 2,2 kat artmıştır.

Basınç levhasının taşıma gücüne katkısının küçümsenmeyecek değerde olduğu gözükmemektedir.

Burada da görülmektedir ki, levhanın yapıştırılmadığı elemanlarda levhadaki akma tüm liflerde aynı anda başlayamadığından akma kesite ortadan kenara doğru ve yavaş yavaş yayılmaya başlıyor. Bundan dolayı bu elemanlarda akma, epoksi ile yapıştırılana oranla ortalama %15 daha erken bir yük değerinde başlamıştır. Ancak bu elemanlar olması gereken nihai dayanımına bir süre deformasyondan sonra ulaşmıştır. Levhaları epoksi ile yapıştırılan ve yapıştırılmayan elemanların nihai dayanımları yaklaşık eşit olmuştur. Maksimum yük ve akma yükleri oranlandığında bu fark kendini açık bir şekilde ifade etmiştir.(bkz.Çizelge 5.2)

Maksimum yük ve akma yüklerine bakıldığında basınç levhası kullanılan elemanların akma yükünden sonra, kullanılmayanlara göre, yükte artış daha fazla olmuştur. Deneysel verilerde; ister kirişler eğilmeye, isterse eğilme-kesmeye karşı güçlendirilmiş olsun bu uygulama tekniği ile taşıma gücü açısından bir sorun olmadığı görülmüştür.

5.4. Süneklik

Deney elemanlarının tümünün hedeflenen teorik dayanımlara ulaşmıştır. Ancak dayanım kadar önemli diğer konu ise bu dayanımların ne kadar süre korunduğu yani elemanların ne kadar sünek davrandığıdır. Süneklik, dayanımda önemli bir kayıp olmaksızın deformasyon yapabilme yeteneği olduğu için süneklik oranı ulaşılan dayanımın ne kadar korunduğunun iyi bir göstergesi olacaktır. Bu oranın genellikle 4~5'den daha küçük olması istenmez. Bu çalışmada süneklik oranı ulaşılan en büyük yükün %15 dayanım kaybettiği noktadaki deplasman değerinin akma anındaki deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.3'de elemanların süneklik oranları ve RB ve RS elemanı süneklik oranı 1 kabul edilerek tam ve eksik etriyeli elemanlarda ayrı ayrı hesaplanan göreceli süneklik değerleri belirtilmiştir.

Eklenen çekme levhaları, basınç donatıları ve levhaları düşünülmediğinde kirişleri yaklaşık dengeli donatı durumuna getirmektedir. Yani elde edilen bu süneklik değerleri aşırı donatılı kirişlerden elde edilmiştir.

S12 ve S9 elemanlarında ise delikli levhanın deformasyon yeteneği o kadar belli olmuştur ki önce kirişin kendi çekme donatıları kopmuştur. Üstelik paspayı da düşünüldüğünde eğilme etkisinde çekme levhaları donatılardan daha fazla birim deformasyona zorlanmaktadır. Deneyler çekme donatılarının kopmasıyla sonuçlandığından süneklik değerlendirilirken bu farkın göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmüştür.

Çizelge 5.3'de bazı elemanların sünekliği büyüktür işareti (>) ile gösterilmiştir. Bu elemanların deneyleri yükleme çerçeve kapasitesi dolduğundan sonlandırılmıştır.

Çizelge 5.3. Elemanların süneklik ve göreceli süneklik oranları

Eleman	Eksik Dayanım Türü	Saç Levha Türü	Saç Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme	Süneklik Oranı ($\delta u/\delta y$)	Göreceli Süneklik
RB	Eğilme	---	---	---	>16	1
RS	Eğilme+Kesme	---	---	---	10,5	1
S1	Eğilme	Düz	Alt yüz, Epoksili	---	10,2	0,63
S2	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	>13,3	0,83
S3	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	>15	0,93
S4	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Var	11	1,04
S5	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Yok	5,6	0,53
S6	Eğilme+Kesme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	>14	>1,33
S7	Eğilme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	---	8,7	0,54
S8	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	>9,16	0,57
S9	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	9,5	0,59
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Var	2,6	0,24
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Yok	1,8	0,17
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	7,1	0,67

Çizelge 5.3 ve deneylerin gelişimi ışığında elemanlar, süneklik açısından beraber değerlendirildiğinde;

İster delikli, ister düz olsun basınç levhasının sünekliğe faydası hemen göze çarpmıştır. Birçok elemanın süneklik düzeyleri çerçeve kapasitesini dahi aşmıştır.

Kesmeye karşı güçlendirilmemiş eksik etriyeli elemanlardan S11 beklendiği gibi kesme kırılmasından, S5 ise kesmeden çok ağır hasar almasına rağmen eğilmeden gitmiş. Ancak basınç bölgesi sargılama yetersizliğinden süneklik düzeyi yine olması beklendiği gibi düşük kalmıştır.

Yalnız S10 elemanında saplamalardaki ard germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında yoğunlaşmış ve levha kopmuştur. Aynı teknikle sadece düz levha ile yapılan elemanda da böyle belirtiler olmuş ancak düz levha bu gerilme yığılmasını tolere etmeyi başarmıştır. Bu eleman dışındaki bütün elemanlar amaçlanan süneklik seviyesine fazlasıyla ulaşmıştır.

Çizelge 5.4. Deney sonunda 450 cm'lik levhalardaki uzama miktarı

Düz levhalar	Uzama (mm)	Delikli levhalar	Uzama (mm)
S1	80	S7	65
S2	120	S8	130
S3	125	S9	130
S4	55	S10	-----
S5	40	S11	10
S6	127	S12	135

Çizelge 5.4'de ileri deformasyon seviyelerine ulaşmış elemanlardaki levha uzamalarına bakacak olursak, delikli levhaların kesit yapısından kaynaklanan sebeplerinden dolayı deformasyona daha müsait olduğu gözükmemektedir.

5.5. Eğilme Rijitliği

Eğilme rijitliği, moment eğrilik ilişkisinin eğimine eşittir. Değeri moment-eğrilik ilişkisi grafiğinin çıkış kolunun eğiminden hesaplanmalıdır. Ancak deneysel olarak moment-eğrilik ilişkisinin doğru olarak belirlenmesi pek mümkün değildir. Bilindiği gibi deneysel olarak k (eğrilik) belirlenirken belirli bir bölgeden ölçüm alınır. Bu bölgenin uzunluğuna doğru olarak karar vermek neredeyse olanaksızdır. Çünkü o bölgedeki eğrilik, o bölgede oluşan çatlak sayısı ile ilişkilidir. Bu nedenle rijitlik hesaplarında moment eğrilik ilişkileri kullanılmamıştır. Bunun yerine eğilme rijitliğinin bir ölçüsü olarak hesaplarda daha gerçekçi olan yük-deplasman grafiklerinin eğimleri kullanılmıştır. Eğrilik ile momentin, yük ve deplasmanın birer fonksiyonu olduğu ve elemanlar arası bir karşılaştırma yapılacağı düşünüldüğünde yapılan kabul bir sakınca yaratmayacaktır.

Rijitlik değerleri elemanların yük-deplasman grafiklerinde belirlenen akma anındaki yük değerinin deplasman değerine oranıdır (yük deplasman grafiğinin lineer kısmının eğimi). Grafiklerden belirlenen rijitlik değerleri, yalın kiriş rijitliği 1 alınarak, diğer elemanlar için oransal olarak Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5 ve deneylerin gelişimi ışığında elemanlar, rijitlik açısından beraber değerlendirildiğinde;

Yalın elemanla kıyaslandığında düz levha kullanılan elemanların rijitliği yaklaşık 2 kat artmış, delikli levha kullanılanları ise yaklaşık 1,4 kat artmıştır.

Düz levha kullanılan elemanlar delikli levha kullanılan elemanlardan; yapıştırıcıda epoksi kullanılmış elemanlar, epoksi kullanılmayan emsallerinden daha rijittir.

Çizelge 5.5. Eğilme rijitliği oranları

Eleman	Eksik Dayanım Türü	Saç Levha Türü	Saç Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme	Rijitlik Ölçüsü (P/δy)	Göreceli Rijitlik
RB	Eğilme	---	---	---	7,30	117
RS	Eğilme+Kesme	---	---	---	7,30	117
S1	Eğilme	Düz	Alt yüz, Epoksili	---	15,4	293
S2	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	15,1	272
S3	Eğilme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	17,2	309
S4	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Var	15,50	280
S5	Eğilme+Kesme	Düz	Alt yüz, Epoksili	Yok	14,50	290
S6	Eğilme+Kesme	Düz	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	13,04	300
S7	Eğilme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	---	10,52	221
S8	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksisiz	---	10,00	230
S9	Eğilme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	---	10,80	270
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Var	10,00	200
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt yüz, Epoksili	Yok	9,39	216
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	Alt ve Üst Yüz, Epoksili	Var	11,36	250

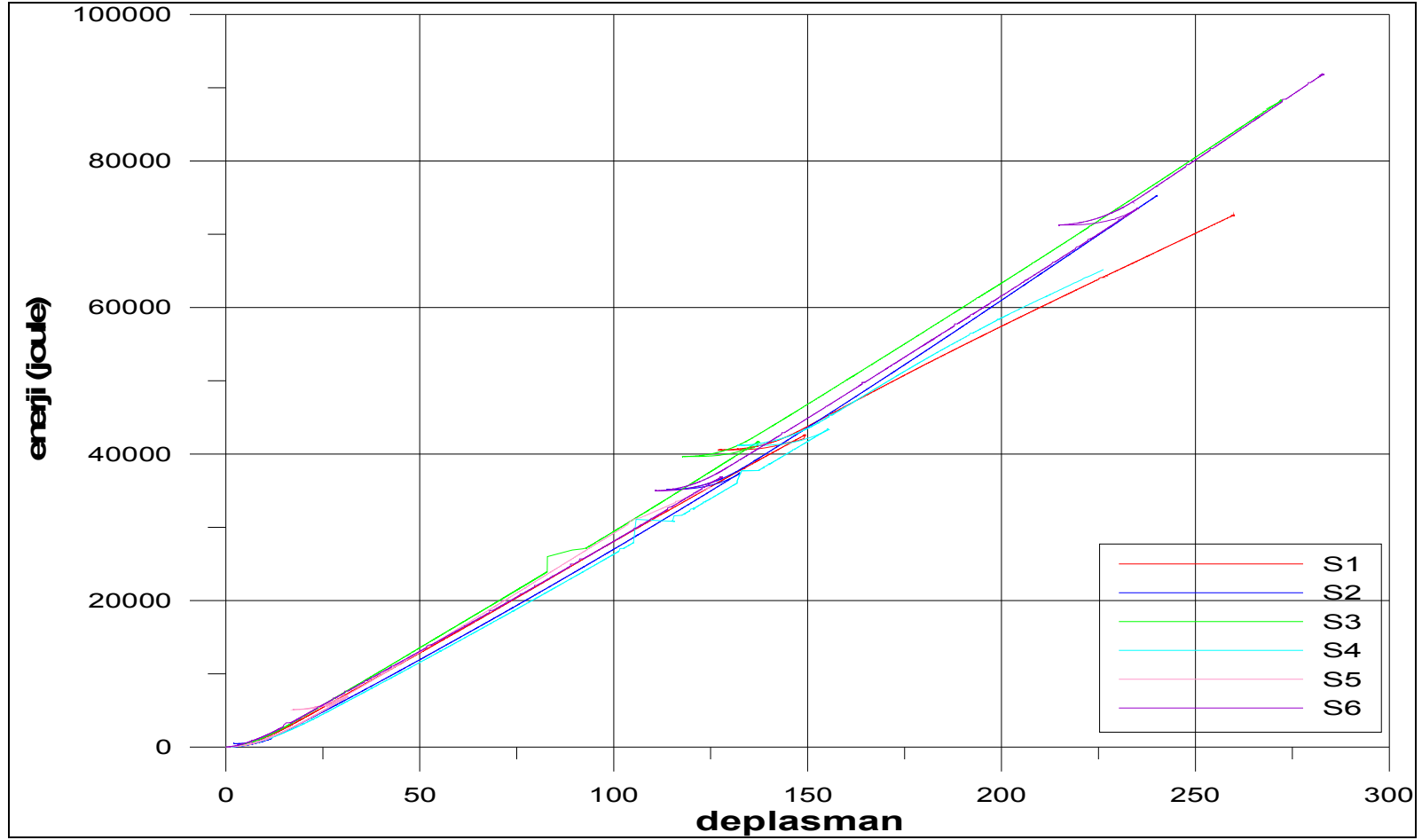
5.6. Enerji Tüketimi

Dış yükler altında betonarme taşıyıcı bir sistem elastik bölgede kalıyorsa bu sistem dış yükler tarafından kendine verilen enerjiyi geri iletebilmektedir. Böyle bir durum, ancak deprem etkisinin küçük olduğu zamanlarda veya yapının özellikle elastik bölgede kalacak şekilde tasarlanması genellikle ekonomik olmaz. Bu nedenle ekonomik bir tasarım için büyük yükler altında taşıyıcı sistemin üzerindeki enerjinin bir kısmını başka enerjilere dönüştürebilmesi istenir. Enerjinin dönüştürülebilen kısmına tüketilen enerji denir. Betonarme taşıyıcılar bazı kurallara uyularak yapıldığında elasto-plastik bir davranış gösterirler. Böyle bir sistem üzerine gelen enerjinin bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürerek tüketir. Dönüşebilen enerji plastik bölgenin uzunluğu ile genellikle doğru orantılıdır. Bu nedenle taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketebilme kapasiteleri oldukça önemlidir. Elastik bölge geçildikten sonra herhangi bir andaki sistemin toplam enerjisi, tüketilen enerji ile geri iletebilen enerjinin toplamına eşittir. Ancak elemanların çoğunda geri verilen enerjinin doğru bir şekilde hesaplanamayacağı anlaşıldığından kıyaslamalar tüketilen enerji yerine toplam enerji üzerinden yapılmıştır. Bilindiği gibi enerji yapılan işe, iş ise kuvvet ile ilk konuma göre kat edilen yolun çarpımına eşittir. Bu tanımdan yola çıkarak deney elemanlarının toplam enerji kapasiteleri elemanlara ait yük deplasman eğrisinin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır. Çizelge 5.6'da tüketilen toplam enerjiler belirtilmiş ve sadece eğilmeye karşı güçlendirilen elemanların RB ye göre, eğilme+kesmeye karşı güçlendirilen elemanların ise RS e göre toplam enerji oranları joule cinsinde hesaplanmıştır. Düz levha kullanılan elemanlar ve delikli levha kullanılan elemanların toplu enerji-deplasman grafikleri çizilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2).

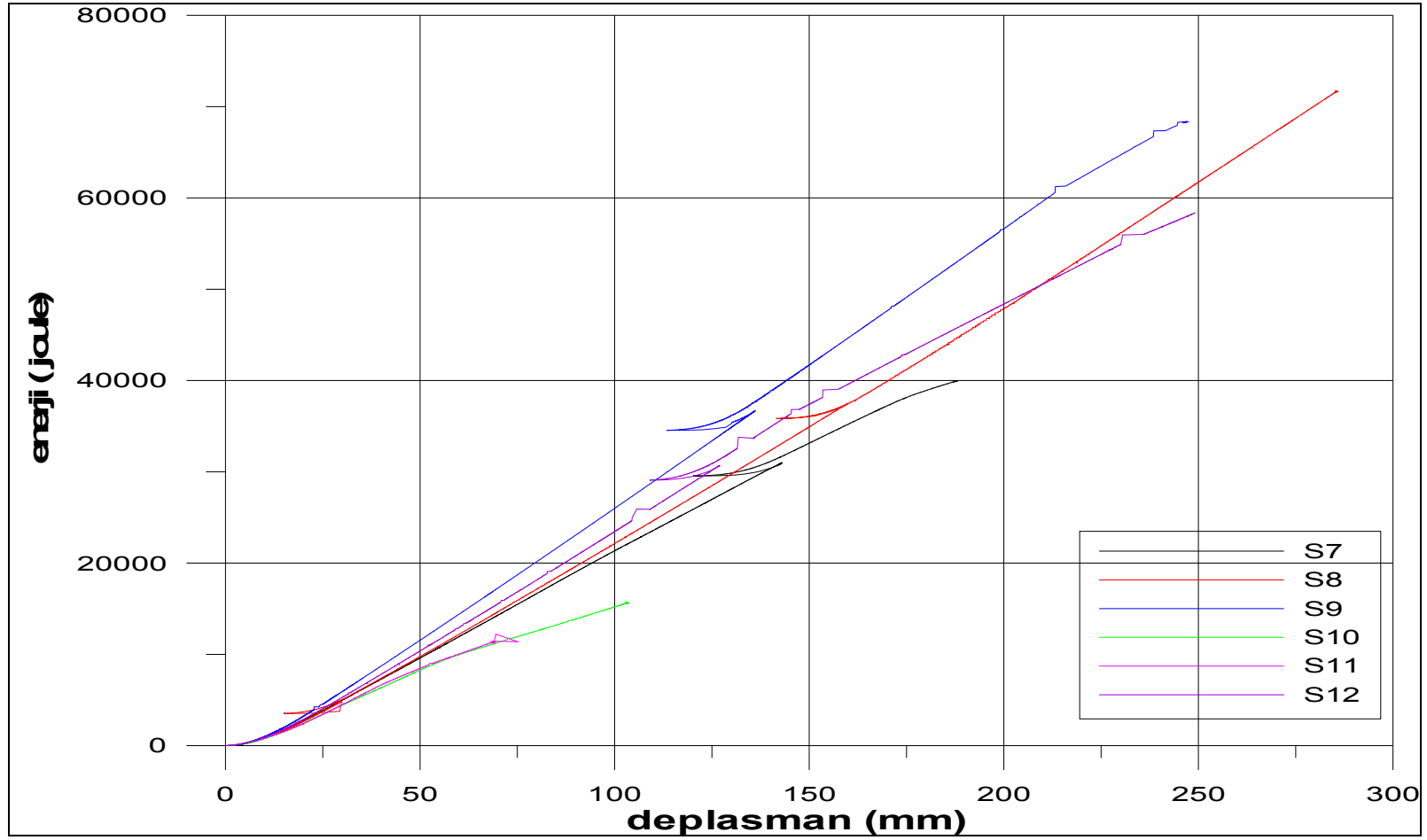
Çizelge 5.6. Toplam enerji oranları

	Toplam Enerji (Joule)	Toplam Enerji Oranı
RB	35603	1
RS	30158	1
S1	72601	2,04
S2	>75298	2,11
S3	>87135	2,45
S4	65176	2,16
S5	35524	1,18
S6	>91843	3,05
S7	39922	1,12
S8	>71667	2,01
S9	68211	1,92
S10	15637	0,52
S11	11439	0,38
S12	58345	1,93

Veriler incelendiğinde düz levhalı elemanlarda, sadece çekme levhası kullanıldığında enerji tüketim kapasitesi 2-2,5 kat, çekme ve basınç levhası kullanıldığında ise 2,5-3 kat arttığı gözlemlenmiştir. Delikli levhalı elemanlarda ise, deney esnasında kesme gijonlarının yarattığı fazla baskı yüzünden levhası kopan S10 elemanı dışında sadece çekme levhası kullanıldığında enerji tüketim kapasitesi 1-1,5 kat, çekme ve basınç levhası kullanıldığında ise yaklaşık 2 kat arttığı gözlemlenmiştir.



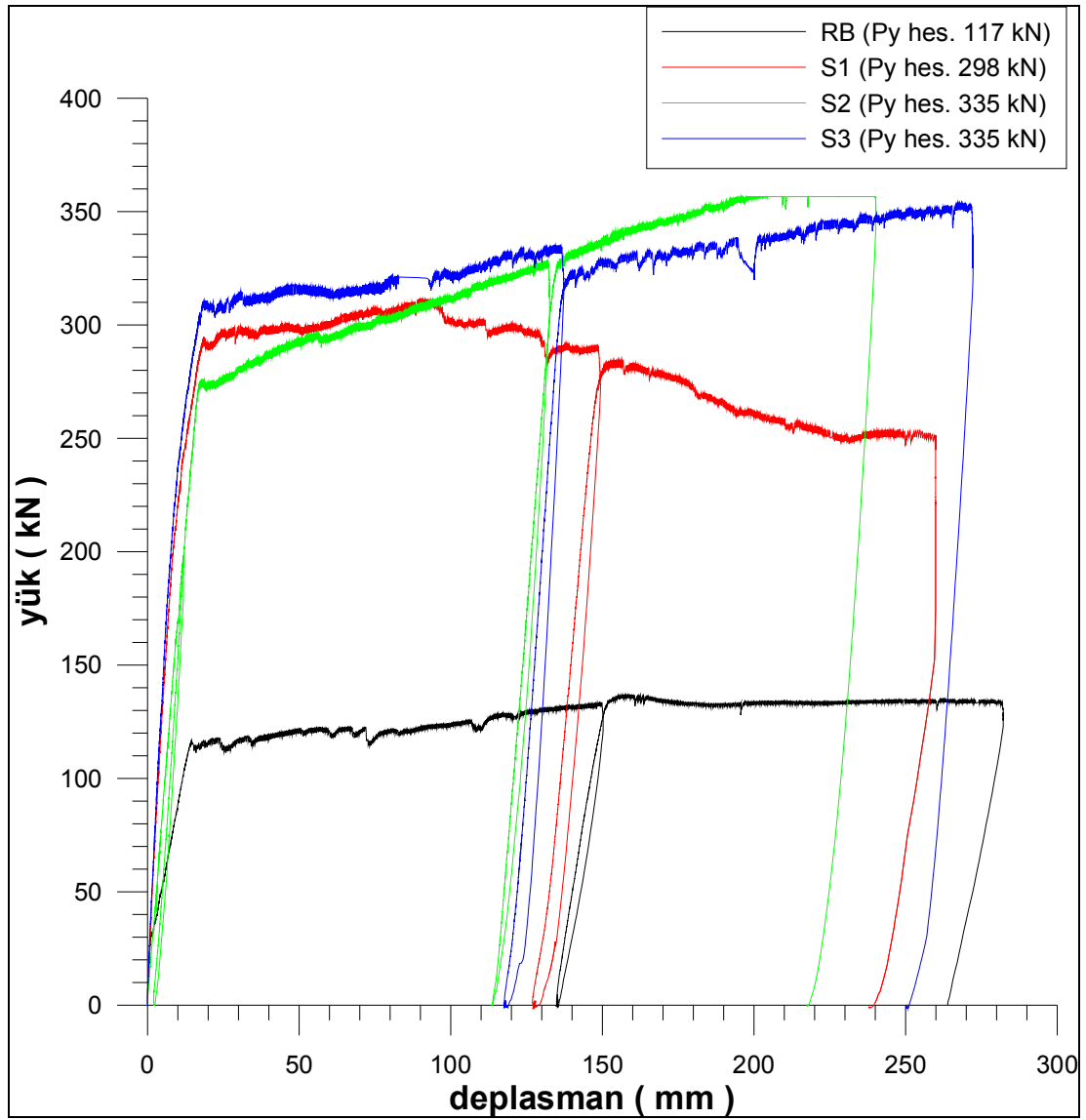
Şekil 5.1 . Düz levha kullanılan elemanların enerji-deplasman ilişkileri



Şekil 5.2. Delikli levha kullanılan elemanların enerji-deplasman ilişkileri

5.7 Deney Elemanları Arasında Karşılaştırma

5.7.1 Tam etriyeli, düz levhalı S1, S2, S3 ve referans RB elemanları arasında karşılaştırma



Şekil 5.3. RB, S1, S2, S3 elemanları yük-deplasman ilişkileri

Bu elemanların özelliklerine Çizelge 5.7'dan bakabiliriz.

Çizelge 5.7. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü
RB	Eğilme	-----	-----	-----
S1	Eğilme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili
S2	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz
S3	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili

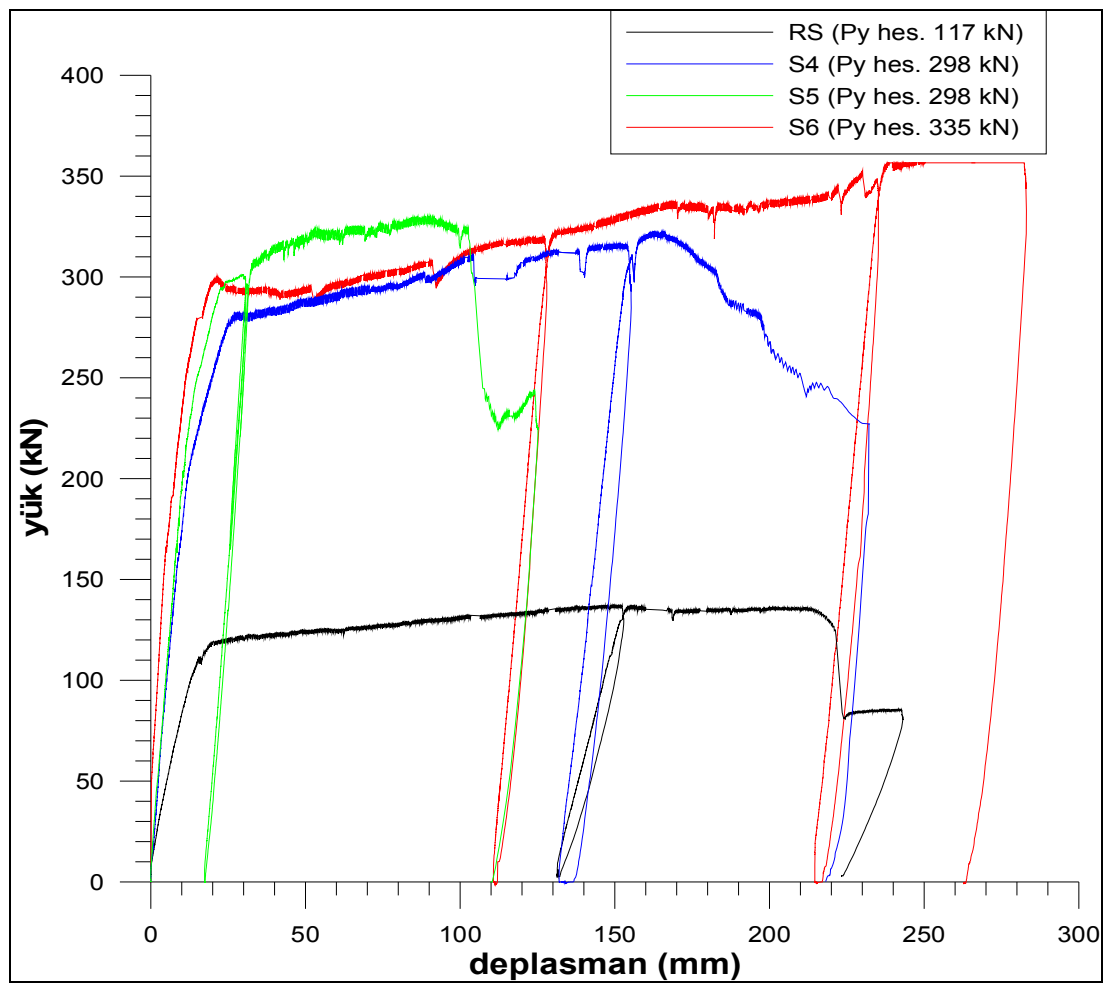
Şekil 5.3'e bakacak olursak, yalın elemanla kıyaslandığında bütün güçlendirilen elemanların taşıma güçleri yaklaşık 2,5 kat artmış, bununla beraber süneklik konusunda da oldukça başarılı olmuşlardır. Ayrıca eğilme rijitlikleri 2 kat artmıştır (Çizelge 5.5).

S2 ve S3; S1 ile kıyaslandığında kullanılan basınç levhasının etkinliği daha net gözükmemektedir. Basınç levhası kullanılan elemanların sünekliğini o kadar çok artmıştır ki yükleme çerçevesinin kapasitesi dolduğu için belli bir noktadan sonra deneye devam edilememiştir. Akmadan sonra bu elemanların dayanımında sürekli artış gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji tüketimleri çok daha fazla olmuştur. Basınç levhasının taşıma gücünde etkisi küçümsenmemesi gereken boyutta çıkmıştır.

S2 ve S3 kıyaslandığında levhanın yapıştırılmadığı S2 elemanında levhadaki akma tüm liflerde aynı anda başlayamadığından akma levha kesitine ortadan kenara doğru ve yavaş yavaş yayılmaya başlıyor. Bundan dolayı bu elemanda akma, epoksi ile yapıştırılana oranla ortalama %15 daha erken bir yük değerinde başlamıştır. Ancak S2 elemanı olması gereken nihai dayanımına bir süre deformasyondan sonra ulaşmıştır. Levhaları epoksi ile yapıştırılan ve yapıştırılmayan S2 ve S3 elemanlarının nihai dayanımları

yaklaşık eşit olmuştur. Bundan dolayı levha yapıştırılmadığında teorik akma hesap dayanımı bulunurken hesap değeri yaklaşık %20 düşürülmelidir. S1 ve S3 ün teorik hesap dayanımları deneysel dayanımına çok yakın çıkmıştır (Çizelge 5.2).

5.7.2 Eksik etriyeli, düz levhalı S4, S5, S6 ve referans RS elemanları arasında karşılaştırma



Şekil 5.4. RS, S4, S5, S6 elemanları yük-deplasman ilişkileri

Bu elemanların özelliklerine Çizelge 5.8'dan bakabiliriz

Çizelge 5.8. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
RS	Eğilme+Kesme	-----	-----	-----	-----
S4	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	var
S5	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	yok
S6	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var

Şekil 5.4.'e bakacak olursak, yalın elemanla kıyaslandığında bütün güçlendirilen elemanların taşıma güçleri yaklaşık 2,5 kat artmış, ayrıca eğilme rijitlikleri 2 kat artmıştır (Çizelge 5.5).

S5 deney elemanı kesmeden çok ağır hasarlar alsa da sınır durumunda beklenilenin aksine eğilmeden gitmiştir. Bu duruma sebep olarak uç yan levha ve bulonlarının kesmeye karşı etkisi, düz çelik levhanın kaldıraç etkisi düşünülebilir. Ancak etriyeler eksik ($\varnothing 8/500$) olduğu için beton basınç bölgesinde sargılama yetersizliğinden dolayı beton ezilmiş, basınç donatıları burkularak nispeten az sünek davranış sergilemiştir.

Süneklik açısından değerlendirecek olursak, etriyesi eksik olan elemanı sadece eğilmeye karşı güçlendirmenin sakıncası ortaya çıkmıştır. Görüldüğü gibi etriyesi eksik olmasına rağmen çekme donatıları az olduğu için RS elemanı oldukça sünek bir davranış sergilemiştir. Ancak bu eleman sadece eğilmeye karşı güçlendirildiğinde (S5), eğilmeden gitmesine rağmen süneklik düzeyinin oldukça düştüğü görülmüştür. Burada sargılamanın da ne kadar önemli olduğu çarpıcı bir şekilde ortaya çıkmıştır.

S4 ve S6 ile kıyaslandığında kullanılan basınç levhasının etkinliği yine gözükmemektedir. Basınç levhası kullanılan elemanların sünekliği o kadar çok artmıştır ki yükleme çerçevesinin kapasitesi dolduğu için belli bir noktadan sonra deneye devam edilememiştir. Akmadan sonra yine basınç levhası kullanılan elemanın dayanımında sürekli artış gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji tüketimleri çok daha fazla olmuştur. Basınç levhasının taşıma gücünde etkisinin küçümsenmemesi gereken boyutta olduğu yine gözlemlenmiştir.

S4 ve S6 elemanları; S5 ile kıyaslandığında düz levhali elemanlarda uygulanan kesmeye karşı güçlendirme yöntemi sünekliği oldukça arttırmıştır.

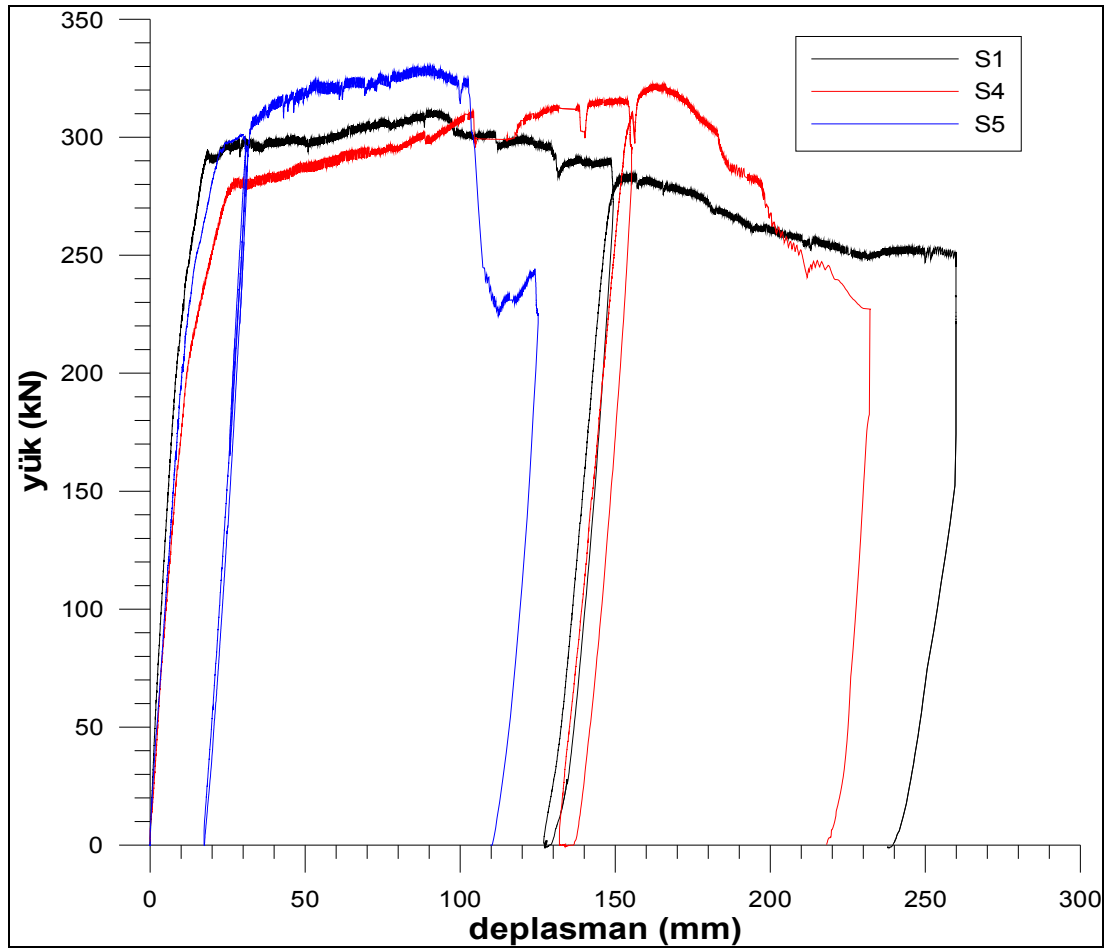
5.7.3 Düz levhali S1, S4, S5 elemanları arasında karşılaştırma

Çizelge 5.9. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S1	Eğilme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	-----
S4	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	var
S5	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	yok

Bu elemanların özelliklerine Çizelge 5.9'dan bakabiliriz.

Şekil 5.5 incelendiğinde düz levhali elemanlarda kesme gijonlarının etkisi gözükmemektedir. S4 elemanındaki kesme gijonları tam etriyeli emsali olan S1 kadar davranışını sünek hale getirmiştir. Yani eleman davranışı, sadece kesme gijonlarıyla S5 seviyesinden S1 seviyesine yakın şekle getirilmiştir. Elemanın enerji tüketim kapasitesi ve sünekliği oldukça artmıştır.

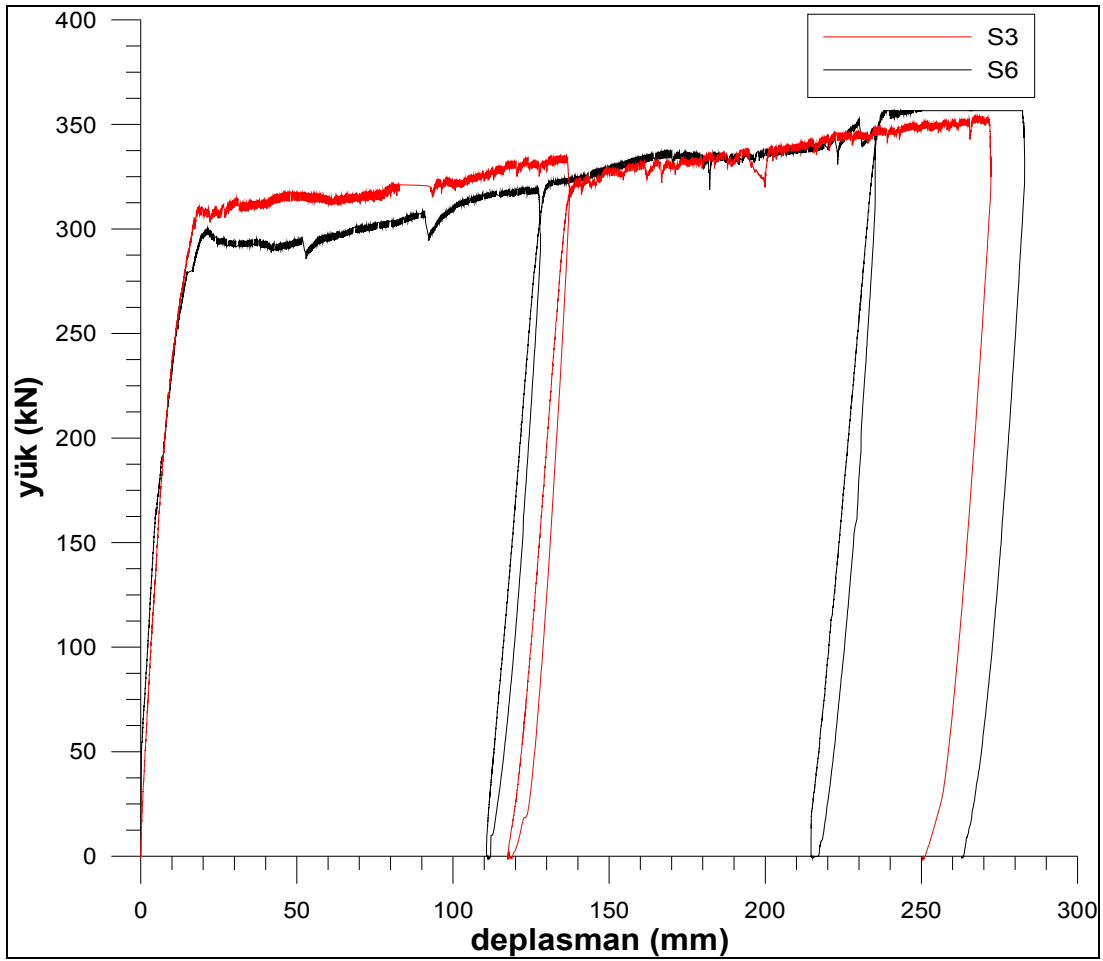


Şekil 5.5. S1, S4, S5 elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.4 Düz levhalı S3, S6 elemanları arasında karşılaştırma

Çizelge 5.10. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S3	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----
S6	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var



Şekil 5.6. S3, S6 elemanları yük-deplasman ilişkileri

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.10'dan bakabiliriz.

Şekil 5.6 incelendiğinde basınç levhasının da kullanıldığı, düz levhalı elemanlarda kesme gijonlarının etkisi gözükmemektedir. Kesme gijonlarının belirtilen teknikte uygulanmasıyla birlikte eksik etriyeli S6 elemanı, tam etriyeli S3 elemanın davranışına son derece yaklaşmıştır. Eğriler nerdeyse birbirleriyle örtüşmektedir.

5.7.5 Tam etriyeli, delikli levhalı S7, S8, S9 ve referans RB elemanları arasında karşılaştırma

Çizelge 5.11. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü
RB	Eğilme	-----	-----	-----
S7	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili
S8	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz
S9	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili

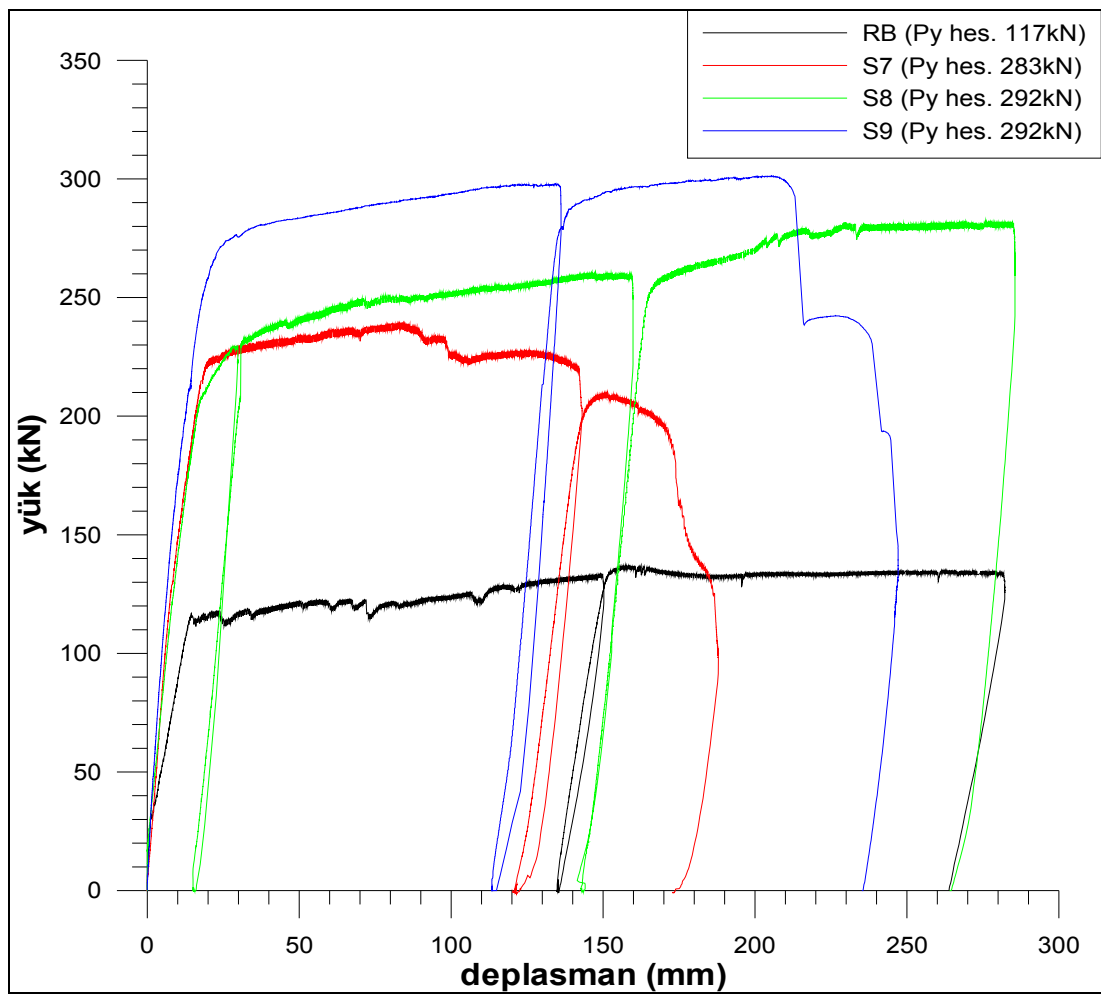
Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.11’den bakabiliriz.

Şekil 5.7 ye bakacak olursak, yalın elemanla kıyaslandığında bütün güçlendirilen elemanların taşıma güçleri yaklaşık 2,2 kat artmış, bununla beraber süneklik konusunda da oldukça başarılı olmuşlardır. Ayrıca eğilme rijitlikleri yaklaşık 1,4 kat artmıştır (Çizelge 5.5).

S8 ve S9; S7 ile kıyaslandığında kullanılan basınç levhasının etkinliği daha net gözükmemektedir. Basınç levhası kullanılan elemanların sünekliğini o kadar çok artmıştır ki S9 elemanında güçlendirme sistemi gayet stabil dururken çekme donatıları kopmuş, S8 elemanında ise yükleme çerçevesinin kapasitesi dolduğu için belli bir noktadan sonra deneye devam edilememiştir. Akmadan sonra bu elemanların dayanımında sürekli artış gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji tüketimleri çok daha fazla olmuştur. Basınç levhasının taşıma gücünde etkisi küçümsenmemesi gereken boyutta çıkmıştır.

S8 ve S9 kıyaslandığında levhanın yapıştırılmadığı S8 elemanında levhadaki akma tüm liflerde aynı anda başlayamadığından akma levha kesitine ortadan

kenara doğru ve yavaş yavaş yayılmaya başlıyor. Bundan dolayı bu elemanda akma, epoksi ile yapıştırılana oranla ortalama %15 daha erken bir yük değerinde başlamıştır. Ancak S8 elmanı olması gereken nihai dayanımına bir süre deformasyondan sonra ulaşmıştır. Bundan dolayı levha yapıştırılmadığında teorik akma hesap dayanımı bulunurken hesap değeri yaklaşık %20 düşürülmelidir. S7 ve S9 ün teorik hesap dayanımları deneysel dayanımına yakın çıkmıştır (Çizelge 5.2).



Şekil 5.7. RB, S7, S8, S9 elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.6 Eksik etriyeli, delikli levhalı S10, S11, S12 ve referans RS elemanları arasında karşılaştırma

Bu elemanların özelliklerine Çizelge 5.12'dan bakabiliriz

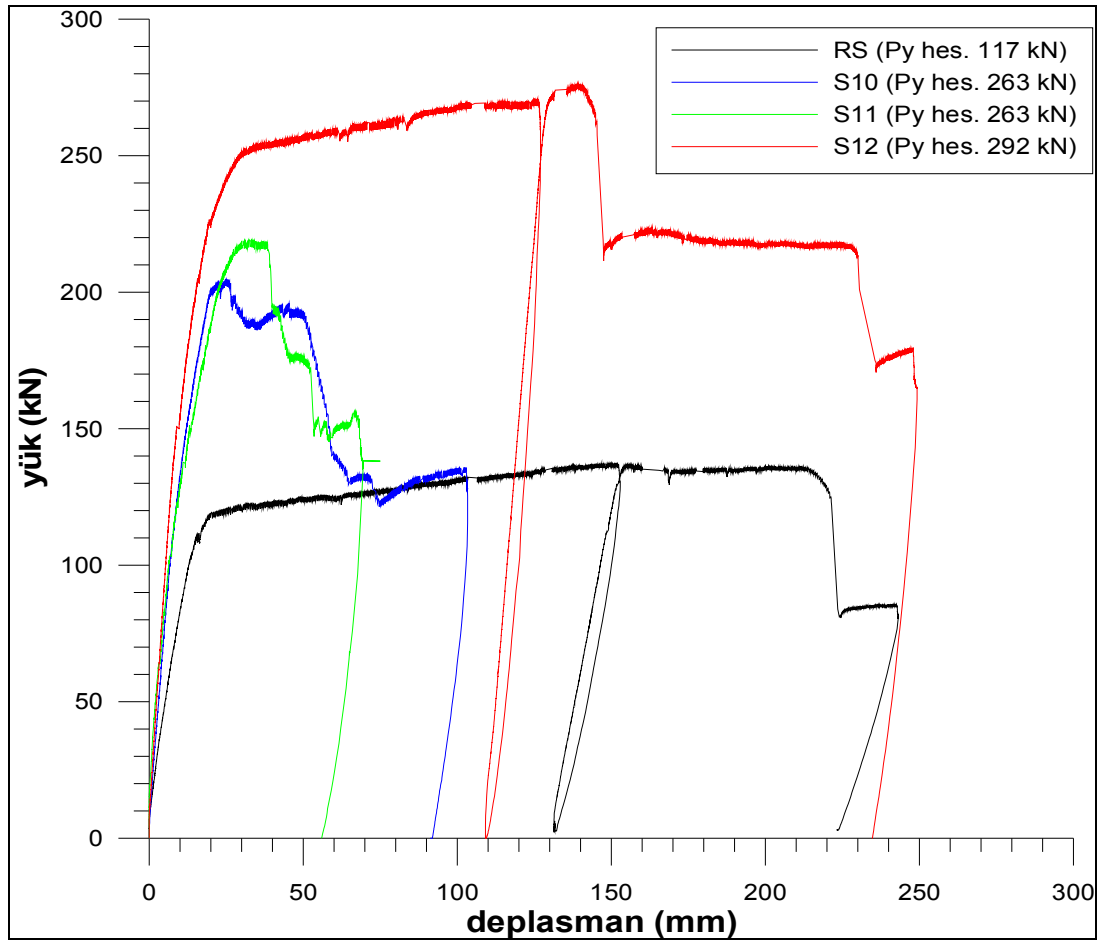
Çizelge 5.12. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
RS	Eğilme+Kesme	-----	-----	-----	-----
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	var
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	yok
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var

Şekil 5.8 ye bakacak olursak, yalın elemanla kıyaslandığında bütün güçlendirilen elemanların taşıma güçleri yaklaşık 2,2 kat artmış, ayrıca eğilme rijitlikleri 1,4 kat artmıştır (Çizelge 5.5).

S11 eleman beklendiği gibi kesmeden kırılmıştır. Delikli levha düz levhaya göre daha fazla deformasyona müsaade ettiği için kesme kuvvetine karşı kaldıraç etkisi de sınırlı kalmıştır.

Etriyesi eksik olan elemanı sadece eğilmeye karşı güçlendirmenin sakıncası ortaya çıkmıştır. Görüldüğü gibi etriyesi eksik olmasına rağmen çekme donatıları az olduğu için RS elemanı oldukça sünek bir davranış sergilemiştir. Ancak bu eleman sadece eğilmeye karşı güçlendirildiğinde (S11), kesmeden kırıldığı görülmüştür. Kesme ve eğilmeye karşı güçlendirmenin birlikte düşünülmesi gereken bir konu olduğunu S11 elemanı açıkça göstermiştir.



Şekil 5.8. RB, S10, S11, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri

Yalnız S10 elemanında saplamalardaki ard germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında yoğunlaşmış ve delikli levha kopmuştur. Eleman gevrek sayılabilecek bir kırılma gerçekleştirmiştir. Sadece alttan delikli levha ile güçlendirme söz konusu olduğunda saplamalardaki art germe kuvveti aynı zamanda tüm levhaya deformasyonları yayacak miktarda azaltılması gerektiği düşünülmüştür.

Yine basınç levhası kullanılan elemanların sünekliğini o kadar çok artırmıştır ki S12 elemanında güçlendirme sistemi gayet stabil dururken çekme donatıları kopmuştur. Akmadan sonra yine basınç levhası kullanılan elemanın dayanımında sürekli artış gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji tüketimleri çok daha

fazla olmuştur. Basınç levhasının taşıma gücünde etkisinin küçümsenmemesi gereken boyutta olduğu yine gözlemlenmiştir.

S12 elemanı; S10 ile kıyaslandığında kesme gijonları elemanın sünekliğini arttırmıştır.

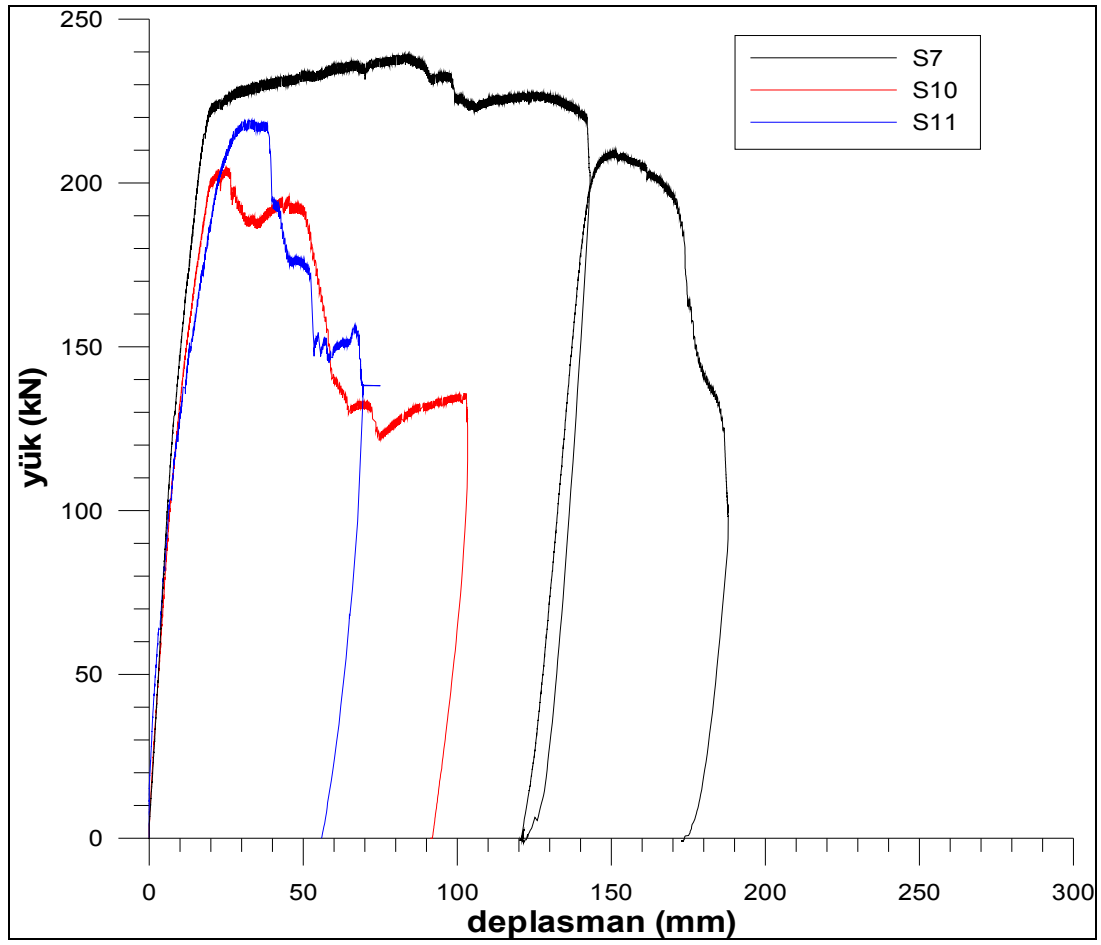
5.7.7 Delikli levhalı S7, S10, S11 elemanları arasında karşılaştırma

Çizelge 5.13.Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S7	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	-----
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	var
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	yok

Bu elemanların özelliklerine Çizelge 5.13'dan bakabiliriz.

Şekil 5.9 incelendiğinde S10 elemanındaki kesme gijonları tam etriyeli emsali olan S7 kadar davranışını sünek hale getirememiştir. Daha önce belirtildiği gibi bunun sebebi saplamalardaki ard germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında yoğunlaştığı ve delikli levhanın koptuğudur. Sadece alttan delikli levha ile güçlendirme söz konusu olduğunda saplamalardaki art germe kuvveti aynı zamanda tüm levhaya deformasyonları yayacak miktarda azaltılması gerektiği düşünülmüştür.



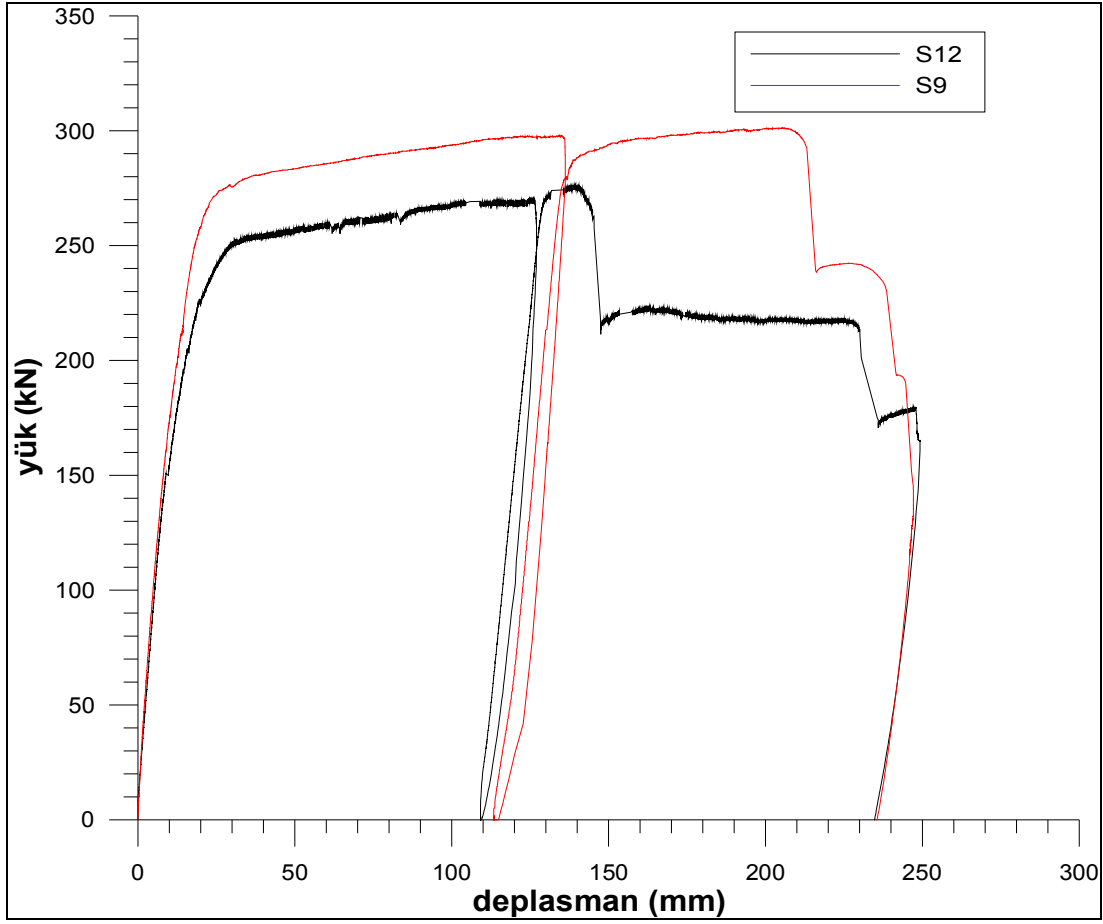
Şekil 5.9. S7, S10, S11, elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.8 Delikli levhalı S9, S12 elemanları arasında karşılaştırma

Çizelge 5.14. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S9	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.14'dan bakabiliriz.



Şekil 5.10. S9, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri

Şekil 4.10 incelendiğinde basınç levhasının da kullanıldığı, delikli levhalı elemanlarda kesme gijonlarının etkisi gözükmemektedir. Kesme gijonlarının belirtilen teknikte uygulanmasıyla birlikte eksik etriyeli S12 elemanı, tam etriyeli S9 elemanın davranışına yaklaşmıştır. Her iki elemanın deneyinde de güçlendirme sistemi gayet stabil dururken çekme donatıları kopmuştur. Üstelik paspayı da düşünüldüğünde eğilme etkisinde çekme levhaları donatılardan daha fazla birim deformasyona zorlanmaktadır. Deneyler çekme donatılarının kopmasıyla sonuçlandığından süneklik değerlendirilirken bu farkın göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmüştür.

5.7.9 Düz levhalı S1 ile normalize edilmiş delikli levhalı S7 elemanları arasında karşılaştırma;

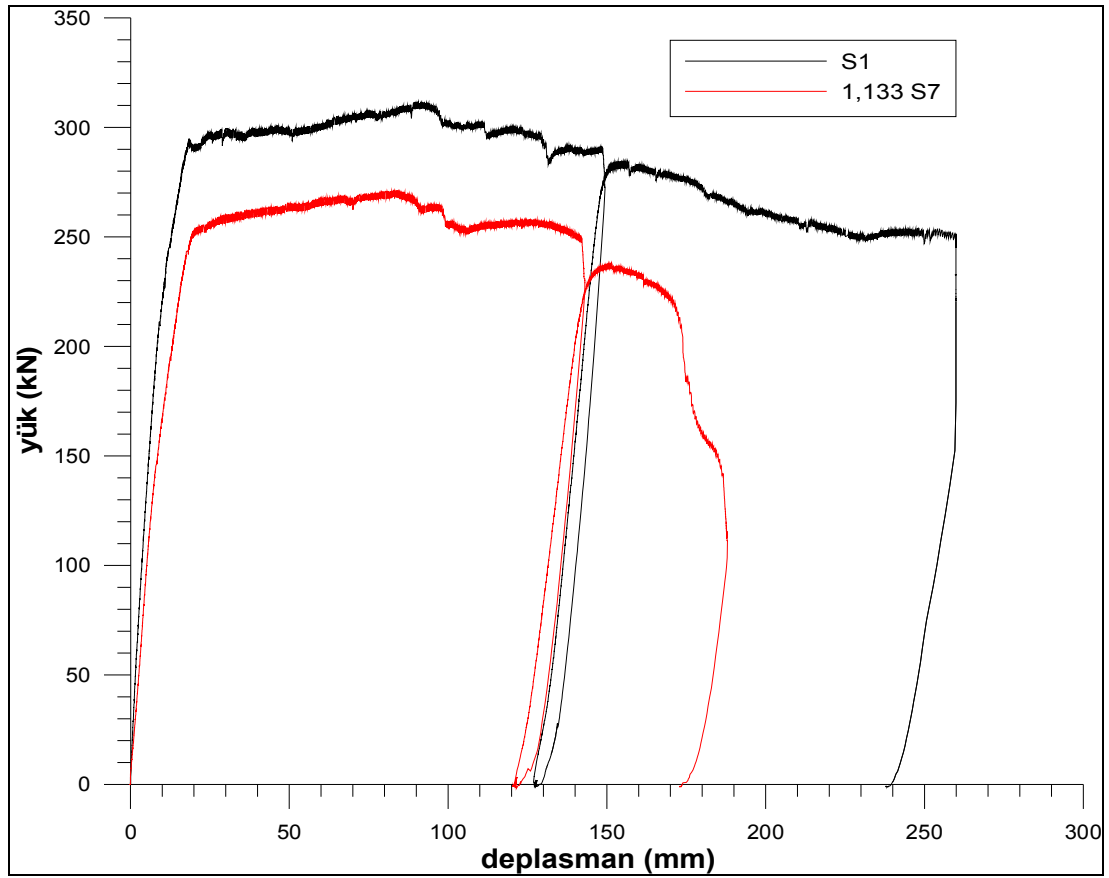
Çizelge 5.15. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S1	Eğilme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	-----
S7	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	-----

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.15’den bakabiliriz.

S1 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S7 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,133 katsayısı, S7 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.

Şekil 5.11 incelendiğinde S1 elemanın taşıma gücünün S7 elemanından %15 daha fazla olduğu görülmüştür. S1 elemanı yine S7 elemanından daha rijittir. Davranış şekilleri birbirine çok benzese de S1 elemanı daha sünek çıkmıştır. Yine S1 elemanının enerji tüketimi S7 elemanına göre daha fazla olmuştur.



Şekil 5.11. S1, S7 elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.10 Düz levhalı S2 ile normalize edilmiş delikli levhalı S8 elemanları arasında karşılaştırma;

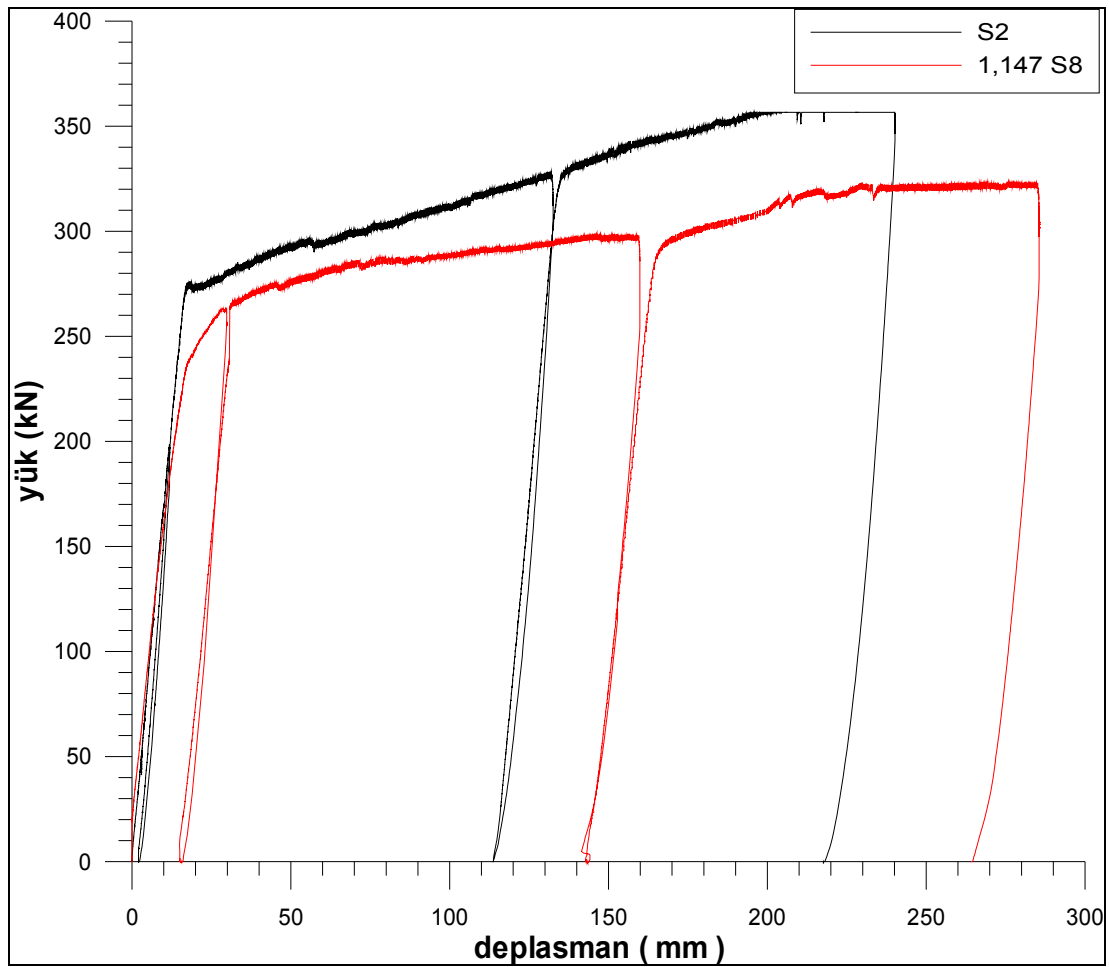
Çizelge 5.16. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S2	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz	-----
S8	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksisiz	-----

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.16'dan bakabiliriz.

S2 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S8 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,147 katsayısı, S8 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.

Şekil 5.12 incelendiğinde S2 ile S8 elemanlarının taşıma güçleri birbirine oldukça yakın çıkmakla beraber S2 elemanının %3 daha fazla çıkmıştır. Rijitlikleri neredeyse eşittir. Davranış şekilleri birbirine çok benzemektedir. İki elemanında deneylerine yükleme çerçevesinin sınır kapasitesine yaklaşıldığı için son verilmiştir. Bu yüzden süneklik konusunda her iki deneyde çok başarılı olmuş ve aralarında bu konuda kıyaslama yapmanın anlamı olmadığı düşünülmüştür.



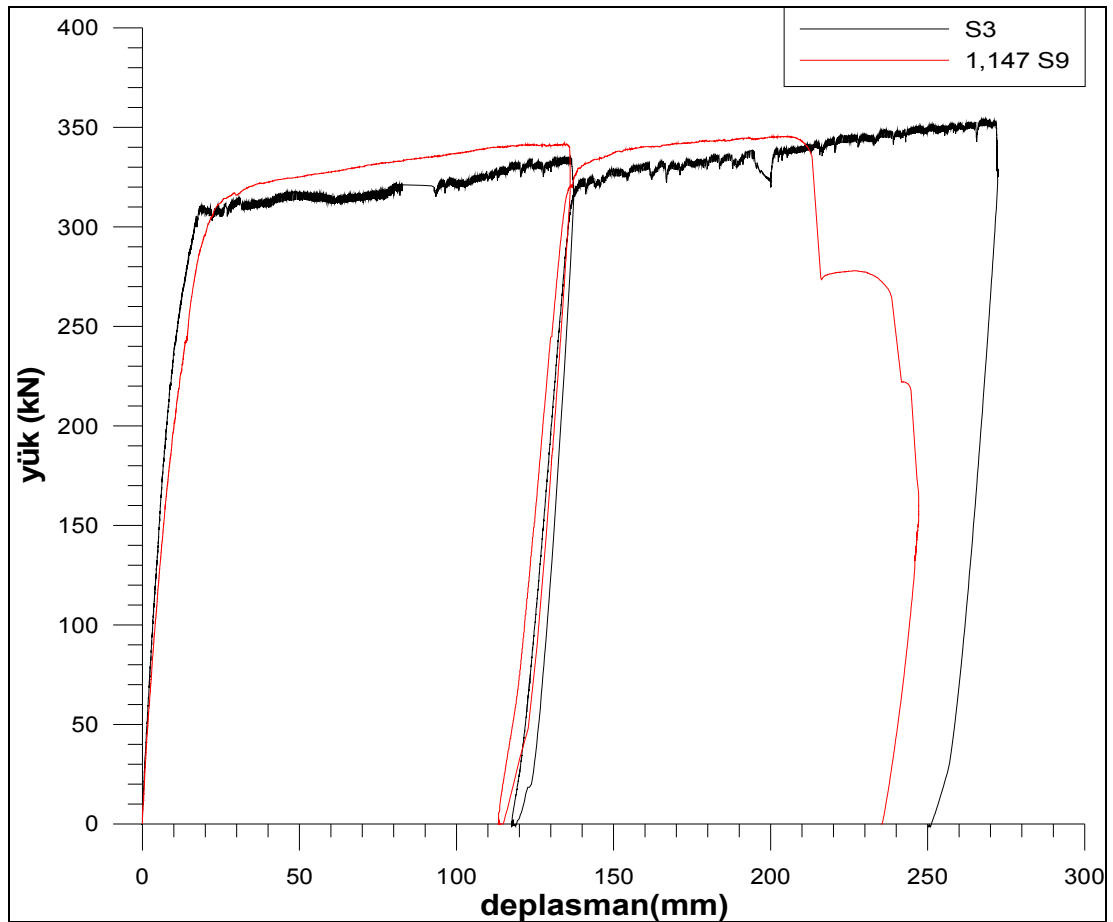
Şekil 5.12. S2, S8 elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.11 Düz levhalı S3 ile normalize edilmiş delikli levhalı S9 elemanları arasında karşılaştırma;

Çizelge 5.17. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S3	Eğilme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----
S9	Eğilme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	-----

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.17’den bakabiliriz.



Şekil 5.13. S3, S9 elemanları yük-deplasman ilişkileri

S3 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S9 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,147 katsayısı, S9 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.

Şekil 4.13. incelendiğinde S3 ile S9 elemanlarının taşıma güçleri birbirine eşit denilebilecek kadar yakın çıkmıştır. Aradaki küçük farkın paspaylarının milimetrik düzeyde kaymasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Düz levha kullanılan S3 elemanı biraz daha rijittir. Davranış şekilleri neredeyse grafikler birbiri ile örtüşecek kadar benzemiştir. S3 elemanında yükleme çerçevesinin sınır kapasitesine yaklaşıldığı, S9 elemanında ise çekme donatıları koptuğu için deneye son verilmiştir. Bu yüzden süneklik konusunda her iki deneyde çok başarılı olmuş ve aralarında bu konuda kıyaslama yapmanın anlamı olmadığı düşünülmüştür.

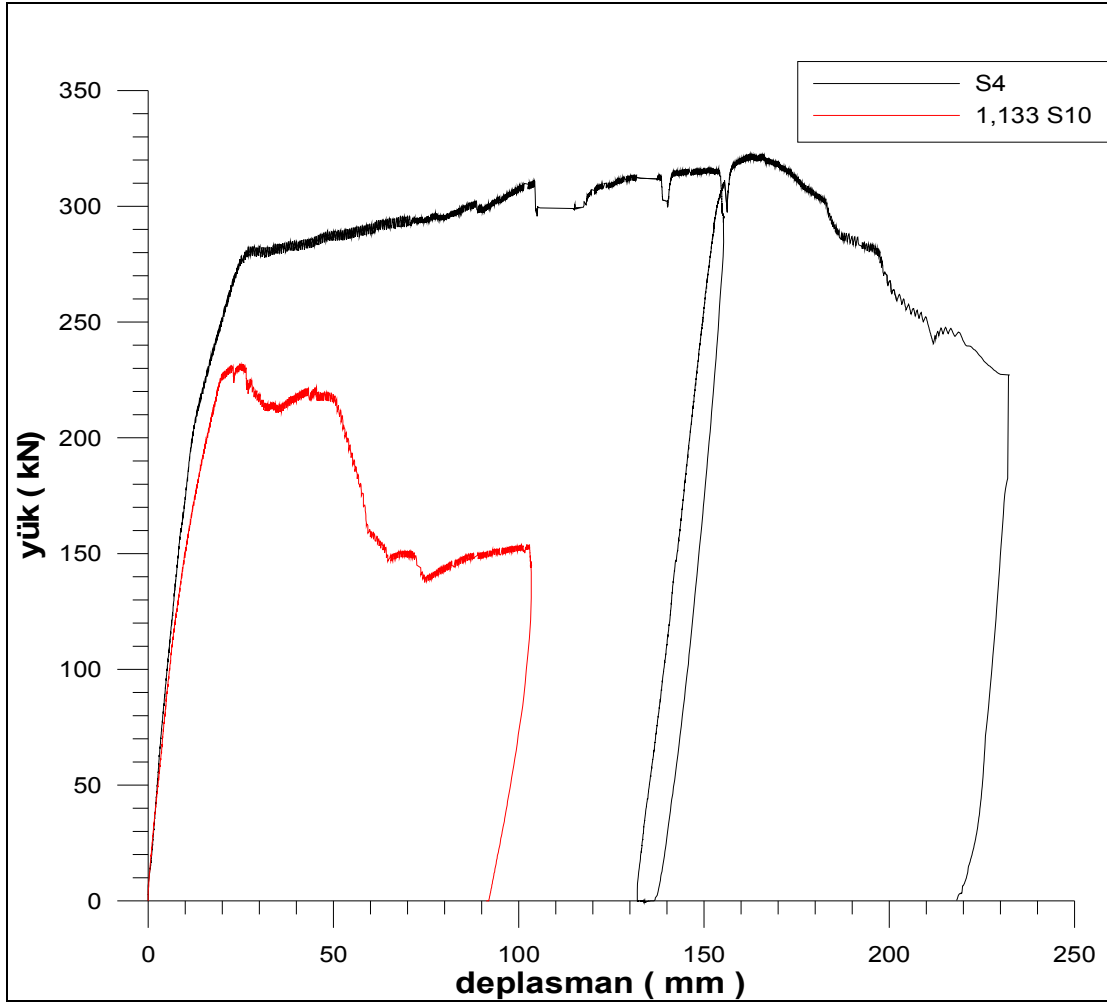
5.7.12 Düz levhalı S4 ile normalize edilmiş delikli levhalı S10 elemanları arasında karşılaştırma;

Çizelge 5.18. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S4	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	var
S10	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	var

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.18'dan bakabiliriz.

S4 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S10 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,133 katsayısı, S10 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.



Şekil 5.14. S4, S10 elemanları yük-deplasman ilişkileri

S10 elemanında saplamalardaki ard germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında yoğunlaşmış ve delikli levha kopmuştur. Eleman gevrek sayılabilecek bir kırılma gerçekleştirmiştir. S4 elemanında kullanılmış düz levhanın bu iki saplama arasında yoğunlaşan gerilmeleri tolere etmekte başarılı olmuş ve eleman oldukça sünek bir davranış sergilemiştir.

Elemanların rijitlikleri birbirine oldukça yakın, S4 elemanının taşıma gücü S10 elemanından %20 fazla çıkmıştır. S4 elemanının enerji tüketimi S10 elemanından oldukça üstündür.

5.7.13 Düz levhalı S5 ile normalize edilmiş delikli levhalı S11 elemanları arasında karşılaştırma;

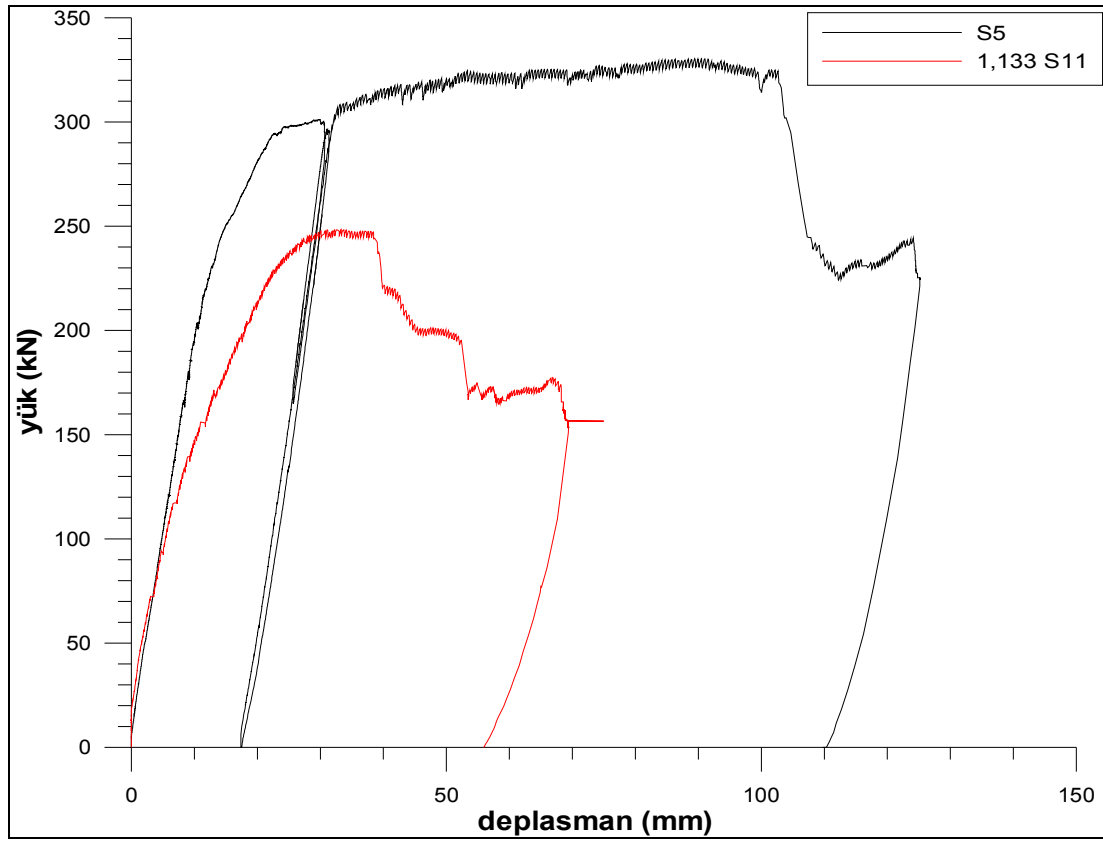
Çizelge 5.19. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S5	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt yüz, epoksili	yok
S11	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt yüz, epoksili	yok

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.19'dan bakabiliriz.

S5 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S11 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,133 katsayısı, S11 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.

Karşılaştırılan elemanlardan S11 aktıktan hemen sonra kesme kırılmasından, S5 ise sargılama yetersizliğinden basınç bölgesi betonunun kavlamasıyla taşıma kapasitelerine ulaşmıştır. Aradaki bu farktan dolayı S5 elemanı biraz daha sünek davranmış, ancak her iki elemenda beklendiği gibi gevrek sayılabilecek bir kırılma gerçekleştirmiştir. S5 elemanının taşıma gücünün %15 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



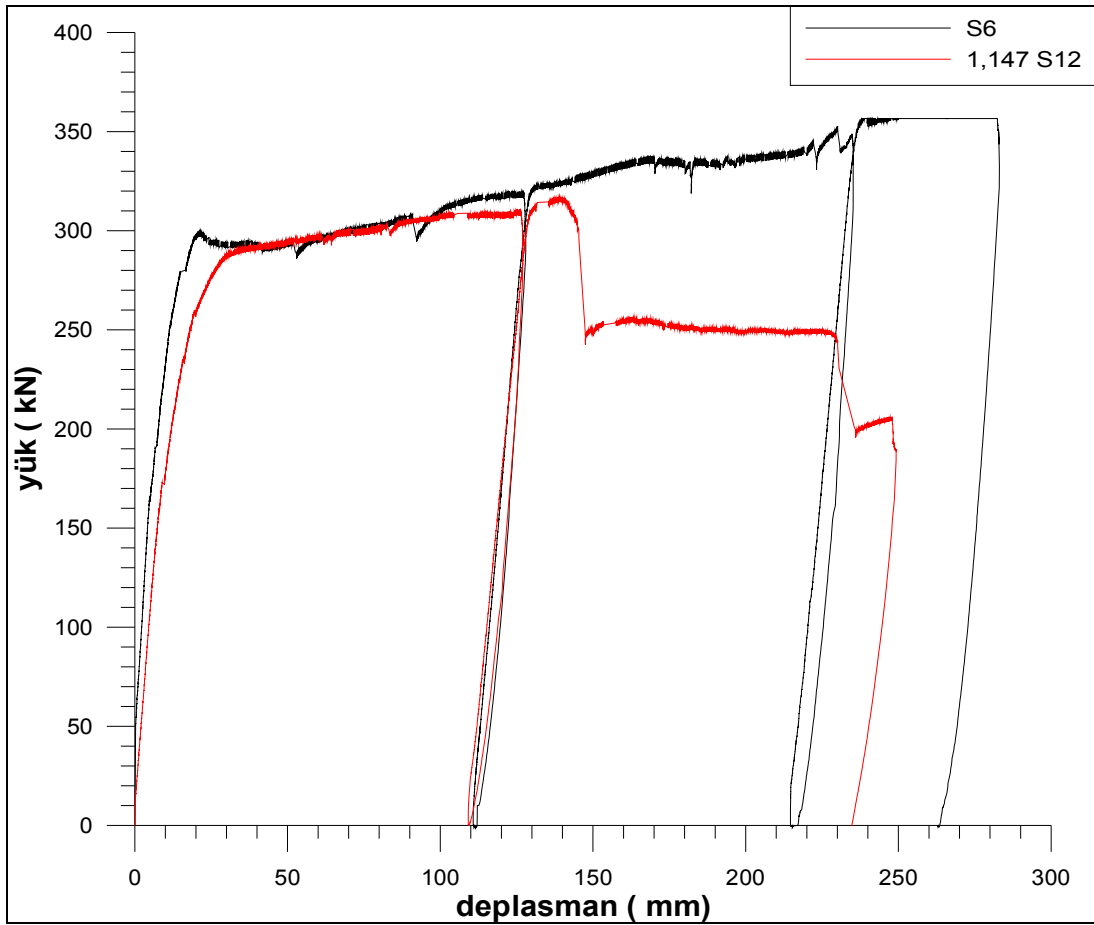
Şekil 5.15. S5, S11 elemanları yük-deplasman ilişkileri

5.7.14 Düz levhalı S6 ile normalize edilmiş delikli levhalı S12 elemanları arasında karşılaştırma;

Çizelge 5.20. Karşılaştırılan elemanların özellikleri

Eleman Adı	Eksik Dayanım Türü	Sac Levha Türü	Levha Kalınlığı	Sac Levha Uygulama Türü	Kesmeye Karşı Güçlendirme
S6	Eğilme+Kesme	Düz	6 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var
S12	Eğilme+Kesme	Delikli	8 mm	Alt ve üst yüz, epoksili	var

Karşılaştırılan elemanların özelliklerine Çizelge 5.20'dan bakabiliriz.



Şekil 5.16. S6, S12 elemanları yük-deplasman ilişkileri

S6 elemanının analitik akma hesap dayanımının, S12 elemanının analitik akma dayanımına oranı olan 1,147 katsayısı, S12 elemanı deney verilerinde yük değerleriyle çarpılarak normalize edilmiştir.

Şekil 5.16. incelendiğinde S6 ile S12 elemanlarının taşıma güçleri birbirine eşit denilebilecek kadar yakın çıkmıştır. Düz levha kullanılan S6 elemanı biraz daha rijittir. Davranış şekilleri neredeyse grafikler birbiri ile örtüşecek kadar benzemiştir. S6 elemanında yükleme çerçevesinin sınır kapasitesine yaklaşıldığı, S12 elemanında ise çekme donatıları koptuğu için deneye son verilmiştir. Bu yüzden süneklik konusunda her iki deneyde çok başarılı olmuş ve aralarında bu konuda kıyaslama yapmanın anlamı olmadığı düşünülmüştür.

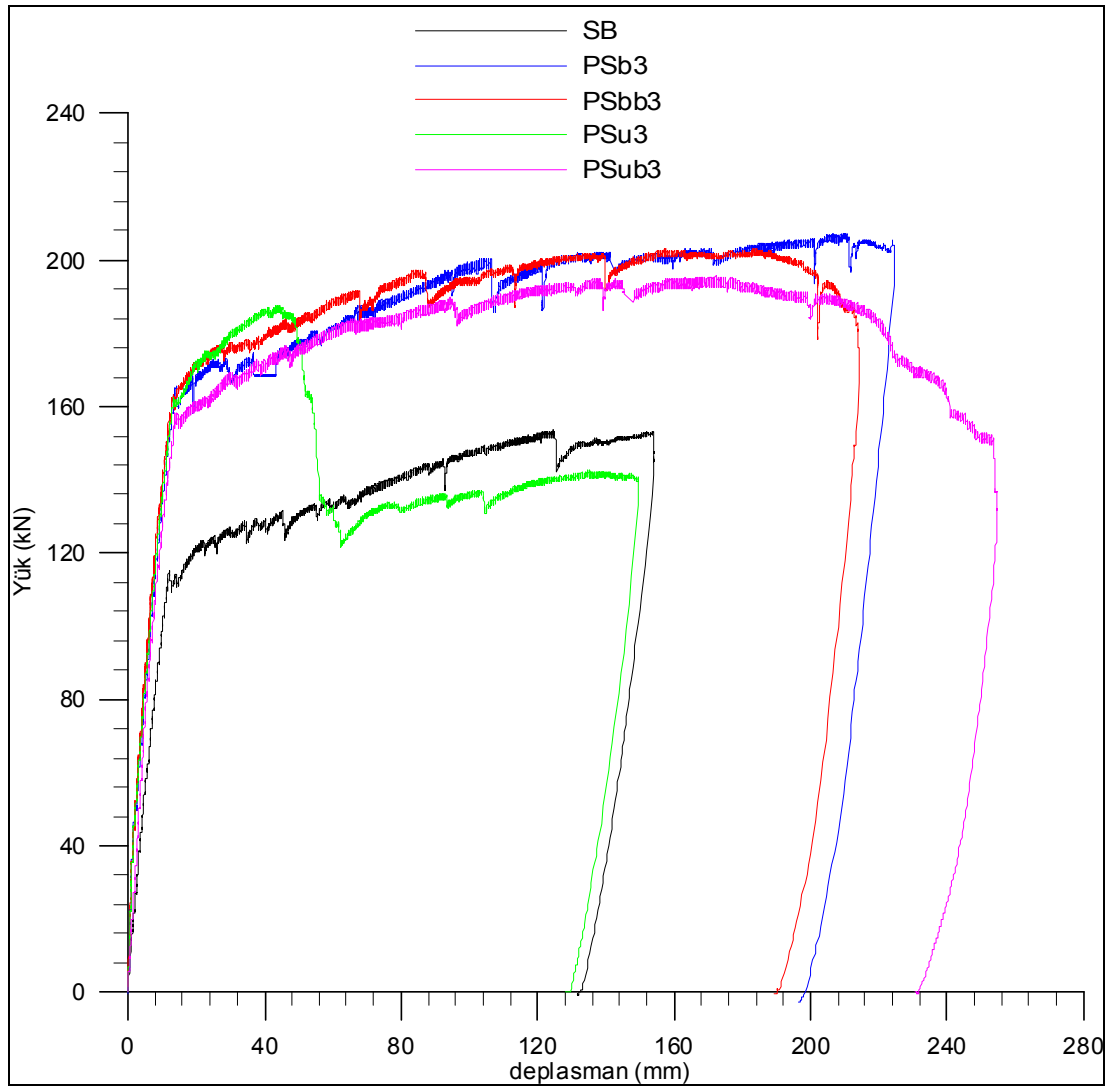
5.8. Uysal'ın Çalışmasıyla Karşılaştırma[1]

Uysal'ın bu çalışması sadece delikli saçlarla betonarme kirişlerin eğilme zorlanmasına karşı güçlendirilmesini kapsamaktadır. Deney elemanlarının çekme donatıları, kiriş boyu, eni ve yüksekliği bu tezle aynıdır. Tezde, deneyi yapılmış elemanların özelliklerine bakacak olursak;

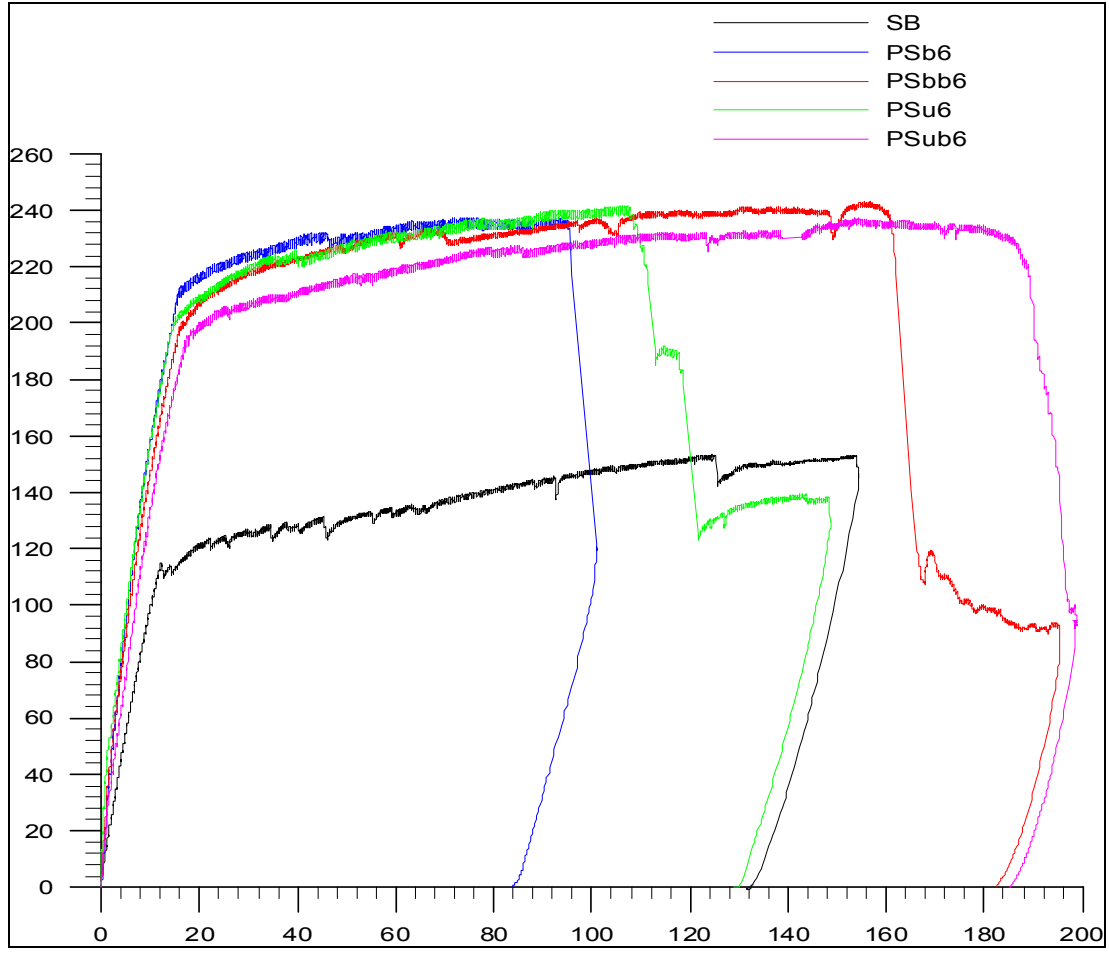
- a) SB ; Referans olarak kullanılacak kiriştir.
- b) PSb3 ; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=3 mm)
- c) PSb6 ; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=6 mm)
- d) PSbb3 ; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş delikli çelik levha, (kalınlık= 3 mm),
- e) PSbb6 ; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş delikli çelik levha, (kalınlık= 6 mm),
- f) PSu3 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=3 mm),
- g) PSu6 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha (kalınlık=6 mm),
- h) PSub3 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış ve yan yüzden bulonlarla desteklenmiş çelik levha, (kalınlık=3 mm)
- i) PSub6 ; Alt yüze epoksi ile yapıştırılmış, yan yüzden sadece bulonla desteklenmiş çelik levhalı kiriştir (kalınlık=6 mm) [1].

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 incelendiğinde 3 mm'lik levhalarla güçlendirilen kirişlerin akma dayanımları yaklaşık 160 kN, 6 mm'lik levhalarla güçlendirilen kirişlerin akma dayanımları yaklaşık 200 kN olmuştur. Bu çalışmada ise akma dayanımları delikli levhalı elemanlarda yaklaşık 240kN, düz levhalı elemanlarda ise yaklaşık 290 kN olmuştur. Yani elemanların taşıma güçleri 1,5 kat arttırılmıştır. Uysal'ın tezi incelendiğinde deneylerin bazılarında levhaların güçlendirme elemanından sıyrıldığı, sünekliklerinin sınırlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise taşıma gücü yaklaşık 1,5 kat arttırılmış buna

rağmen, elemanlar Uysal'ın çalışmasından son derece sünek davranmış, çelik güçlendirme elemanları etkinliklerini kirişle birlikte deneyin sonuna kadar sürdürmüştür. Hatta basınç levhası da kullanılmış elemanların deneylerinde ya yükleme çerçevesinin kapasitesi dolduğu ya da çekme donatıları koptuğu için deneye son verilmiştir.



Şekil 5.17. Uysal'ın 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği[1]



Şekil 5.18. Uysal'ın 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği[1]

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin, düz çelik levhalar yapıştırılarak güçlendirilmesi sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda bu yöntem ile güçlendirilmiş kirişlerde yeterli dayanıma ulaşılmasına rağmen kirişlerin süneklik kapasitesinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bir kirişe baştan eğilme ve kesmeye karşı güçlendirme gerekliliği olduğu gibi eğilme kapasitesinin güçlendirilerek artırılmasından sonra kesme kapasitesinin de artırılması zorunlu hale gelebilir. Yani eğilme ve kesmeye karşı güçlendirme birlikte de düşünülmesi gereken bir konudur. Süneklik, kesme+eğilmeye karşı güçlendirme konusundaki bu açığın giderilmesi amacıyla gerçekte de uygulaması mümkün ve kolay teknikler düşünülmüş ve bunlar 12 tablalı betonarme kiriş üzerinde uygulanarak test edilmiş, oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Ancak bu sonuçların laboratuvar şartlarındaki sınırlı sayıda deneyden elde edildiği unutulmamalıdır.

1) Eğilmeye karşı, düz veya delikli çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden son derece başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında, dayanım ve rijitliğin yanı sıra asıl ihtiyaç duyulan yeterli süneklik elde edilmiştir.

2) Eğilme+kesmeye karşı düz levha ve art germeli gijonlarla güçlendirilen elemanlarda ister basınç levhası kullanılsın ister kullanılsın dayanım ve rijitliğin yanı sıra fazlasıyla yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır. Eğilme+kesmeye karşı delikli levha ve art germeli gijonlarla güçlendirilen elemanlarda basınç levhası kullanılan eleman taşıma gücü, rijitlik açısından oldukça başarılı olmuş, basınç levhası kullanılmayan elemanda ise delikli levhanın yırtılması sonucu yeterli süneklik kapasitesine ulaşamamıştır. Bunun sebebi ise saplamalardaki art germeler (600 kg/saplama) levhaya yerel basınç uyguladığından deformasyonlar iki saplama arasında

yoğunlaştığı ve delikli levhanın koptuğudur. Bunun işareti diğer deneylerde gözlenmiş ancak düz levhali elemanlar ve delikli, basınç levhasının kullanıldığı eleman deformasyondaki bu yoğunlaşmayı tolere etmeyi başarmıştır. Sadece alttan delikli levha ile güçlendirme söz konusu olduğunda saplamalardaki art germe kuvveti aynı zamanda tüm levhaya deformasyonları yayacak miktarda azaltılması gerektiği düşünülmüştür.

3) Tüm elemanlarda deney boyunca çekme levhasını tutan uç yan levhalar ve bulonlarında herhangi bir sıyrılma, ezilme, kopma belirtisi dahi olmamıştır. Önerilen uç bağlantının oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Basınç levhasında burkulma olmamıştır. Sistem o kadar etkin olmuştur ki epoksi yapıştırıcı kullanılmadığı zaman bile levhaların ve bulonların stabilitesinde olumsuz bir gelişme olmamıştır. Uçlardaki sistem; bu bölgeye gelen kesme kuvvetlerini de karşılamaktadır.

4) Levhanın epoksi ile yapıştırılmadığı elemanlarda levhadaki akma tüm liflerde aynı anda başlayamadığından akma, levha kesitine ortadan kenara doğru ve yavaş yavaş yayılmaya başlamıştır. Bundan dolayı bu elemanlarda akma, epoksi ile yapıştırılana oranla ortalama %15 daha erken bir yük değerinde başlamıştır. Ancak elemanlar olması gereken nihai dayanımına belirli bir deformasyondan sonra ulaşmıştır. Levhaları epoksi ile yapıştırılan ve yapıştırılmayan elemanlarının nihai dayanımları yaklaşık eşit olmuştur. Bundan dolayı levha yapıştırılmadığında teorik akma hesap dayanımı bulunurken hesap değeri yaklaşık %20 düşürülmelidir. Çekme levhası yapıştırılmadığında levhada bir miktar sarkma olmaktadır. Ancak bu boşluk daha deneyin başındaki yük değerlerinde kapanmış, sistem birlikte çalışmaya başlamıştır.

5) Levhaların epoksi ile yapıştırıldığı elemanlarda deney akma yükleri ile hesap akma yükleri karşılaştırıldığında; düz levha yapıştırılmış elemanların hesaplanan akma yüküne ortalama %94 yakınlıkta, delikli levha yapıştırılmış elemanların ise hesaplanan akma yüküne ortalama %84 yakınlıkta olduğu

görülmüştür. Aradaki bu farkın delikli levhanın deformasyon yeteneğinin daha fazla olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu tekniklerle güçlendirilen kirişlerin hesaplamalarında bir takım azaltma katsayılarıyla birlikte klasik yolların kullanılabileceği görülmüştür.

6) S5 deney elemanı kesmeden çok ağır hasarlar alsa da sınır durumda beklenilenin aksine eğilmeden gitmiştir. Ancak etriyeler eksik ($\varnothing 8/500$) olduğu için beton basınç bölgesinde sargılama yetersizliğinden dolayı beton ezilmiş, basınç donatıları burkularak nispeten az sünek davranış sergilemiştir. Bu eleman kesmeden gitmese bile sargılamanın süneklik üzerindeki önemini tekrar vurgulamıştır. Kesmeye karşı yapılan güçlendirmenin sadece kesme kuvvetinin büyük olduğu mesnet bölgelerinde değil, kiriş boyunca yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

7) Basınç levhasının etkinliği çok net gözükmemektedir. Basınç levhası kullanılan elemanların sünekliği o kadar çok artmıştır ki yükleme çerçevesinin kapasitesi dolduğu için belli bir noktadan sonra deneye devam edilememiştir. Akmadan sonra bu elemanların dayanımında sürekli artış gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji tüketimleri çok daha fazla olmuştur. Bu elemanlarda basınç levhası moment kolunu epey arttırdığı için taşıma gücünde de küçümsenmeyecek artışlar gözlenmiştir. Basınç levhasının bu yöntem ile güçlendirilen tüm kirişlerde kullanılmasının davranışı önemli ölçüde iyileştireceği anlaşılmıştır.

8) Delikli levha, düz levhaya göre çok daha fazla deformasyona müsaade etmekte olduğu, ancak düz levhaların ise kesmeye karşı oldukça iyi bir kaldıraç etkisi gösterdiği gözlemlenmiştir.

9) Yapıştırma aşamasında delikli çelik levhanın deliklerinden epoksi yapıştırıcının dağılımı ve kalınlığı gözlenebilmiş ve bu sayede yapışma kalitesi kontrol edilebilmiştir. Ayrıca epoksinin delik iç yüzeylerine mekanik olarak yaslanması ile epoksi ile sac yüzey arasındaki yük aktarımının daha etkili olduğu görülmüştür.

10) Levhada delikler sonradan açılmakta ve hatalı zımbalanmış levhalar olabilmektedir. Hatalı zımbalanmış levhaların güçlendirme yöntemini ne denli etkisiz kılabilceği ve bu elemanlarda gevrek kırılmalar olabileceği görülmüştür. Bu nedenle güçlendirme işleminde delikli levha kullanılacaksa levhalar bu türden hatalara karşı titizlikle incelenmelidir.

11) Kesmeye karşı art germeli gijonlarla güçlendirilen ve delikli levha kullanılan elemanlarda ard germe kuvveti sınırlandırılmalıdır.

12) Delikli levhalı elemanların grafikleri düz levhalı elemanlarla karşılaştırabilmek için normalize edilmiştir. Normalizasyon sonucunda; sadece çekme levhası kullanılan elemanların davranışı benzemiş, taşıma gücünde ise düz levhanın üstün olduğu gözlemlenmiştir. Basınç ve çekme levhalarının yapııştırılarak birlikte kullanıldığı elemanlarda ise grafiklerin birbiri ile örtüşecek kadar davranışın benzediği görülmüştür. Ancak her zaman düz levhayla güçlendirilen elemanlar, delikli levhayla güçlendirilen elemanlardan daha rijit davranmıştır.

13) Çalışmada ürün ve üretim kalitesinin çok önemli olduğu ve davranışı önemli ölçüde değiştirebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Uysal, A., "Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-74 (2006)
2. Arslan, M., "Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-69 (1991).
3. Li, G., John, M., Maricherla, D., "Experimental study of hybrid composite beams", **Construction and Building Materials**, 20: 311-319, (2006).
4. Wang, Y. C., "Analytical and experimental study on seismic performance of RC T-beams with design deficiency in steel bar curtailment ", **Engineering Structures**, 25: 215-227, (2003).
5. Ali, M.S.M., Oehlers, D.J., Park, S.M., "Comparision between FRP and steel plating of reinforced concrete beams", **Composites**, Part A, 32: 1319-1328, (2001).
6. Hui, L., Liu, Z., Ou, J., " Experimental study of a simple reinforced concrete beam temporarily strengthened by SMA wires followed by permanent strengthening with CFRP plates", **Engineering Structures**, 30: 716-723, (2008).
7. Moon, D., Sim, J., Oh, H., "Detailing considerations on RC beams strengthened with CFRP bars embedded in mortar overlay", **Construction and Building Materials**, 21: 1636-1646, (2007)
8. Gülenler, C., "Betonarme elemanların polimer yapıştırıcı kullanarak çelik levhalarla takviyesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 9-21, (1977).
9. Alfaiate, J., Appleton, J., "External reinforcement with steel plates and injected epoxy on concrete beams", **CREST**, Lisbon, 4-16, (1986).
10. Barnes, R.A., Mays, G.C., "Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates", **Construction and Building Materials**, 20: 396-411, (2006).
11. Raoof, M., El-Rimawi, J. A., Hassanen M.A.H., "Theoretical and experimental study on externally plated R. C. Beams", **Engineering Structures**, 22: 85-101, (2000).

- 12.Kankam, C. K., "Structural behaviour of bolted end-plated reinforced concrete beams", **Materials and Design**, 24: 367-375, (2003).
- 13.Altın, S., Anıl, Ö., Kara, M.E., "Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates", **Engineering Structures**, 27: 781-791, (2005).
- 14.Adhikary, B.B.; Mutsuyoshi, H., Sano, M., "Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beams wabs, experiments and analysis", **Construction and Building Materials**, 14: 237-244, (2000).
- 15.Adhikary, B.B.; Mutsuyoshi, H. "Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques", **Construction and Building Materials**, 20: 366-373, (2006).
- 16.Su, R.K.L., Zhu, Y., "Experimental and numerical studies of external steel plate strengthened reinforced concrete coupling beams", **Engineering Structures**, 27: 1537-1550, (2005).
- 17.Ünsal, T.Ç., "Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranış ve dayanımları", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 16-28, (1989).
- 18.Çelikel, T.F., "Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yinelenir yük altında davranış ve dayanımları", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 19-24, (1991).
- 19.Özdemir, İ., "Onarılmış betonarme kirişlerin tersinir yük altında davranış ve dayanımları", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 18-27, (1994).
- 20.Altun, F., "An experimental study of the jacketed reinforced concrete beams under bending", **Construction and Building Materials**, 18: 611-618, (2004).
- 21.Aykaç, S., "Onarılmış/Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deprem davranışı", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-54, (2001).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZBEK, Eray
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.09.1983; Gaziantep
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 2858314
 Faks :
 e-mail : erayozbek@gazi.edu.tr

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	Mehmet Emin Resulzade Anadolu Lisesi	2001

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

2006-2008	Gazi Üniversitesi Müh-Mim Fakültesi	Araştırma Görevlisi
-----------	--	---------------------

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Amatör balıkçılık, Latin dansları, masa tenisi,