

**GÜÇLENDİRİLMİŞ/ ONARILMIŞ BETONARME
KİRİŞLERİN REHABİLİTASYONU**

Sinan KAYAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2008

ANKARA

Sinan KAYAR tarafından hazırlanan GÜÇLENDİRİLMİŞ/ONARILMIŞ
BETONARME KİRİŞLERİN REHABİLİTASYONU adlı bu tezin Yüksek
Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Hüsnü CAN
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç.Dr. Özgür ANIL
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih: 08 / 07 / 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.

Sinan KAYAR

**GÜÇLENDİRİLMİŞ/ONARILMIŞ BETONARME
KİRİŞLERİN REHABİLİTASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Sinan KAYAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2008**

ÖZET

Bu çalışmada, çelik levhalar ile güçlendirilmiş / onarılmış betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, biri yalnız, üçü güçlendirme, üçü de hasar sonrası onarıma tabi tutulmuş kiriş olmak üzere toplam yedi adet deney elemanı incelenmiştir. Çalışmada 1/1 ölçek kullanılmıştır. Deney elemanları iki noktalı tek düze yükler altında test edilmiştir. Kullanılan çelik levhanın kalınlığı, levhanın düz veya delikli olması durumu, yan yüz levha kullanılması ve bulon ile desteklemenin yanı sıra yapıştırma yönteminin etkinliğinin davranış üzerine etkileri ele alınmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda çelik levhalar ile güçlendirme yönteminin davranış üzerine iyi sonuçlar verdiği, onarımda çelik levha kullanımının da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : Güçlendirme,onarım, betonarme kiriş, çelik levha, epoksi
Sayfa Adedi : 92
Tez Yöneticisi : Dr. Sabahattin Aykaç

**REHABILITATION OF STRENGTHENED/ REPAIRED
REINFORCED CONCRETE BEAMS**

(M.Sc. Thesis)

Sinan KAYAR

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2008

ABSTRACT

In this study, experiments for flexural strengthening/ repairing of reinforced concrete beams were carried out. In the experimental study, seven reinforced concrete beams including one of reference, three of strengthened and three of repaired beams were tested under monotonic loading. All test specimens were 1/1 scaled. Plate thickness, using of flat or perforated plate, bolt supporting and efficiency of gluing method were considered as main parameters of testing process. From the experimental result, it was observed that satisfactory behaviours can be achieved with using steel plate for strengthening/ repairing of reinforced concrete beams.

Science Code : 911.1.144

**Key Words : Strengthening, repair, reinforced concrete beam, steel plate,
epoxy**

Page Number: 92

Adviser : Dr. Sabahattin Aykaç

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlanmasında ve yürütülmesinde beni yönlendiren ve sürekli teşvik eden değerli hocam Dr. Sabahattin AYKAÇ' a teşekkür ederim.

Laboratuarda deney elemanlarının hazırlanmasında ve deneye tabi tutulmasında benden yardımlarını esirgemeyen Uzman Faruk OGÜN'e , Araştırma Görevlileri Mahmut Cem YILMAZ, Şule BAKIRCI ER, Eray ÖZBEK'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada ve tez yazımında bana yardımcı olan ve beni yalnız bırakmayan destekleyen değerli arkadaşım Servet KARAHAN 'a teşekkür ederim.

Burada isimlerini sayamadığım katkısı bulunan herkese teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan ve bugünlere gelmemde bana en büyük katkıyı sağlayan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. AMAÇ VE KAPSAM.....	3
3. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	5
3.1. Betonarme Katman Ekleme İle Kiriş Onarım ve Güçlendirilmesi	5
3.2. Çelik Levhalar İle Kirişlerin Onarım ve Güçlendirilmesi	12
3.3. Karbon Lifli Kirişler Yapıştırılarak Kiriş Onarım ve Güçlendirilmesi	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	30
4.1. Deney Elemanı İlkeleri.....	30
4.2. Deney Elemanları.....	31
4.3. Malzeme Özellikleri ve Dayanımları	41
4.4. Yapıştırma Tekniği	42
4.5. Deney Düzeni	43

Sayfa

4.5.1. Deney çerçevesi.....	43
4.5.2. Yükleme düzeni.....	46
4.5.3. Ölçüm düzeni	46
4.6. Deneyler.....	50
4.6.1. Sb referans(yalın) kışı.....	50
4.6.2. Sbb1,5 deney elemanı	52
4.6.3. Sbb3 deney elemanı	53
4.6.4. Sub6 deney elemanı	55
4.6.5. Rub6 deney elemanı.....	57
4.6.6. Prb6 deney elemanı.....	58
4.6.7. Prub6 deney elemanı	60
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	66
5.1. Genel	66
5.2. Taşıma Gücü.....	66
5.3. Süneklik.....	69
5.4. Enerji Tüketimi.....	72
5.5. Eğilme Rijitliği.....	74
5.6. Uysal, A' nın [1] Çalışması İle Karşılaştırma.....	75
5.6.1. Düz ve delikli levhalar ile yapılan güçlendirmelerin karşılaştırılması.....	75
5.6.2. Delikli levhalar ile yapılan onarım ve güçlendirmelerin karşılaştırılması.....	76
5.7. Karahan, S.'nin Çalışması ile Karşılaştırma.....	76

	Sayfa
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78
6.1. Sonuç.....	78
6.2. Uygulamaya Yönelik Öneriler.....	82
KAYNAKLAR.....	84
EKLER.....	86
ÖZGEÇMİŞ	92

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney elemanları	32
Çizelge 4.2. Yapıştırıcı(epoksi) özellikleri.....	42
Çizelge 4.3. Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'lerin ölçüm amaçları	48
Çizelge 5.1. Teorik hesaplardan ve deneylerden elde edilen taşıma güçleri ve oranları	67
Çizelge 5.2. Deney elemanları süneklik oranları	69
Çizelge 5.3. Deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri.....	73
Çizelge 5.4. Deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları.....	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Delikli çelik levha ile kiriş güçlendirilmesi.....	33
Resim 4.2. Sb deney elemanı.....	51
Resim 4.3. Sbb1,5 deney elemanı.....	52
Resim 4.4. Sbb3 deney elemanı.....	54
Resim 4.5. Sbb3 deney elemanı basınç donatılarında burkulma.....	55
Resim 4.6. Sub6 deney elemanı.....	56
Resim 4.7. Rub6 deney elemanı.....	57
Resim 4.8. Prb6 deney elemanı.....	59
Resim 4.9. Prub6 deney elemanı.....	60
Resim 4.10. Deney elemanları.....	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Delikli çelik levha detayı.....	33
Şekil 4.2. Sb referans kiriş (yalın kiriş) detayı	34
Şekil 4.3. Sbb1,5 deney elemanı.....	35
Şekil 4.4. Sbb3 deney elemanı.....	36
Şekil 4.5. Sub6 deney elemanı.....	37
Şekil 4.6. Rub6 deney elemanı.....	38
Şekil 4.7. Prb6 deney elemanı.....	39
Şekil 4.8. Prub6 deney elemanı.....	40
Şekil 4.9. Deney düzeneği ön görünüş.....	44
Şekil 4.10. Mesnet detayları.....	45
Şekil 4.11. Deney düzeneği yan görünüş.....	45
Şekil 4.12. Yükleme noktalarının yeri.....	47
Şekil 4.13. Ölçüm düzeneği a) ön yüzü b) arka yüzü.....	49
Şekil 4.14. Sb deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	51
Şekil 4.15. Sbb1,5 deney elemanı.....	53
Şekil 4.16. Sbb3 deney elemanı.....	54
Şekil 4.17. Sub6 deney elemanı.....	56
Şekil 4.18. Rub6 deney elemanı.....	58
Şekil 4.19. Prb6 deney elemanı.....	59
Şekil 4.20. Prub6 deney elemanı.....	61
Şekil 4.21. Sb deney elemanı (deney öncesi hasarsız durum).....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. Sb deney elemanı çatlak haritası.....	62
Şekil 4.23. Sbb1,5 deney elemanı çatlak haritası.....	63
Şekil 4.24. Sbb3 deney elemanı çatlak haritası.....	63
Şekil 4.25. Sub6 deney elemanı çatlak haritası.....	64
Şekil 4.26. Rub6 deney elemanı çatlak haritası.....	64
Şekil 4.27. Prb6 deney elemanı çatlak haritası.....	65
Şekil 4.28. Prub6 deney elemanı çatlak haritası.....	65
Şekil 5.1. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri.....	67
Şekil 5.2. Yalnızca alt yüzden düz çelik levha yapıştırılarak ve alt yüzden bulon ile desteklenmiş deney elemanları yük-deplasman grafikleri.....	70
Şekil 5.3. 6 mm'lik düz çelik levha ile onarılmış/güçlendirilmiş kirişlerin yük deplasman grafikleri.....	71
Şekil 5.4. 6 mm'lik delikli çelik levha ile onarılmış kirişlerin yük deplasman grafikleri.....	71

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
f_{yk}	Donatı Çeliği Akma Dayanımı
h	Kiriş Yüksekliği
L	Kiriş Boyu
L_t	Levha Boyu
δ_u	En büyük yükün %15 azaldığı andaki deplasman
δ_y	Akma Anındaki Deplasman
$\emptyset$	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
A_{s1}	Basınç Donatısı Alanı
A_{s2}	Çekme Donatısı Alanı
A_{sL}	Levha Kesit Alanı
P_y	Akma Yüğü
P_u	Maksimum Yüğü
t_p	Levha Kalınlığı
L_c	Mesnet-Levha Ucu arası Mesafe

Kısaltmalar

FRP
GFRP
CFRP
TS
BS
LVDT

Açıklama

Fiber Takviyeli Polimer
Cam Fiber Takviyeli Polimer
Karbon Fiber Takviyeli Polimer
Türk Standardı
İngiliz Standardı
Elektronik Deplasman Ölçer

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar son yüzyıl içerisinde yoğun bir şekilde uygulama alanı bulmuştur. Ekonomik, emniyetli, tasarımda sağladığı avantaj, kullanılan malzemelerin ülkemiz içerisinde kolayca temin edilebilmesi, dış etkilere karşı güvenli olması uygulama alanının hızla artmasında etkili olmuştur. Betonarme yapıların artmasıyla birlikte çağımızda çeşitli sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu sorunların başında yapılan betonarme yapıların yapım kalitesindeki yetersizlikler, oluşan depremler sonucunda yapılarda meydana gelen ve taşıyıcı sistemin hasar görmesine neden olan ilave dış yükler, yapının kullanım amacının değişmesi nedeniyle taşıyıcı elemanlarda ek zorlanmaların meydana gelmesi ve kullanımdan kaynaklanan çeşitli nedenlerden dolayı yapılarda güçlendirme/onarım ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu etkilere ilave olarak gelişen mühendislik bilgisinin betonarme yapıların davranışını daha iyi yansıtması amacıyla hazırlanan yeni yönetmeliklerin mevcut yapıları da kapsamı sonucunda ek tedbirlerin alınması ihtiyacı gerekmektedir.3 Mayıs 2007 tarihinde Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik hazırlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelikte bir ilk olarak üzerinde çok tartışılan betonarme yapıların güçlendirilmesiyle ilgili bir bölüm oluşturulmuş ve yapılacak güçlendirme çalışmalarına bir standart getirilmiştir. Betonarmenin davranışı üzerine geliştirilen yeni yönetmelikler doğrultusunda güçlendirme/onarım ihtiyacı olan yapılar belirlenmekte ve daha güvenli bir ortam için rehabilitasyona tabi tutulmaktadırlar.

Betonarme elemanların rehabilitasyonu kapsamında onarım veya güçlendirme yöntemleri uygulanmaktadır. Onarım ve güçlendirme kavramları birbiri ile karıştırılmamalıdır. Bu iki kavram arasında çok önemli bir fark vardır. Güçlendirme, çok az hasar görmüş veya hasarsız elemanın taşıma gücünü istenilen seviyeye ulaştırmak için yapılan rehabilitasyon yöntemidir. Onarım ise, hasarlı elemanın taşıma gücünün hasarsız durumdaki taşıma gücüne veya daha üst seviyeye çıkarmak için yapılan iyileştirme yöntemidir.

Betonarme kirişlerde meydana gelen hasarlar incelendiğinde genellikle kullanılan hasar tanımları şöyledir;

Hafif hasar: Betonda ezilmenin görülmediği, çekme donatısının akma sınırına ulaşmadığı durumda kılcal çatlakların oluşması hali hafif hasar olarak tanımlanmaktadır

Orta hasar: Çekme donatılarında akma belirtilerini gösteren çatlakların meydana gelmesi, basınç bölgesinde ezilme başlangıcı durumu orta hasar olarak tanımlanmaktadır.

Ağır hasar: Çekme donatısında kopma veya kopmaya yakın büyük deformasyonlar, basınç bölgesindeki betonda ezilme ve donatılarda belirgin burkulma, sargı donatısında açılma ağır hasar olarak tanımlanmaktadır.

Betonarme kirişlerde yukarıda tanımlanan hasar durumlarına göre güçlendirme/onarım ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Kirişlerin güçlendirme/onarılmasında genellikle kullanılan yöntemler; betonarme katman ekleme, FRP malzemeler ile sargılama ve çelik levha kullanılması yer almaktadır.

Bu çalışmada çelik levha kullanılarak güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin eğilmeye karşı rehabilitasyonu incelenmiştir. Çalışma kapsamında biri yalın, 3 güçlendirme ve 3 adet onarım olmak üzere toplam 7 adet deney elemanı kullanılmıştır. Deney elemanlarında düz ve delikli çelik levha kullanımının elemanın dayanımın, süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılarak çalışma konusu hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Kirişlerin eğilme kapasitesinin rehabilitasyonu kapsamında çelik levha kullanımının davranış yönünden beklenen sonuçları verdiği görülmüştür. Bu yöntemin mevcut yapılarda uygulanması ile etkin sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Bu amaçla çalışmanın sonuç ve öneriler kısmında uygulamada dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmiştir.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Bu deneysel çalışmanın amacı çelik levhalar ile onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilmeye karşı rehabilitasyonudur. Bu amaçla biri yalın olmak üzere toplam yedi adet deney elemanı hazırlanmıştır. Bu deney elemanlarının üçü güçlendirilerek diğer üç tanesi ise hasar sonrasında onarılarak deneye tabi tutulmuştur. Laboratuarda aynı zamanda yürütülen diğer çalışmalara paralel olarak deneysel çalışmanın elemanları seçilmiş ve bir program dahilinde çalışmalar yürütülmüştür. Deney elemanlarının hazırlanmasında laboratuvar şartlarının imkân verebildiği ölçüde mevcut yapıları yansıtacak boyutlar seçilmiştir. Bu amaçla yapılacak deneysel çalışmanın gerçekte örtüşmesi açısından betonarme kirişler 200 x 500mm en kesitli ve 4500 mm uzunluğunda hazırlanmıştır.

Çalışmada aşağıda maddeler halinde belirtilen yöntemlerin betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi kapsamında elemanın dayanım, süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesi üzerine etkileri araştırılmıştır.

- Düz çelik levhanın sadece kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılarak bulonla desteklenmesi
- Delikli çelik levhanın sadece kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılması (bulonsuz)
- Düz çelik levhanın kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılması ve uç kısımlardan yan yüz levhaları ile tutturularak bulonla desteklenmesi
- Delikli çelik levhanın kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılması ve uç kısımlardan yan yüz levhaları ile tutturularak bulonla desteklenmesi
- Levha kalınlığındaki değişim
- Uç kısımlardaki yan yüz levhalarının boyutları
- Bulon sayısı ve uygulama tekniği

Yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler öncelikle kendi içinde değerlendirmeye tabi tutulmuştur.Elde edilen değerlendirme sonuçları geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ile bir bütün olarak karşılaştırılarak güçlendirme/onarımda çelik levha kullanımının ne derece etkin olduğu araştırılmıştır.

Deneyisel çalışmada elemanın eğilme kapasitesinin arttırılmasının yanında sünek bir davranış sergilemesi amaçlanmaktadır.

3. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çağımızda betonarme yapı elemanlarının onarımı ve güçlendirilmesi kapsamında çok yönlü çalışmalar yapılmaktadır. Betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi açısından yapılan çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaları üç ana grupta toplayabiliriz. Bunlar;

1. Betonarme katman ekleme ile kiriş onarım ve güçlendirilmesi
2. Çelik levhalar ile kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi
3. Karbon lifli levhalar ile kiriş onarım ve güçlendirilmesi

Bu yöntemlerin dışında ; kiriş ortasına kolon ekleme, epoksi enjeksiyonu,tamir harcı, püskürtme betonu gibi onarım teknikleri de uygulanmaktadır.Bu çalışmalar ile ilgili geçmişte yapılan araştırmalardan bazıları bu bölümde sunulmaktadır.

3.1. Betonarme Katman Ekleme ile Kiriş Onarım ve Güçlendirilmesi

Ünsal, T.Ç [1] çalışmasında, betonarme kirişlerin eğilme taşıma güçlerinin arttırılması için yeni boyuna donatı içeren beton katmanı ile güçlendirmeyi amaçlayan deneysel bir çalışmadır. Bu çalışmada deney kirişleri, hasara uğratılmadan ve yüksüz olarak (yük askıya alınarak), çekme yüzünden ek donatı konularak ve beton örtü ile kaplanarak güçlendirilmiş, monotonik yükler altında kiriş davranış ve dayanımları kesit düzeyinde incelenmiştir.

Çalışacak kısımda kesme kuvveti oluşturmayacak bir yükleme şekli seçilen çalışmada araştırma yalnızca eğilme etkisine göre yapılmıştır. Araştırma, ikisi karşılaştırma kirişi, beş tanesi de farklı özellikler taşıyan güçlendirilmiş kiriş olmak üzere yedi deney elemanı ile gerçekleştirilmiştir.

Güçlendirmelerde yeni ve eski boyuna donatılar, Z demirleri ile birbirlerine bağlanmış bazıları da U biçimindeki yeni etriyeler ile eski etriyelere kaynaklanmış, bazılarında da hem Z demirleri hem de etriye kullanılmıştır. Bazı kirişlerde

güçlendirme katmanı mesnetlere kadar uzatılmış, bazılarında ise yerel güçlendirme etkisinin araştırılması amacıyla, güçlendirme katmanı mesnetlerden bir miktar uzakta kesilmiştir.

Kirişler 150 mm x 250 mm dikdörtgen kesitte olup, sonradan eklenen 50mm kalınlığındaki güçlendirme katmanı ile toplam yükseklik 300 mm'ye ulaşmıştır. Deney kirişlerinin tümünde 2Ø14 çekme donatısı, 2Ø10 basınç donatısı ve 2Ø14 güçlendirme donatısı kullanılmıştır. Araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda,

- Güçlendirme ile amaçlanan taşıma gücüne ne kadar yaklaşılabileceği,
- Güçlendirmede kullanılan ek etriyelerin güçlendirmeye etkisinin ne olacağı,
- Ek çekme donatıları ile kirişte bulunan çekme donatılarının birbirine Z şeklinde bağlantı demirleri ile kaynaklanmalarının güçlendirmeye etkisinin ne olacağı,
- Ek çekme donatılarının kolon – kiriş birleşimlerinde nereye kadar uzatılması gerektiği, sorularına cevap aranmış olup, güçlendirilmiş kiriş davranışının kesit düzeyinde incelenmesini kapsayan bu araştırma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.
- Hasara uğramamış ve yetersizliği belirlenmiş kirişlerin, ek çekme donatıları kullanılarak ve bunların U şeklindeki ek etriyeler ve/veya Z bağlantı demirleri ile bağlantıları sağlanarak yüksüz olarak güçlendirilmeleri büyük ölçüde etkili olmuştur.
- Güçlendirilmiş kirişlerin moment taşıma kapasiteleri bir döküm kiriş kapasitelerine çok yaklaşmıştır.
- Güçlendirilmiş kiriş rijitliklerinden güçlendirme uygulanan yapım farklılıklarına bağlı olarak büyük bir fark görülmemiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş kirişler bir döküm kiriş kadar rijit davranamamışlardır.
- Güçlendirmede uygulanan yapım farklılıklarının (etiriyeli, Z bağlantı demirli, etriye + Z bağlantı demirli) davranışa fazlaca etki etmediği, ancak, sık aralıklarla kullanılan Z bağlantı demirlerinin sünek davranışta az da olsa etkili olduğu görülmüştür.

- Güçlendirilmiş kirişler birbirlerine yakın bir sünnek davranış göstermişlerdir. Ancak, yapılan gözlemlerde bir döküm kiriş kadar sünnek davranamadıkları ve enerji tüketme kapasitelerinin ise birdöküm kiriş enerji tüketme kapasitelerinden az olduğu görülmüştür.
- Mesnette kenetlenmiş ve mesnette kenetlenmemiş kiriş modelleri davranış bakımından farklılık göstermemişler, ancak mesnette kenetlenmiş elemanların mesnet bölgelerinde önemli çatlaklar olmuştur.
- Eski beton ile güçlendirme betonunun birbirine tam olarak kaynaştığı ve önlem alınmasını gerektiren herhangi bir olayın olmadığı görülmüştür.

Çelikel, T.F [2] çalışmasında, betonarme kirişlerin, yalnızca eğilme için yüksüz olarak güçlendirilmeleri sonrasında yinelenir yükler altındaki davranış ve dayanımları incelenmiştir. Deney programı, bir tanesi bir döküm (monolitik) karşılaştırma kirişi olmak üzere yedi adet model üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kirişler yüksüz olarak kiriş açıklık ortası (pozitif moment bölgesinde) çekme yüzünde yeni boyuna donatı taşıyan yeni bir beton katmanı (eski paspayı kırıldıktan sonra) oluşturulmuştur. Yeni kirişin eski kirişe yaklaştırılması amacıyla ya U biçimli yeni etriyeler ya da hem eski hem yeni boyuna donatıya kaynaklanan Z biçimli demir bağlantıları kullanılmıştır.

Çalışmalarda, basit kiriş olarak mesnetlendikten sonra simetrik iki tekil yinelenir yük altında denenen kirişler 150 mm X 250 mm dikdörtgen kesitli olup, sonrasında eklenen 50 mm kalınlığındaki güçlendirme katmanı ile toplam yükseklik 300 mm' ye ulaşmıştır. Deney tabi tutulan yedi adet kirişin tümünde 2Ø14 çekme donatısı, 2Ø10 basınç doantısı ve 2Ø14 güçlendirme donatısı kullanılmıştır. Yedi adet deney kirişinden biri gözlenen – amaçlanan davranış ve dayanımı tanımlamak üzere birdöküm olarak düzenlenmiştir. Diğer altı kiriş ise çeşitli özellikleri yansıtacak biçimde tasarlanmıştır. Araştırmacı tarafından yapılan çalışmada;

- Kaynaştırma yöntemi (U etriye yada Z demiri kullanılmıştır),
- Güçlendirme katmanı uzunluğu (genel yada yerel güçlendirme),
- Yeni boyuna donatı ucu durumu (kaynaklı yada boşta), değişkenlerin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri, elde edilen ölçümlerle ve modellerin yük-çökme ve moment-eğrilik ilişkileri çizilerek incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda araştırmacı tarafından ortaya çıkarılan sonuçlar şöyle değerlendirilebilir;
- Hasara uğramış ve yetersizliği belirlenmiş betonarme kirişlerin yeni ilave donatı içeren yeni bir beton katmanı eklenmesi ile gerçekleştirilen güçlendirme işlemi başarılı olmaktadır.
- Güçlendirme sonucunda amaçlanan eğilme taşıma gücünün % 95' ine ulaşabilen dayanımlar elde edilmiş olup, davranışta belirgin bir kusur görülmemiştir.
- Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında U biçimli etriyeler veya Z demirlerinin kullanılması aynı derece de başarılı olmaktadır.
- Yeterli aderans boyu sağlanmış yerel güçlendirme, genel güçlendirme kadar başarılı olmaktadır. Bu çalışmada, güçlendirme katmanları, kuramsal kesim noktasından yaklaşık 35Ø kadar uzatılmış ve yeni çubukların ucu kaynaklandığında başarılı davranış ve dayanım elde edilmiştir.
- Yerel güçlendirmede yeni boyuna donatıların eski boyuna donatılara kaynaklanması halinde çok daha iyi davranış alınmakta gerilme yığılmalarından kaynaklanan eğik çatlaklar önlenabilmektedir. Oysa, yeni donatıların ucu kaynaklanmadığında kesme ve aderans gerilmeleri etkisi sonucu bu tür çatlaklar oluşabilmektedir.
- Güçlendirilmiş kirişlerin süneklik ve enerji tüketme yeteneklerinin yeterli olduğu gözlenmiştir. Ancak, donatı ucu kaynaklanmış yerel güçlendirme kirişlerinde bu özelliklerin diğer kirişlere oranla çok daha başarılı oldukları anlaşılmıştır.

Bu deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak araştırmacı tarafından yapılan uygulamaya yönelik öneriler aşağıdaki gibi özetlenebilir,

- Güçlendirme ek boyuna donatıları eski boyuna donatılara bağlamada U biçimli etriye yada Z bağlantı demiri kullanılabilir.

- Analitik hesaplarda, taşıma gücü kapasitesi %10-20 azaltılarak monolitik kesit gibi hesaplanabilir.
- Genel güçlendirme sorunlu olacak ise, güçlendirme, güçlendirilecek bölge sınırlarının ötesine yeterli kenetlenmeyi sağlayacak kadar uzatılarak (en az 40 Ø) yerel güçlendirme yapılabilir. Ancak, yerel güçlendirmede ek boyuna donatı eski boyuna donatıya uçlarından kaynaklanmalıdır.
- Bu tür kirişlerin güçlendirilmesinin eğilme açısından oldukça başarılı olduğu söylenirken deney kapsamı dışında bırakılmış olarak diğer birçok konuyla ilgili belirsizlikler olup bu tür uygulamalarda çok dikkatli davranılması ve rasgele uygulamalardan kaçınılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Özdemir, İ [3] çalışmasında, eğilme ve keme kuvveti etkisindeki betonarme kirişlerin yüksüz olarak onarılıp, deprem kuvvetlerini benzeştiren yinelenir ve tersinir yükler altındaki davranış ve dayanımlarının araştırılması amacıyla biri yalın kiriş, biri onarılmış kiriş ve ikisi monolitik (bir döküm) kiriş olmak üzere toplam dört adet deney elemanı test edilmiştir.

Deney elemanlarının tasarımında daha önce tekdüze ve yinelenir yük altında incelenmiş olan onarım yönteminin yinelenir ve tersinir yükler altında etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Onarım öncesi, yalın haldeki deney elemanlarının boyutları 150 mm X 250 mm dikdörtgen kesitli olup uzunluğu 1850 mm' dir. Onarılmış kirişte ise beton paspayları kırılarak onarım katmanlarının eklenmesi ile toplam derinlik 350 mm' ye ulaşmıştır. Tüm deney elemanları olağan durumları tanımlayacak ve denge altı davranış sergileyecek şekilde donatılandırılmıştır. Herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılmasını amaçlandığından, oluşabilecek en büyük kesme kuvvetini sorunsuz karşılayabilecek biçimde Ø8/125 mm' lik sargı donatısı kullanılmıştır. Konsol şeklinde hazırlanmış deney elemanlarının tümünde yeterli aderans boyu sağlanabilmesi amacıyla boyuna donatılar konsol dibindeki 500 mm X 1000 mm X 150 mm boyundaki beton bloğa ankre edilmiştir. Deney sonuç ve yorumları araştırmacı tarafından aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Hasara uğramış ve yetersizliği belirlenmiş betonarme kirişlerin yeni donatı içeren yeni bir beton katmanı eklenmesi ile gerçekleştirilen onarım işlemi başarılı olmuştur.
- Onarım sonucunda amaçlanan eğilme taşıma gücü ileri çevrimlerde çoğu zaman aşılmış geri çevrimlerde ise amaçlanan taşıma gücüne çok yaklaşmıştır. Monolitik kiriş taşıma gücünün yaklaşık %90' ına ulaşılmıştır. Geri çevrimlerde amaçlanan taşıma gücüne tam olarak ulaşılmamasına aderans çözümleri ve donatı kopmaları neden olmuştur.
- Onarılmış kirişte dayanım eksilmesi monolitiğe oranla daha erken başlamış ve daha hızlı olmuştur. Bir başka deyişle onarılmış kirişte yeterli, ancak, monolitiğe oranla biraz daha düşük süneklik gözlenmiştir.
- Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında Z bağlantı demirlerinin kullanılması, tersinir yükler altında da bundan önceki çalışmalar ile aynı derecede başarılı olmuştur.
- Onarılmış kirişin enerji tüketme kapasitesinin monolitik kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri ile hemen hemen aynı ve yeterli olduğu gözlenmiştir.
- İlk çevrim dışında onarılmış kiriş rijitliği monolitik kiriş rijitliğine yakın gelişmiştir. Birinci çevrimde onarılmış kirişin düşük çıkmasına yalın kirişteki ana çatlağın tam olarak beton ile doldurulamaması neden olmuştur.

Aykaç, S [4] yaptığı çalışmada, başka nedenlerle katman ekleme tekniği ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin depremi benzeştiren tersinir yinelenir yükler altındaki davranışları araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında sonradan eklenen kirişin boyuna donatıların kenetleme yöntemlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bu amaçla on adet deney elemanı (üç monolitik, yedi yalın) hazırlanmış ve bu elemanlar üzerinde toplam 18 adet deney yapılmıştır. Laboratuvar şartlarında yapılan bu deneylerde, güçlendirme/onarım işlemlerinde yeni boyuna donatının, eski betona kenetlenme yöntemleri (sürekli, kimyasal, mekanik) ve yükleme durumuna göre küçük kesme açıklığı ($a/d \approx 3$) ve orta büyüklükte kesme açıklığı ($a/d \approx 5$) durumları ile yeni eklenen katman sayıları (sadece üst yüze veya her

iki yüze) dayanım ve davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Katman ekleme tekniği kullanılarak uygulanan yöntem onarım ve güçlendirme işlemlerinde oldukça başarılı olmuştur. Diriltme işlemlerinde ise sınırlı bir başarı elde edilmiştir. Genel olarak güçlendirilmiş elemanlar onarılmışlardan, onarılmışlar da diriltilmiş elemanlardan daha iyi davranış göstermişlerdir.
- Tüm deney elemanlarında amaçlanan dayanımlara ulaşılmıştır. Ancak diriltme işlemi uygulanan elemanlarda tersinir yükler altındaki dayanım kaybı erken başlamıştır.
- Kesme kuvveti etkilerinin daha hakim olduğu kesme açıklığı küçük kirişlerin süneklik kapasitesi, kesme açıklığı orta büyüklükte olan kirişlerin süneklik kapasitesinin yaklaşık yarısı kadar olmuştur.
- Onarım işlemi uygulanmış tüm elemanların enerji tüketme kapasiteleri monolitik eleman kapasitelerine çok yakın olmuştur.
- Tüm elemanlarda monolitiğe göre daha az eğilme rijitlikleri elde edilmiştir.
- Yeni katman ile mevcut kiriş arasında sürekliliği ve yük aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan U şeklindeki etriyeler oldukça başarılı olmuştur.
- Katman içindeki yeni boyuna donatıların mevcut kolona mekanik olarak kenetlenmesi oldukça başarılı olmuştur.
- Katman içindeki yeni boyuna donatıların mevcut kolona epoksi kullanılarak yapılan kimyasal yollu ankraj da oldukça başarılı olmuştur.

3.2. Çelik Levhalar ile Kirişlerin Onarım ve Güçlendirilmesi

Arslan, M. [5], çalışmasında epoksiyle çelik levhalar yapıştırılarak yalnızca eğilme için yüksüz olarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tekdüze yükler altındaki davranış ve dayanımları araştırılmıştır. Çalışmada ele alınan güçlendirme yönteminde güçlendirme, kirişin güçlendirilmesi gereken pozitif moment bölgesinde çekme yüzüne epoksi ile çelik levha yapıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Levha başlarının boşa bırakılması ve kaynak ya da başlık kullanılarak yerinde tutulması durumları da incelenmiştir.

Çalışmasında, simetrik yerleştirilmiş eşit iki tekil yük altında denenen kirişler 150x250 mm dikdörtgen kesitli olup sonradan 150x2 mm kesitli ya da 150x4 mm kesitli çelik levhalarla güçlendirilmiş ve yüksüz olarak ya da yük altında onarılmıştır. Denenen dokuz kirişin tümünde 2Ø14 çekme donatısı, 2Ø10 montaj donatısı ve 150x2 mm ya da 150x4 mm güçlendirme levhası kullanılmıştır. Dokuz deney kirişinden biri, güçlendirme ve onarımın davranış ve dayanım üzerindeki etkisini araştırmak için yalın kiriş(referans kirişi) olarak düzenlenmiştir. Diğer kirişler ise,

- Güçlendirme levhası uygulaması (yalın kirişe göre),
- Güçlendirme levhası uzunluğu (uzun yada kısa levha ile güçlendirme),
- Güçlendirme levhası ucunun durumu (boşta, kaynaklı yada dik ve eğik başlıklı),
- Güçlendirme levhası kalınlığı (İnce veya kalın levha kullanılması)
- Yüksüz onarım(kiriş yükleri askıya alınarak yapıştırma işleminin yapılması),
- Yüklü onarım (kiriş yük altında iken yapıştırma işlemin yapılması) değişkenlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş ve yalın kiriş ile ve de birbirileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Araştırma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemi ile betonarme kiriş onarım ve güçlendirilmesi başarıyla gerçekleştirilebilmiştir. Ancak,
- Kısa levha ile güçlendirme çok başarısız olmaktadır.

- Levhanın olabildiğince uzatılması gereklidir. Ancak, uzatma yalnız başına yeterli olmamaktadır.
- Plaka uçlarının mutlaka tutulması gerekmektedir.
- Güçlendirme levhalarının iki ucu eski donatıya kaynaklandığında, ya da başlıklar yardımıyla tutturulduğunda güçlendirmede ve yüksüz onarımda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak yük altında yapılan onarımlar başarılı sonuçlar vermemiştir.
- Levha yapıştırma ve özellikle başlık düzenlemede işçilik büyük önem taşımaktadır. Kötü işçilik amaçlanan dayanımın sağlanamaması yanı sıra çok sakıncalı gevrek davranışa neden olabilmektedir.
- Levha kalınlığı arttırılarak istenilen dayanımın sağlanabileceği düşünülmemelidir. Levha kalınlaştıkça, yapıştırıcıya ve özellikle başlıklara daha fazla görev düşmektedir. Levhayı aşırı kalınlaştırma, dayanımı amaçlanan düzeyde arttıramamanın yanı sıra çok tehlikeli davranışa da yol açmaktadır.
- 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 ($\approx 2-2,5 \delta_y$ kadar) sonra hızlı bir dayanım eksilmesi gözlemlenmiştir. Dayanım yaklaşık $3,5-4 \delta_y$ kadar deplasmanda %80–85 düzeyine düşmektedir.
- 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 kösesi) görülmemektedir.
- Çelik levhalar korozyona karşı çok iyi korunmalıdır. Ayrıca yangın durumunda, gerek levha çeliğinin erimesi gerek epoksinin özelliğini kaybetmesi bakımından önemli risk bulunmaktadır.

Uysal, A [6] çalışmasında, eğilme altındaki betonarme kirişlerin epoksi ile yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesini incelemiştir. Bu çalışmanın amacı çelik levha yapıştırılması ile yapılan güçlendirmenin daha sünek bir hale getirilmesidir. Bunun için düz levha yerine delikli çelik levhalar kullanılmıştır.

Çalışmada biri referans(yalın) kiriş olmak üzere dokuz adet kiriş tek düze yükler altında denenmiştir. Deney elemanları 1/1 ölçekli 200x500x4500mm boyutlarında seçilmiştir. Model kirişlerde epoksi ile yapıştırılan $t=3\text{mm}$ ve $t=6\text{mm}$ olan 200x4000mm boyutlarında çelik levhalar kullanılmıştır. Deney modellerin tasarımında aşağıdaki değişkenlerin dayanım ve davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arası yük aktarımına etkisi
- Çelik levha kalınlığı
- Yapıştırma yöntemi (alt ve yan yüzlerden)
- Yan yüzlere tespit edilen levhanın uzunluğu ve aralarında oluşturulan derz aralıklarının değişimi.
- Epoksi ile yapıştırılan levhaların alt ve yan yüzlerden çelik bulonlarla desteklenmesi

Çalışmada kullanılan deney elemanlarının isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Ek-1’de yapılan deneysel çalışmaların grafikleri sunulmuştur.

- SB; Referans kiriş (yalın kiriş)
- PSb3; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış 3mm kalınlıklı delikli çelik levha.
- PSb6; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış 6mm kalınlıklı delikli çelik levha.
- PSbb3; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş 3mm kalınlıklı delikli çelik levha
- PSbb6; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş 6mm kalınlıklı delikli çelik levha
- PSu3; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış 3mm kalınlıklı delikli çelik levha
- PSu6; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış 6mm kalınlıklı delikli çelik levha
- PSub3; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış ve yan yüzden bulonlarla desteklenmiş 3 mm kalınlıklı delikli çelik levha
- PSub6; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış ve yan yüzden bulonlarla desteklenmiş 6 mm kalınlıklı delikli çelik levha

Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Delikli çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında, dayanım ve rijitliğin yanı sıra yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır.
- Güçlendirmede delikli çelik levha kullanılmasıyla delikler ovalleşerek daha fazla deformasyona izin vermiş buna bağlı olarak da süneklik kapasitelerinde düz levhalara göre belirgin ve yeterli artışlar gerçekleşmiştir. Bu anlamda çalışmanın planlama aşamasındaki, delikli levhaların daha sünek olabileceği öngörüsü gerçekleşmiştir.
- Yapıştırma aşamasında delikli çelik levhanın deliklerinden epoksi yapıştırıcının dağılımı ve kalınlığı gözlenebilmiş ve bu sayede yapımsal kalitesi kontrol edilebilmiştir. Ayrıca epoksinin delik iç yüzeylerine mekanik olarak yaslanması ile epoksi ile levha yüzeyi arasındaki yük aktarımının daha etkili olduğu görülmüştür. Benzeri çalışmalarda bölgesel de olsa epoksinin özellikle parlak yüzeyli düz levhayüzeylerinden ayrılabilceği görülmüştür. Delikli levhalarda bu sorun daha az yaşanmıştır.
- Delikli levha enkesitindeki metalik alan ile yapışma yüzeyine iletilen kuvvet doğru orantılı olduğundan, levha kalınlığının süneklik kapasitesini belirgin şekilde etkilediği görülmüştür. Deneylerde kalın levhali elemanlar, ince levhali elemanlardan daha az bir süneklik göstermiştir. Buna rağmen kalın levhali elemanlarda levha ile birlikte sağlanan çekme donatısı oranının TS500'de izin verilen maksimum donatı oranına (0.85pb) yaklaşık eşit olduğu ve bu durumda bile elde edile en küçük süneklik oranının 8 civarında olduğu görülmüştür. Betonarme sünek kirişlerde, kabul edilebilir en küçük süneklik oranının 4–5 civarında olduğu göz önüne alındığında maksimum donatı oranına yakın kirişlerde ulaşılan bu süneklik oranlarının oldukça yeterli olduğu anlaşılmaktadır.
- Tüm elemanlarda hedeflenen teorik tasıma güçlerine ulaşılmıştır. Alt yüzüne delikli çelik levha yapıştırılmış betonarme kirişlerin tasıma gücü hesaplarının betonarmede monolitik kirişler için uygulanan tasıma gücü yöntemi ile hesaplanabileceği görülmüştür.

- Tüm elemanlarda yeterli bir eğilme rijitliği elde edilmiştir. Beklendiği gibi kalın levhalı elemanlarda daha büyük rijitlikler elde edilmiştir.
- Tüm elemanlarda yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmış olmasına rağmen, süneklik kapasitesini garanti altına almak için levhaların alt veya yan yüzlerden bulonlarla desteklenmesinin oldukça faydalı olduğu ve bunun süneklik kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Özellikle kalın levhalı elemanlarda bulonlarla desteklenmiş elemanların, bulonsuz elemanlara göre çok daha fazla sünek davrandıkları görülmüştür. Bulon uygulamalarında dübel çapı (bulon yuvası) ile levhadaki delik çapı eşit olmalı ve dübel en fazla levha yüzeyine kadar çakılmalıdır. Bulonlar 8,8 kalitesindeki çelikten olmalı ve bulonlara eksenel yöndeki akma dayanımının yarısı kadar art germe kuvveti verilmelidir. Bu amaçla uygun tork anahtarları kullanılabilir.
- Alt yüze yapıştırılan levhanın yan yüz levhaları ile desteklenmesinin de süneklik kapasitesini arttırmada etkili olabileceği görülmüştür. Ancak kullanılan yan yüz levha sayısı ile derz sayı ve aralığının çok önemli olduğu ve davranışı olumlu veya olumsuz yönlerde etkileyebileceği gözlenmiştir. Beklenenin tersine kiriş yan yüzünde boydan boya yan yüz levhası kullanılması süneklik kapasitesini önemli ölçüde düşürmüştür. Bu elemanlarda levhada oluşan uzama deformasyonları derz civarlarında yoğunlaşmış ve buna bağlı olarak levhalar erkenden koparak kirişler gevrek bir şekilde kırılmıştır. Süneklik kapasitesini arttırmak için yan yüz levhalarında oluşturulan derz sayısının arttırılması da ancak bir ölçüde başarılı olmuştur. Yan yüz levhalarının kullanılması durumunda levhaların sadece uçlarda oluşturulması ve mutlaka bulonlarla desteklenmesi önerilmektedir. Bu durumda yan yüz levhalarında da epoksi kullanılmamış olsa bile iyi bir davranış elde edilebilmiştir. Yan yüz levha boylarının en az kiriş yüksekliği kadar, en fazla da serbest açıklığın 1/4'ü kadar yapılması önerilmektedir. Bu elemanların her bir ucunda kullanılacak bulon sayısının, kesmeye çalışan dübel alanı (bulon + bulon yuvası alanı) ile alt yüze yapıştırılan levha alanının eşitlenerek bulunması önerilmektedir.

- Güçlendirme işleminde kullanılacak delikli çelik levhaların hatasız zımbalanmış olması gerekmektedir. Bazı deney elemanlarında hatalı zımbalanmış elemanlar kullanıldığı için levhalar erkenden kopmuş ve kiriş gevrek bir şekilde kırılmıştır.

Arslan, G. ve Arkadaşları [7], İnceledikleri çalışmada sürekli çelik levhalarla yapıştırılmış betonarme kirişlerin eğilmeye karşı dayanımlarını deneysel olarak incelemiştir. Yedisi referans ve diğer yedisi güçlendirilmiş olan toplam on dört adet betonarme kirişi deneye tabi tutmuşlardır. Tüm deney elemanları 100x160x1970 mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Deneyde kalınlığı 5 mm, genişliği 50 mm olan farklı uzunluklarda çelik levhalar kullanılmıştır. Betonarme kirişler çekme bölgesinde 2Ø12, basınç bölgesine 2Ø8 ve sargı donatısı olarak Ø6/160 mm aralıkta donatılar kullanılarak imal edilmiştir. Referans kirişler onarılmış kirişlerin yük taşıma ve deplasman davranışlarını karşılaştırabilmek için monotonik olarak yüklenmişlerdir. Hasar görmüş kirişler değişik düzenleme ve boyutlarda çelik levhalar kullanılarak onarılmıştır. Hasar görmüş kirişlere aşağıda belirtildiği şekilde levha düzenlemeleri yapılarak onarım işlemi uygulanmıştır.

- S1 kirişleri: alt yüzden 5x50x1000 mm, yan yüzden 5x50x1000 mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S2 kirişleri: sadece alt yüzden 5x50x1000 mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S3 kirişleri: alt yüzden 5x50x1500 mm, yan yüzden 5x50x1000 mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S4 kirişleri: alt yüzden 5x50x1000 mm, yan yüzden 5x50x500 mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir. Yan yüz levhaları kirişin orta kısmına ve üst tarafa gelecek şekilde her iki gövde yüzüne yapıştırılmıştır.

Referans kirişler göçme olmadan önce yeterli miktarda yük taşıma kapasitelerine ulaşmışlardır ve büyük deplasmanlar yaparak yüksek sünek bir davranış göstermişlerdir. Çelik levhalar ile onarılan kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde de artışlar görülmüştür. Çelik levha uzunluklarının kirişin eğilmeye karşı davranışı

yönünden çok önemli olduğu ve zamansız ani göçmelerin levhaların uçlardan sıyrılmasından dolayı olduğu gözlenmiştir.. Yan yüz levhalarının alt yüz levhalarıyla aynı uzunlukta olduğu elemanların daha iyi davranış sergilediği ve yan yüz levhalarının alt yüz levha uçlarında oluşan çatlakların uzamasını engellediği belirtilmektedir. Deneysel sonuçlara dayanarak, çelik levha yapıştırılmış kirişlerin maksimum kesme kapasitelerinin klasik denklemlerle hesaplanabileceği savunulmuştur.

Oehlers, D.J. ve Arkadaşları [8], sürekli betonarme kirişlerde çelik veya FRP levhaların kirişin alt ya da yan yüzlerine yapıştırmanın sıyrılma göçmesi ve kesit sünekliği üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma kapsamında levhaların betonarme yüzeyden sıyrılma mekanizmalarını inceleyebilmek amacıyla beş adet 2400 mm iki eşit açıklıklı betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişler kritik diyagonal çatlakların oluşmayacağı ve eğilme davranışlarının incelenebileceği biçimde tasarlanmışlardır. Deneyde kullanılan çelik levhalar 3 mm kalınlığında FRP levhalar ise 1,2 mm kalınlığındadır. Betonarme kirişlerden bir tanesi yalın halde karşılaştırma kirişi olarak deneye tabi tutulmuştur. Deney elemanlarından iki tanesi açıklıklarda alt yüzeye, orta mesnette üst yüzeye gelecek şekilde 100 mm genişliğinde çelik levha veya 50 mm genişliğinde FRP levha yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Diğer iki kiriş ise levha genişliği 80 mm olacak şekilde çelik veya FRP levhaların kiriş yan yüzlerine yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonrasında aşağıda belirtilen davranışlar gözlenmiştir.

- Levhaların eğilme momentlerinin sıfırlandığı bölgeye kadar uzatılması ile kirişlerde levha uçlarındaki sıyrılmalar önlenabilmektedir.
- Büyük kesme kuvvetlerinin olduğu yerlerde özellikle levha uçlarının geldiği kısımlarda kritik diyagonal çatlaklar gözlenebilmektedir.
- Levha ortasındaki betondan sıyrılmalar farklı levha yerleşimleri ile önlenabilmektedir. Bu sıyrılma ana sıyrılma mekanizması olup levhalı kirişlerin eğilme dayanımı ve sünekliğini kontrol altında tutmaktadır.

- Bazı durumlarda yan yüzüne FRP yapıştırılmış kirişler, çekme yüzüne FRP yapıştırılmış kirişlerden daha iyi dayanım ve süneklik göstermiştir. FRP yan yüzlü kirişler çelik levha yan yüzlü kirişlerle yaklaşık aynı dayanım ve sünekliği göstermişlerdir.

Baluch, M.H. ve Arkadaşları [9], çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin farklı göçme modlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada kirişler; eğilme kapasitesi kesme kapasitesinden az olan eğilme grubu kirişler ve kesme kapasitesi eğilme kapasitesinden az olan kesme grubu kirişler olarak iki gruba ayrılmışlardır. Bu her iki grup için çelik levha kalınlığı, levha kesme mesafesi (levha ucu-mesnet arası mesafe), etriye aralığı deney parametreleri olarak göz önüne alınmıştır.

Çalışmada 28 adet 150x150x1250 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli betonarme kirişler kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak eğilme grubu kirişler için 2Ø10, keme grubu kirişler için 3Ø12 donatı kullanılmıştır. Tüm kirişlerde 2Ø6 basınç donatısı kullanılmıştır. Etriye olarak Ø6 donatı kullanılmıştır. Etriye aralıkları eğilme grubu kirişlerde 30/60/120 mm , kesme grubu kirişlerde ise 120/200 mm aralıklarında kullanılmıştır. Çelik levha kalınlıkları 1,2,3 mm olarak değişmektedir. Levha kesme mesafeleri ise 50,100,150 mm olarak değişmektedir.

Tüm kirişlere 1200 mm açıklıkta iki noktalı tekil yükleme uygulanmıştır. Eğilme grubu kirişlere 10 mm, kesme grubu kirişlere 5 mm orta nokta deplasmanı olacak şekilde ön yükleme yapılmıştır. Ön yükleme yapılarak hasara uğramış kirişlere farklı kalınlık ve uzunluklarda çelik levhalar yapıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre;

- Çelik levha yapıştırılmış kirişlerde eğilme, sıyrılma/kopma ve diyagonal kesme olarak üç farklı göçme modu gözlenmiştir. Eğilme grubu kirişlerde levha sıyrılması/ kopması veya eğilme göçme modları gözlenmiştir. Kesme grubu kirişlerde diyagonal çekmeden dolayı göçme oluşmuştur.

- Kesme grubu kirişlerde ilk çatlaklar yüksek çekme ve kesme gerilmelerinden dolayı levha uçlarında başlamıştır. Bu çatlaklar çekme donatısının fazla olması ve levhanın sıyrılmasından dolayı fazla artmamıştır.
- Levha kesme mesafesinin sıyrılma göçmesi mekanizmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Fakat, diyagonal çekme göçmesinde levha kesme mesafesinin değişmesinin pek etkisi olmamıştır. Levha sıyrılması ve diyagonal çekme göçmeleri gevrek birer kırılma göçmesi modudur. Bu tarz göçmelere tasarım aşamasında izin verilmemesi uyarısında bulunmaktadır. Kirişlerde yük taşıma kapasitesinin arttırılması ve sünek bir davranış görülmesi için levha kalınlığı ve levha kesme uzunluğu dikkatli bir şekilde hesaplanmalıdır.

Altın, S. ve Arkadaşları [10], dış yüzeylerine çelik levha yapıştırılmış kesme yönünden yetersiz olan betonarme kirişlerin süneklik davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında onbir adet genişliği 120 mm, yüksekliği 360 mm, tabla genişliği 360 mm, tabla yüksekliği 75mm ve boyu 4000 mm olan T kesitli betonarme elemanlar test edilmişlerdir. Tüm deney elemanlarında 3Ø20 çekme donatısı, 2Ø8 basınç donatısı kullanılmıştır. Deney elemanlarından iki tanesi kontrol kirişi olarak test edilmiştir. Kontrol kirişinin bir tanesinde Ø6/75 mm aralıkta etriye düzenlemesi yapılmıştır. Diğer kontrol kirişi ve güçlendirme kirişlerinde Ø6/300 mm aralıklarda etriye düzenlemesi yapılmıştır. Dokuz güçlendirme kirişi üçer grup halinde değişik düzenlemelerde levhalar kirişlerin yan yüzlerine yapıştırılarak test edilmiştir. Deneylerle ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Değişik levha düzenlemeleri ile güçlendirilen tüm kirişlerde dayanım, rijitlik ve süneklikler artmıştır.
- Güçlendirilmiş deney elemanları kontrol kirişi ile aynı akma özelliğini göstermişlerdir. Tüm elemanlar yaklaşık olarak aynı yük ve deplasman değerlerinde akmışlardır.
- Çelik levhaların tipi ve düzenlenme şekli kirişlerin sünek davranışını etkilemiştir. Çelik levha şeritler arasındaki boşluklar azaldığında sünekliğin arttığı gözlenmiştir. Kesme bölgelerinde levha yapıştırılan alan arttırıldığında kesme çatlaklarının

önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. L biçimi çelik şerit levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerde en düşük süneklik oranları gözlenmiştir.

- Tüm kesme açıklığında tek bir parça olarak çelik levha kullanmak yerine parçalı halde levhaları yapıştırmak daha iyi sonuç vermektedir.

Oh, B.H. ve Arkadaşları [11], Çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla birçok güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Deneylerde levha kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı ve kesme açıklığı/derinlik oranı değişken olarak kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre;

- Çelik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerin ani göçme mekanizmasının levha sıyrılması olduğunu göstermiştir.
- Deney yük kapasiteleri teorik olarak hesaplanandan daha az çıkmıştır.
- Kesme açıklığı/derinlik oranı azaldıkça güçlendirilmiş kirişlerde kesme çatlakları daha baskın olarak görülmektedir.
- Yapıştırıcı kalınlığının belli miktarda artırılmasının levhanın sıyrılmasını geciktirdiğinden dolayı yük taşıma kapasitesinde artışa neden olduğu gözlenmiştir.
- Güçlendirilmiş kirişler, aynı yorulma yükü seviyelerinde, yalın kirişe göre daha fazla yorulma direnci göstermiştir.
- Aynı yük çevrim sayılarında, güçlendirilmiş kirişlerin deformasyon dirençlerindeki artış yalın kirişe göre daha fazla olmaktadır.

Baglin, P.S. ve Arkadaşları [12], çelik levhaların kiriş gövdesine yapıştırılarak veya bulonlanarak kesmeye karşı güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Yedi tanesi güçlendirilmek üzere toplam dokuz adet kiriş test edilmiştir. Deney elamanları 175x400x2370 mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Kirişlerde çekme donatısı olarak 2Ø32, basınç donatısı olarak 2Ø16 ve Ø6/90 mm aralıklarda sargı donatısı kullanılmıştır. Deneyde genişliği 360 mm, boyu 2330 mm ve kalınlığı 2/4/6 mm olarak değişen çelik levhalar kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin dört tanesine levhalar yapıştırılmış, diğer üç tanesine ise bulonlanmıştır. Yapılan çalışmalardan şu bilgilere ulaşılmıştır;

- Büyük kesme kuvvetlerinde levhalar taşıma gücünü arttırmaktadır.
- İnce levhalar($t=2$ mm) akma sahanlığının artmasını ve kesme kapasitesinde artmalara neden olmaktadır. Kalın levhalar ve ek şeritler eğilme kapasitesinde önemli artışlara neden olmuştur.
- Bulonlu düzenlemeler kesitin maksimum kapasitesine ulaşmasını ve levhalardan tam olarak yararlanmayı sağlamıştır. Araştırmalar uygulamada bulonlu sistemin uygun olabileceğini göstermiştir.
- Epoksi ile yapıştırılmış levhalar çatlakları iyi derece kontrol etmektedir. Fakat, levhanın yüzeyden ayrılması ve ani göçmeler gözlenebilmektedir. Bu yüzden ek mekanik ankrajların kullanılması da gerekmektedir.
- Bulonlu sistem akmanın oluşabileceği çok katlı levha düzenlemelerine izin vermektedir.
- Bulon ve epoksinin birlikte kullanıldığı düzenlemelerin daha iyi sonuç verebileceği kanaatine varılmıştır.

Barnes, R.C. ve Arkadaşları [13], betonarme kirişlerin yan yüzlerine çelik levha yapıştırılarak kesmeye karşı güçlendirilmesini incelemişlerdir. Dış yüzeylerine levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kirişler BS38110 standardına göre tasarlanmış etriyeler ile donatılmış kirişlerle karşılaştırılmıştır. Deneyde onbeş adet 155x250 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli, onbeş adet 160x230 mm gövde genişliği ve derinliğinde, 400x75 mm tabla genişliği ve yüksekliğinde T kesitli betonarme kirişler deneye tabi tutulmuşlardır. Deneylerde kesme açıklığı/derinlik oranı 4, 1,8 ve 0,8 olan üç alternatif durum göz önünde bulundurulmuştur. Kiriş gövdesini her iki yüzüne gövde derinliği ve kesme açıklığı boyunca 3 mm kalınlığında çelik levhalar yapıştırılmıştır.

- Dikdörtgen kesitli tüm kiriş tiplerinde, çelik levha yapıştırılması kirişlerin kesme kapasitelerinde artışa neden olmuştur. Levha yapıştırılan kirişlerdeki göçme yükü tahmin edilenden daha fazla olmuştur.

- Levhalar çatlakların açılmasını ve sakıncalı göçme durumlarını engellemektedir. Kesme çatlaklarının etrafındaki şekil değiştirmeler tahmin edildiği biçimde gelişmiştir.
- T kesitli kirişlerde de çelik levhalar kirişlerin kesme kapasitelerini arttırmıştır. Levha derinliği fazla olan T kirişler daha kısa olanlara göre daha başarılı olmuştur.

Mohamed Ali, M.S. ve Arkadaşları [14], çelik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerin tasarım kurallarının FRP ile güçlendirilmiş kirişlere uygulanabilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda kayma ve eğilmeden dolayı oluşan sıyrılma mekanizmalarını FRP ve çelik levhalar için karşılaştırmışlardır. Deneylerde eğilmeden dolayı oluşabilecek sıyrılmayı gözlemleyebilmek amacıyla sekiz adet, kesmeden dolayı oluşabilecek sıyrılmayı gözlemleyebilmek için ise beş adet betonarme kiriş test edilmiştir. Tüm kirişler 150x250x2800 mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir.

Eğilme yönünden incelenecek kirişlerden beş tanesine 150 mm genişliğinde ve 600 mm uzunluğunda çelik, CFRP ve GFRP levhalar çekme yüzüne yapıştırılmıştır. Diğer üç kirişe ise farklı kalınlık ve boylarda yan ve alt yüzlere çelik, CFRP ve GFRP levhalar yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Kesme yönünden incelenecek kirişlerden bir tanesi yalın halde, diğer dört tanesi farklı boy ve kalınlıklarda çelik, CFRP ve GFRP levhaların yan yüzlere yapıştırılması ile güçlendirilmiştir.

Çekme yüzüne ve yan yüzlere çelik levha veya FRP malzemeleri yapıştırılarak güçlendirilmiş kirişlerde eğilme sıyrılma mekanizması aynı şekilde olmuştur. Fakat, her bir malzemenin eğilme dirençlerinde farklılıklar gözlenmiştir. FRP levhaların sıyrılmaya karşı eğilme dirençleri çelik levhalardaki gibi hesaplanabileceği deneysel verilere dayanılarak ortaya konmuştur. Kesme yönünden incelenen kirişlerde FRP ve çelik levhaların kesme sıyrılma mekanizmalarının nitelik olarak aynı olduğu görülmüştür. Fakat, aynı enkesit alanına sahip malzemeler için kesme sıyrılma direncinin elastisite modülü düşük olan malzemede daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Adhikary, B.B. ve Arkadaşları [15], kiriş gövdesine çelik levhalar yapıştırarak kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Toplam on iki adet deney 150x200x2600 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli kirişler test edilmiştir. İki noktalı tekil yükleme yapılarak tüm elemanlar test edilmiştir. Deney elemanları iki seriden oluşmaktadır. Çekme donatısı olarak A serisi kirişlerde 2Ø22, B serisi kirişlerde 3Ø22 kullanılmıştır. Tüm kirişlerde 2Ø13 basınç donatısı kullanılmıştır. Sadece kesme davranışını inceleyebilmek için güçlendirilmiş elemanlarda sargı donatısı kullanılmamıştır. Güçlendirilecek kirişlerin her iki gövde yüzüne çelik levhalar yapıştırılmıştır. Kullanılan çelik levhalar 2160 mm boyunda, 2/3/4,5 mm kalınlıklarında ve değişik genişliklerdedir. Yapılan deneysel çalışmalara ek olarak nümerik çalışmalarda yapılmıştır.

Kontrol kirişine göre, çelik levhalar yapıştırıldıkları kirişlerin maksimum kesme dayanımlarının, eğilme dayanımlarını ve rijitliklerini arttırmıştır. Uygulanan yöntem kirişlerin eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmesinde son derece etkili olmuştur. Levha genişliklerinin artması ile maksimum kesme kapasitelerinin arttığı gözlenmiştir. 4,5 mm kalınlığında ve 100 mm genişliğindeki levhalar kirişin kesme dayanımını %84 oranında arttırmıştır. Buna rağmen, levha kalınlığı 2,3 mm ve genişliği 150 mm olan elemanlarda eğilme göçmesi oluşmuştur. Bu durum, kirişin kesme dayanımının eğilme dayanımından fazla olduğunu göstermektedir. Bu yüzden uygulanabilecek maksimum levha genişliği ve kalınlıkları, kesme dayanımlarının maksimum olacağı ve eğilme rijitliklerinin de arttırılabileceği biçimde olması gerektiği savunulmuştur.

Su, R.K.L. ve Arkadaşları [16], betonarme bağ kirişli perde duvarlarının bağ kirişlerinin çelik levhalar ile güçlendirilmesini deneysel ve nümerik çalışmalarla incelemişlerdir. Deneyde biri referans olmak üzere toplam üç adet birebir ölçekli elemanlar kullanılmıştır. 300 mm genişliğinde ve 1250 mm boyundaki çelik levhalar kiriş gövdesinin her iki yüzüne bulonlanmıştır. Bu kirişlerden bir tanesine 3 mm kalınlığında çelik levhalar uçlardan ve ortalarından bulonlanarak tutturulmuş, diğerine ise 6 mm kalınlığında çelik levhalar yalnız uçlardan bulonlanarak tutturulmuştur. Deneyde 8.8 kalitesinde Ø20 bulonlar kullanılmıştır. Özel hazırlanmış perde bağ

kiriş düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiş ve gözlenen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Tersinir yükler altında bulonlu çelik levhalar bağ kirişlerinin dayanım ve deformasyon kapasitelerini arttırmaktadır.
- Bağ kirişin maksimum yüke ulaşmasından sonra bulonlu çelik levha kesme kuvvetlerinin büyük bir kısmını tutmaktadır.
- Levha akmadan önce levhada eksenel çekme oluşmakta, aktıktan sonra eksenel kuvvetler her bir yarım yük çevriminde basınçtan çekmeye ve daha sonra tekrar çekmeye dönmektedir. Levhada burkulmalarda gözlenebilmekte ve buna karşı önlem alınması gerekmektedir.

Swamy, R.N. ve Arkadaşları [17], hasar görmüş betonarme kirişlerin 1,5 mm kalınlıktaki çelik levhalar ile yükü alınmadan onarılmasını incelemişlerdir. Çalışmada 9 adet 155x255x2500 mm ebatlarında dikdörtgen kesitli betonarme kirişleri kullanmışlardır. Mesnet açıklığı 2300 mm olan üç noktalı yükleme düzeneği kullanmışlardır. Çalışmada yük-deplasman, moment-eğrilik, beton donatı ve çelik levhanın birim şekil değiştirmelerini incelemişlerdir. Deney elemanlarından iki adeti kontrol kirişi olarak yalın halde test edilmiştir. Diğer bir kiriş ise onarılacak elemanlarla karşılaştırılmak üzere alt yüzeyine 1,5 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak test edilmiştir. Kalan kirişlerden üç tanesi taşıma gücüne ulaşacak şekilde yüklenip yükü boşaltıldıktan sonra 1,5 mm kalınlıktaki levha yapıştırılmıştır. Diğer üç kiriş de taşıma gücüne kadar yüklenmiş, fakat bunlara üzerindeki yük alınmadan 1,5 mm kalınlıktaki levha yapıştırılmıştır. Deneylerde aşağıdakiler gözlenmiştir.

- Tüm kirişler maksimum moment bölgesinde betonun ezilmesi, donatı ve çelik plakanın akması ile eğilme kapasitelerine ulaşmıştır.
- Planlanan taşıma gücü, deplasman ve eğrilik denerlerine ulaşılmıştır.
- Yüklü onarım ve yüksüz onarımlarda rijitlik artmıştır.
- Tüm kirişler kontrol kirişleri ile benzer süneklik göstermiştir.

- Yüklü ve yüksüz onarımlardaki levha şekil değiştirmeleri, hasar verilmemiş kirişteki levha şekil değiştirmesi ile özdeştir. Bu sonuç levha ile onarımın ağır hasar görmüş kirişlerde etkili bir sonuç verdiğini göstermektedir.
- Kiriş derinliği boyunca şekil değiştirmeler lineer bir davranış göstermektedir. Bu sonuç levha ve kiriş arasında tam bir kompozit davranışın sağlandığını göstermiştir. Sonuç olarak bu yöntemin hasar görmüş kirişlerde rijitlik ve dayanım açısından etkili bir yöntem olduğu savunulmuştur.

Hussain, M. ve Arkadaşları [18], hasar görmüş kirişlerin çekme yüzüne farklı kalınlıktaki çelik levhaların yapıştırılması ile eğilmeye karşı davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında sekiz adet 150x150x1250 mm ebatlarında dikkörtgen kesitli betonarme kirişleri deneye tabi tutmuşlardır. Akma gerilmesi 269 MPa olan 100x1 mm, 100x1,5 mm, 100x2 mm ve 100x3 mm ebatlarında boyu 1100 mm olan levhaları kullanmışlardır. Kiriş orta noktasında yükün uygulandığı noktada deplasman ölçümleri yapılmıştır. Deney elemanları 1200 mm aralıkta mesnetlenmiş olup üç noktalı tekil yükleme maruz bırakılmıştır. Kirişlerin tamamı taşıma kapasitelerinin %85'i oranında (orta nokta deplasmanı 10 mm) yüklenmiştir. Kirişlerin üzerindeki yük kaldırılarak güçlendirme işlemi yapılmıştır. Güçlendirme metodu, alt yüzden farklı kalınlıklarda çelik levha yapıştırmayı içermektedir. Her bir kalınlık için biri uçlarından bulonlanan iki özdeş kiriş test edilmiştir. Epoksi uygulamasından önce kiriş alt yüzeyinin pürüzleri alınarak toz kalmayacak şekilde yıkanmıştır. Ayrıca, çelik plakalardaki paslı kısımlar temizlenerek plaka yüzeyi pürüzlendirilmiştir. Deney sonuçlarında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Plaka kalınlığının, göçme mekanizmasını gevrek olarak değiştirdiğini göstermektedir. Bu durum araştırmacılar tarafından önceden planlanan kesme dayanımına uygun bir davranış değildir.
- Uç ankrajlar ince levha ile güçlendirilmiş kirişlerde sünekliği arttırmıştır. Fakat plaka kalınlaştıkça süneklik oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

- Tahmin edilen taşıma gücüne ince levhalarla ($t=1-1,5$ mm) güçlendirilen kirişlerde ulaşılmıştır. Kalın levhalarla ($t=2-3$ mm) güçlendirilmiş kirişlerde maksimum kapasiteye ulaşamamış, levha kirişten sıyrılmıştır.
- Plaka uç bulonlarının taşıma gücüne herhangi bir katkısı olmamıştır. Ayrıca bu kirişlerde ani göçmeler görülmüştür.

3.3. Karbon Lifli Kirişler Yapıştırılarak Kiriş Onarım ve Güçlendirilmesi

Ritchie, P.A. ve Arkadaşları [19], FRP kullanılarak yapılan dıştan takviyenin ne derece işlevsel olduğunu görmek için on altı adet yetersiz güçlendirilmiş kirişi test etmişlerdir. CFRP ve GFRP, kirişlerin çekme yüzeylerine epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. İyi bir çekme mukavemetine sahip olması, hafifliği ve korozyona dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı uygulama için FRP tercih edilmiştir. FRP malzemeyle takviye edilmiş kirişin eğilme dayanımını ve rijitliğini hesaplamak üzere analitik bir metot geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, FRP malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerin servis yükü düzeyinde rijitliklerinde %17-99, taşıma güçlerinde ise %47-97 oranında artmalar elde edilmiştir. Analitik olarak hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri birbirleri ile büyük bir uyum içindedir. Deneyler sırasında çoğu kirişte, maksimum moment bölgesinde kırılma meydana gelmemiştir. Kirişlere uygulanan ve maksimum moment alanında kırılma ile sonuçlanan limit yük değerleri, hesaplanan değerler ile en çok %5'lik bir fark göstermiştir.

Sharif, A. ve Arkadaşları [20], önceden yük uygulanmış betonarme kirişlerin, FRP kullanılarak onarımını çalışmışlardır. Betonarme kirişler öncelikle, eğilmede limit yük kapasitesinin %85'ine kadar yüklenmiş ve bunu izleyen aşamada kirişin alt yüzeyine epoksiyle bağlanan FRP ile onarılmıştır. Elyaf kalınlığı, gerilme yığılması içeren kesme ve sıyrılma gerilmelerine bağlı olarak elyaf kesme alanında başlayan erken kırılmayı değerlendirmek üzere değiştirilerek kullanılmıştır. Bu tür kırılmaları önlemek ve sistemde sünek davranışı garantilemek üzere değişik onarım ve ankraj şekilleri uygulanmıştır. Bu çalışmada, takviye edilmiş kirişlerin davranışları yük-yer değiştirme eğrileriyle gösterilmiş ve kırılmanın farklı modları tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar genel olarak onarılmış kirişlerin eğilme dayanımlarının arttığını

göstermektedir. Onarım görmüş kirişlerin sünek davranışları elyaf kalınlığı ile ters orantılıdır. I şeklinde manto elyafın kullanımı uygun bir ankraj sistemi sağlamış ve kalın elyafla onarılmış kirişlerin sünekliğini geliştirmiştir.

Quantrill, R.J. ve Arkadaşları [21], betonarme kirişlerin alt yüzeylerine epoksi kullanarak fiberle güçlendirilmiş elyaf yapıştırmışlar ve bunlarla bir seri deney yürütmüşlerdir. Bu deneylerde, elyaf alanı, elyaf uzunluğu, elyaf malzemesi ve uçlardaki bağlama metodu parametrelerinin değiştirilmesi ile oluşan, farklı deney özelliklerinin sistemin genel davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış ve FRP malzeme ile yapılan güçlendirmenin yapısal avantajları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Takviye edilmiş kirişlerin yük altındaki davranışını belirlemek üzere analitik bir ardışık yaklaşım metodundan yararlanılmış ve deneysel sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elyaf alanının küçültülmesi dayanım ve rijitlikte öngörülen azalmayı beraberinde getirmiş ve uygulanan bir yük için sünekliğin ve elyaf uzamasının artmasına yol açmıştır. Elyaf uzunluğunun sistemin genel tepkisi üzerine düşük bir etkisi olduğu görülmüştür. Cam fiberle güçlendirilmiş elyaf (GFRP) yerine karbon fiberle güçlendirilmiş elyaf (CFRP) kullanarak kaplama yapmak, elemanın kullanılabilirliğini, akma ve limit yüklerini arttırdığı gibi, hem çatlama hem de akma sonrası takviye edilmiş elemanın rijitliğini arttırmakta ve bununla beraber süneklik azaltmaktadır. CFRP, GFRP ile mukayese edildiğinde aynı uzama meydana geldiğinde daha büyük bir değerde kırılmaktadır. Betonda basınca bağlı kırılmalar öncelikle oluştuğundan kaplama malzemesi olarak GFRP kullanıldığında çekme kuvvetlerinin etki ettiği dış kaplamanın kırılması mümkün görünmemektedir. Elyaf ucu bağlamanın erken plaka ayrışmasını önlediği ve limit yükü arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Norris, T. ve Arkadaşları [22], karbon fiberle güçlendirilmiş elyaf (CFRP) ince levhalarla takviye edilmiş hasarlı ya da yeterli dayanıma sahip olmayan betonarme kirişlerin davranışlarına dair deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. CFRP malzeme, eğilme ve kesme dayanımını arttırmak amacıyla kirişlerin çekme yüzeyine ve çevresine epoksi ile yapıştırılmışlardır. Kiriş üzerine bağlanan elyaftaki fiberlerin kiriş eksenine ile yaptıkları açılara (0° , 90° , 45°) göre çeşitli fiber düzenlemeleri

belirlenmiş ve CFRP malzemenin kiriş dayanımına ve rijitliğine olan etkisi, bu fiber düzenlemeleri için ele alınmıştır. On dokuz adet kiriş deneye tabi tutulmuştur. Betonun çatlama dayanımının üzerinde yük uygulanmış ve üç değişik CFRP sistemi ile takviyeleri yapılmıştır. CFRP ile güçlendirme işlemi bittikten sonra kirişlere, kırılma meydana gelene dek yük uygulanmıştır. Sonuç olarak, fiber düzenlemelerine bağlı olarak kırılmanın farklı türleri ve kiriş dayanımında meydana gelen nihai iyileşme gözlemlenmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Elemanı İlkeleri

Bu deneysel çalışmanın amacı çelik levhalar ile onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin rehabilitasyonudur. Bu amaçla biri yalın olmak üzere toplam yedi adet deney elemanı hazırlanmıştır. Bu deney elemanlarının üç tanesi güçlendirilerek, üç tanesi ise hasar sonrasında onarılarak deneye tabi tutulmuştur. Burada aynı zamanda laboratuarda yürütülen diğer çalışmalara paralel olarak deney elemanları seçilmiştir. Bu çalışma ile birlikte yürütülen diğer çalışmalarla ilgili grafik ve bilgiler ekler bölümünde verilmiştir.

Deney elemanlarının hazırlanmasında laboratuvar şartlarının imkan verebileceği mevcut yapılarında kullanılan boyutlar seçilmiştir. Deney programında aşağıdaki amaçlar hedeflenmiştir.

- Delikli/düz çelik levha kullanılarak onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi araştırılmıştır.
- Çelik levha kalınlığının davranış ve dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Levha kalınlığının arttırılmasının süneklik üzerinde hangi oranlarda değişmelere neden olacağı belirlenmeye çalışılmıştır.
- Çelik levhaların kiriş alt yüzüne veya alt yüzüne yapıştırıldıktan sonra U şeklindeki levhaların kirişin yan yüzlerine bulonlanmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır.
- Yan yüzden takviye edilmiş elemanların davranışına levha yüksekliğinin etkisi araştırılmıştır.
- Çelik levhanın alt yüzeyden bulonlanmasının davranış ve dayanım üzerine etkisi araştırılmıştır.
- Çelik levhaların hasarlı kirişlerde kullanılarak onarım yapılmasının ne denli etkin olduğu araştırılmıştır.

4.2. Deney Elemanları

Deney elemanlarının mevcut yapıları temsil edebilmesi açısından ve laboratuvar şartlarının imkan verdiği ölçüde 1/1 ölçekli olarak boyutları belirlenmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 200 x 500 mm boyutlarındaki bir kiriş kesiti model olarak seçilmiştir. Kiriş boyunun ise mevcut yapılarda genellikle karşılaşılan 4,5 m olarak 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. Herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılması ve elemanları eğilme yönünden inceleyebilmek amaçlandığından, tüm kirişler oluşabilecek en büyük kesme zorlamalarını karşılayabilecek şekilde Ø8/100 mm' lik etriyelerle donatılmıştır. Deney elemanlarında 8.8 kalitesinde M12 bulon kullanılmıştır.

Model olarak ele alınmış olan 200x500 mm'lik kiriş için izin verilen maksimum donatı oranı $0.85\rho_b=0.85\times0.016=0.014$ tür. Deney elemanlarında kullanılan çekme donatısı oranı $\rho=0,004915$ olup bu değer minimum donatı oranı olan 0,00235 şartını sağlamaktadır. Deneysel çalışma içerisinde kullanılan en kalın levhada bile $0.85\rho_b$ sınırı aşılmamıştır. Ayrıca Şekil 4.1-Şekil 4.7' de deney elemanlarının detayları sunulmuştur.

Elemanların isimlendirilmesinde kullanılan indisler aşağıda belirtilmiştir.

- S : Çelik (Steel) levhanın olduğunu göstermektedir.
- B : "B" harfi yalın kirişi göstermektedir.
- P : "P" harfi delikli çelik levhayı göstermektedir
- R : "R" harfi onarılmış kirişi göstermektedir
- b : Kullanılan ilk "b" harfi levhanın alt yüzden yapıştırıldığını ikinci "b" harfi levhanın alt yüzden bulonlandığını göstermektedir.

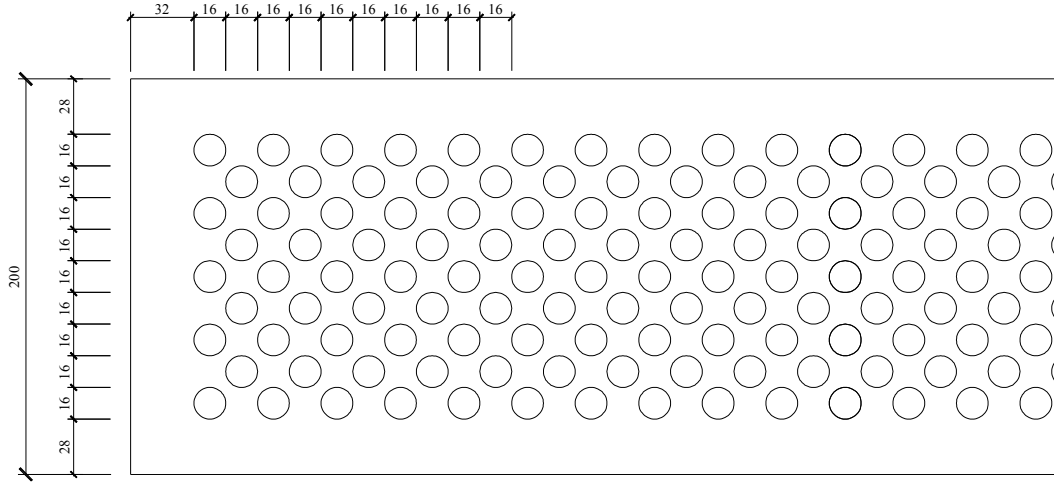
u : Levhanın yan yüz levhalar ile desteklendiğini göstermektedir.

1.5-6 : Sondaki sayılar ise kullanılan levha kalınlığını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Deney elemanları

KİRİŞ ADI	İŞLEM TÜRÜ	LEVHA KALINLIĞI mm	YAN YÜZ LEVHASI
SB	Yalın	-----	-----
Sbb1,5	Güçlendirme	1,5	-----
Sbb3	Güçlendirme	3	-----
Sub6	Güçlendirme	6	6 mm
Rub6	Onarım	6	6 mm
PRb6	Onarım	6	-----
PRub6	Onarım	6	6 mm

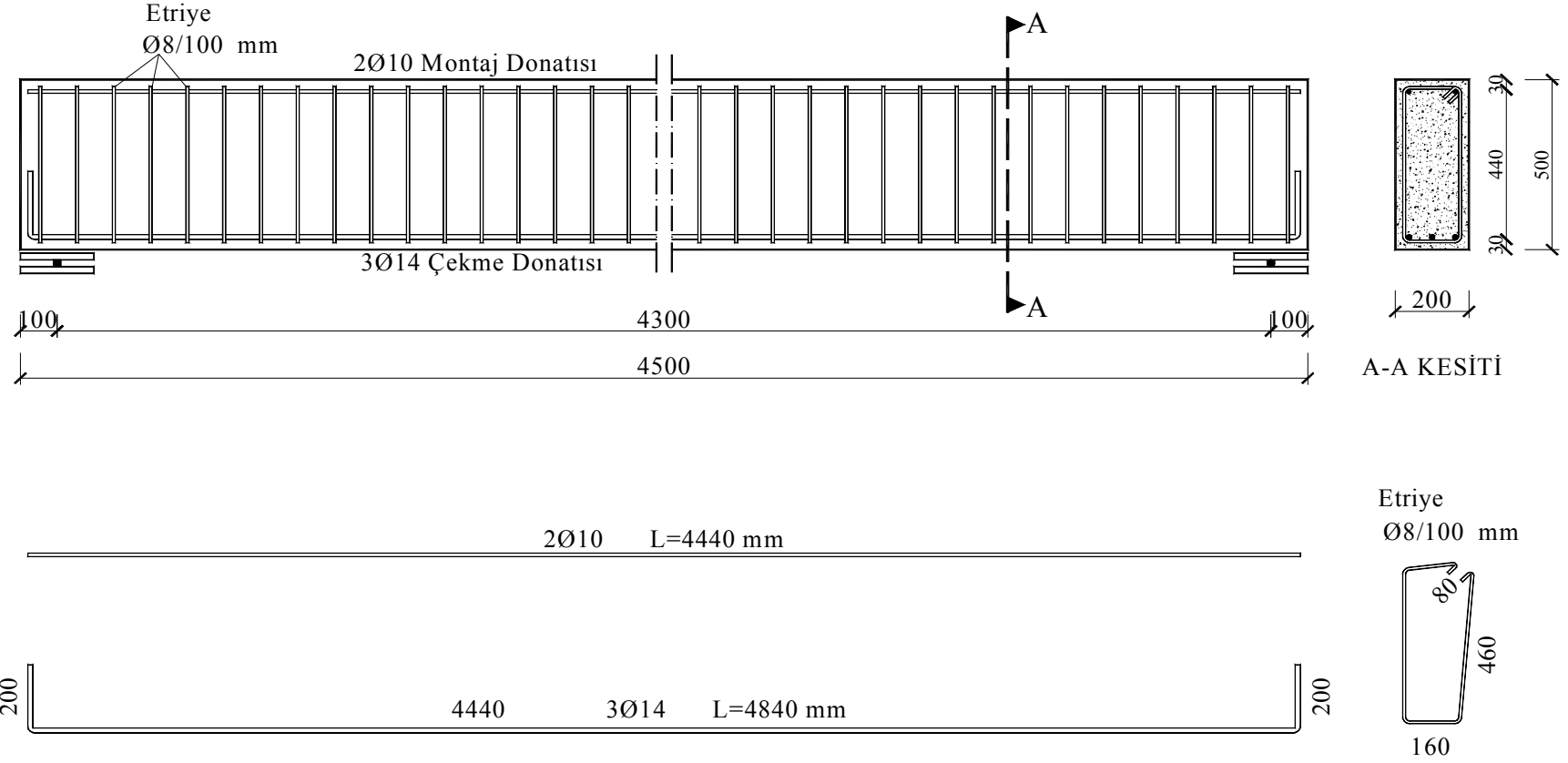
- SB : Referans olarak kullanılacak kiriştir. (Yalın Kiriş)
- Sbb1,5 : Kiriş alt yüzüne epoksi ile 1,5 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak bulonla desteklenmiş deney elemanıdır.
- Sbb3 : Kiriş alt yüzüne epoksi ile 3 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak bulonla desteklenmiş deney elemanıdır.
- Sub6 : Kiriş alt yüzüne epoksi ile 6 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak , yan yüzde ise uç kısımlardan çelik levha ile tutturulmuş ve bulonla desteklenmiş deney elemanıdır.
- Rub6: Hasarlı kirişin alt yüzüne epoksi ile 6 mm kalınlığında düz çelik levha yapıştırılarak , yan yüzde ise uç kısımlardan çelik levha ile tutturulmuş ve bulonla desteklenerek onarılmış deney elemanıdır.
- PRb6: Hasarlı kirişin sadece alt yüzüne epoksi ile 6 mm kalınlığında delikli çelik levhanın yapıştırılmasıyla onarılmış deney elemanıdır.
- PRub6 : Hasarlı kirişin alt yüzüne epoksi ile 6 mm kalınlığında delikli çelik levha yapıştırılarak , yan yüzde ise uç kısımlardan çelik levha ve bulonla desteklenerek onarılmış deney elemanıdır.



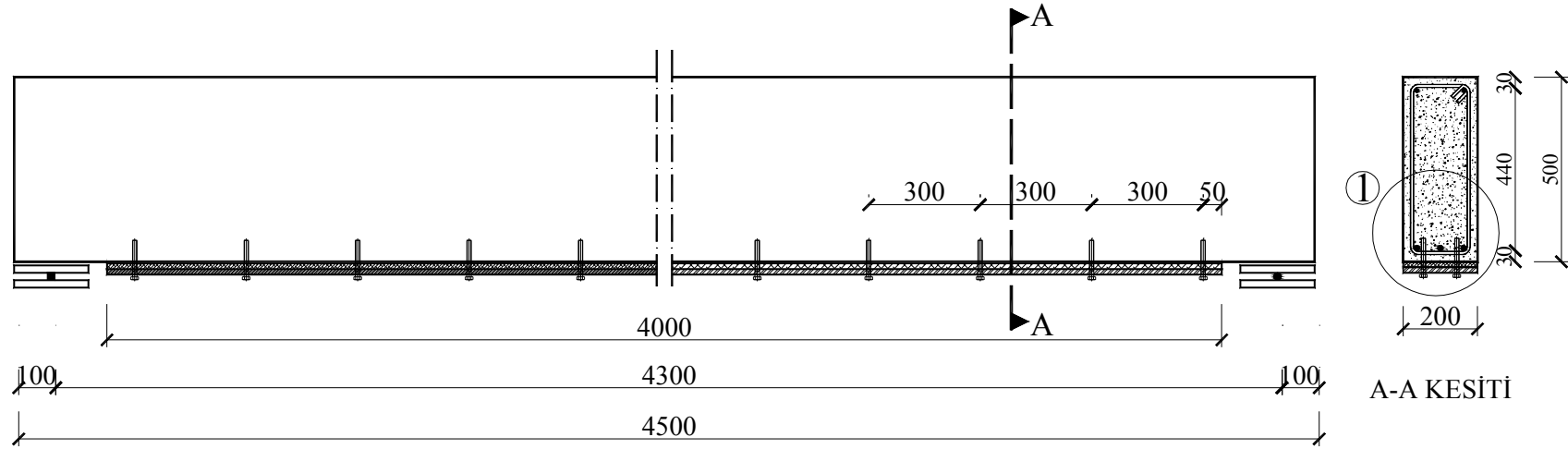
Şekil 4.1. Delikli çelik levha detayı



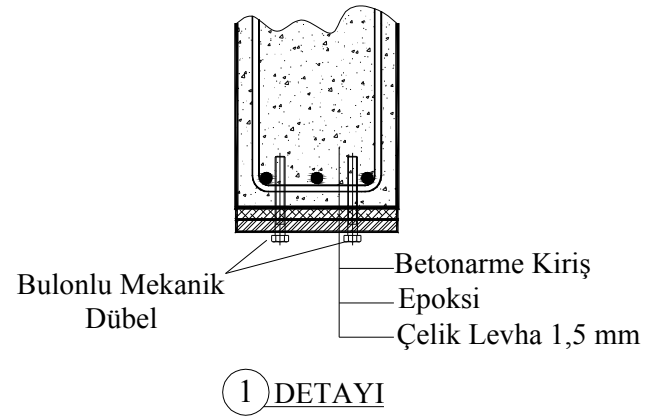
Resim 4.1. Delikli çelik levha ile kiriş güçlendirilmesi



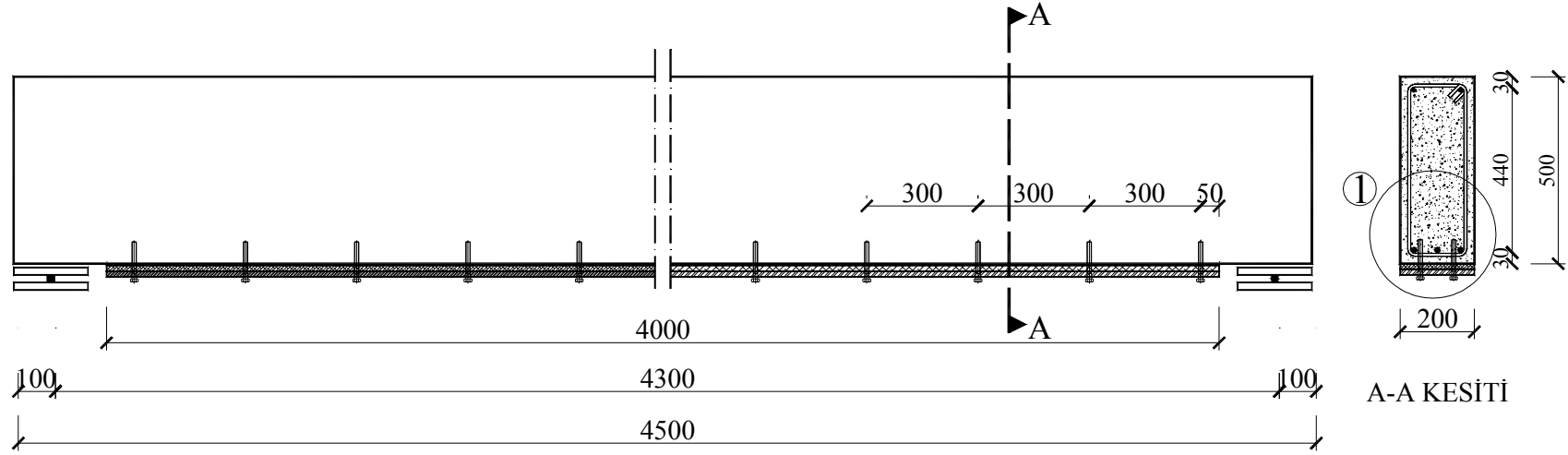
Şekil 4.2. SB referans kiriş (yaln kiriş) detayı



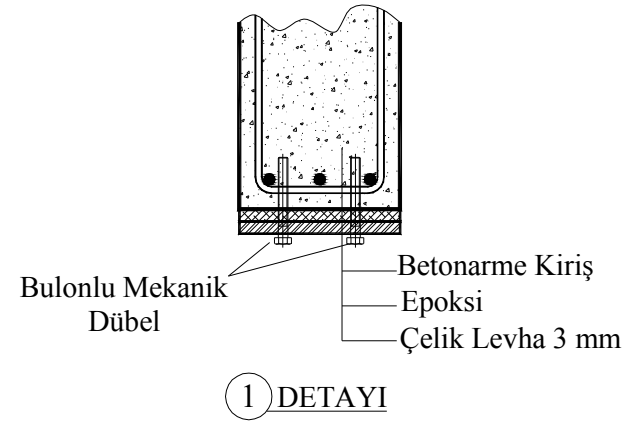
NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.



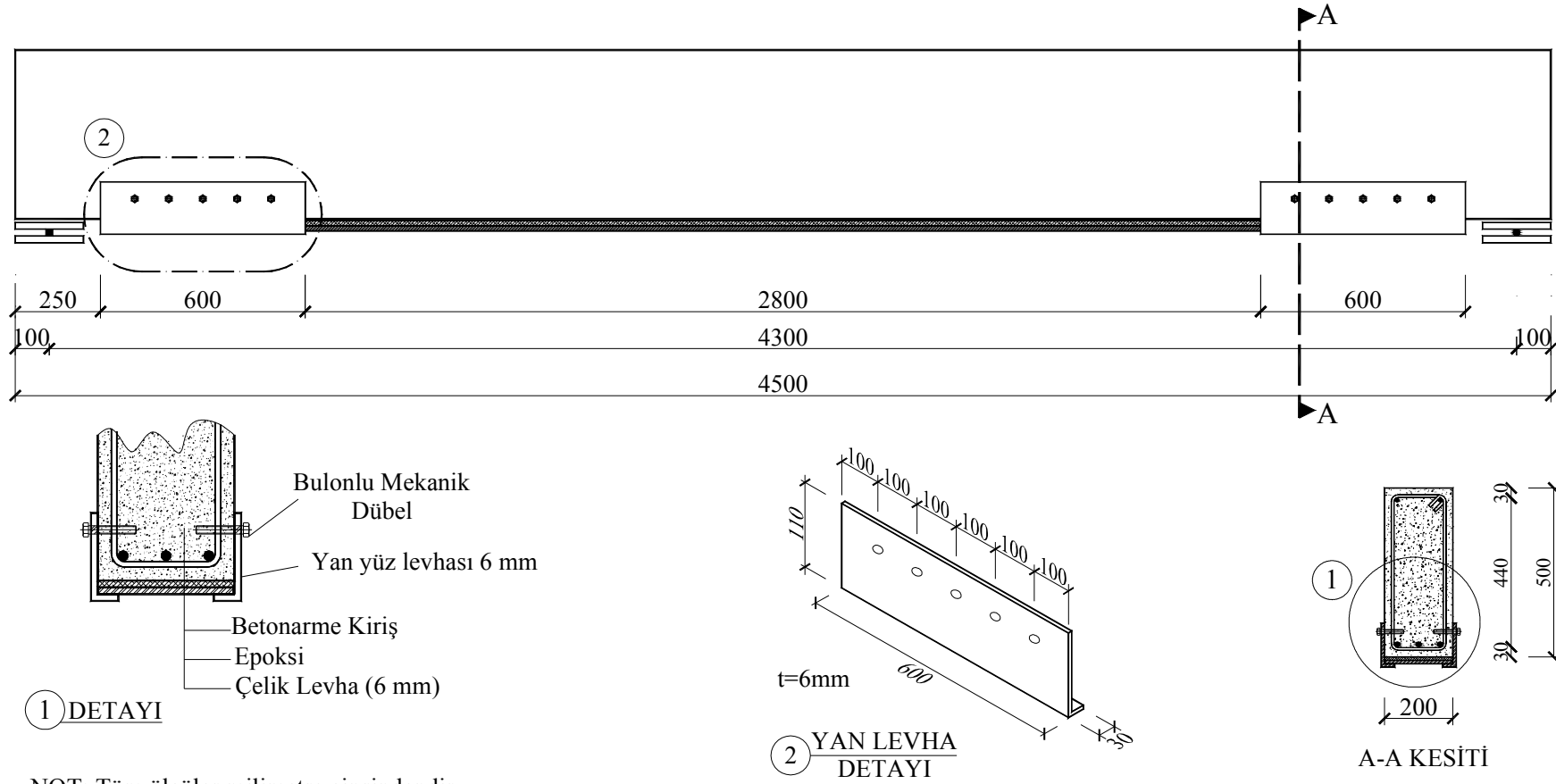
Şekil 4.3. Sbb1,5 deney elemanı



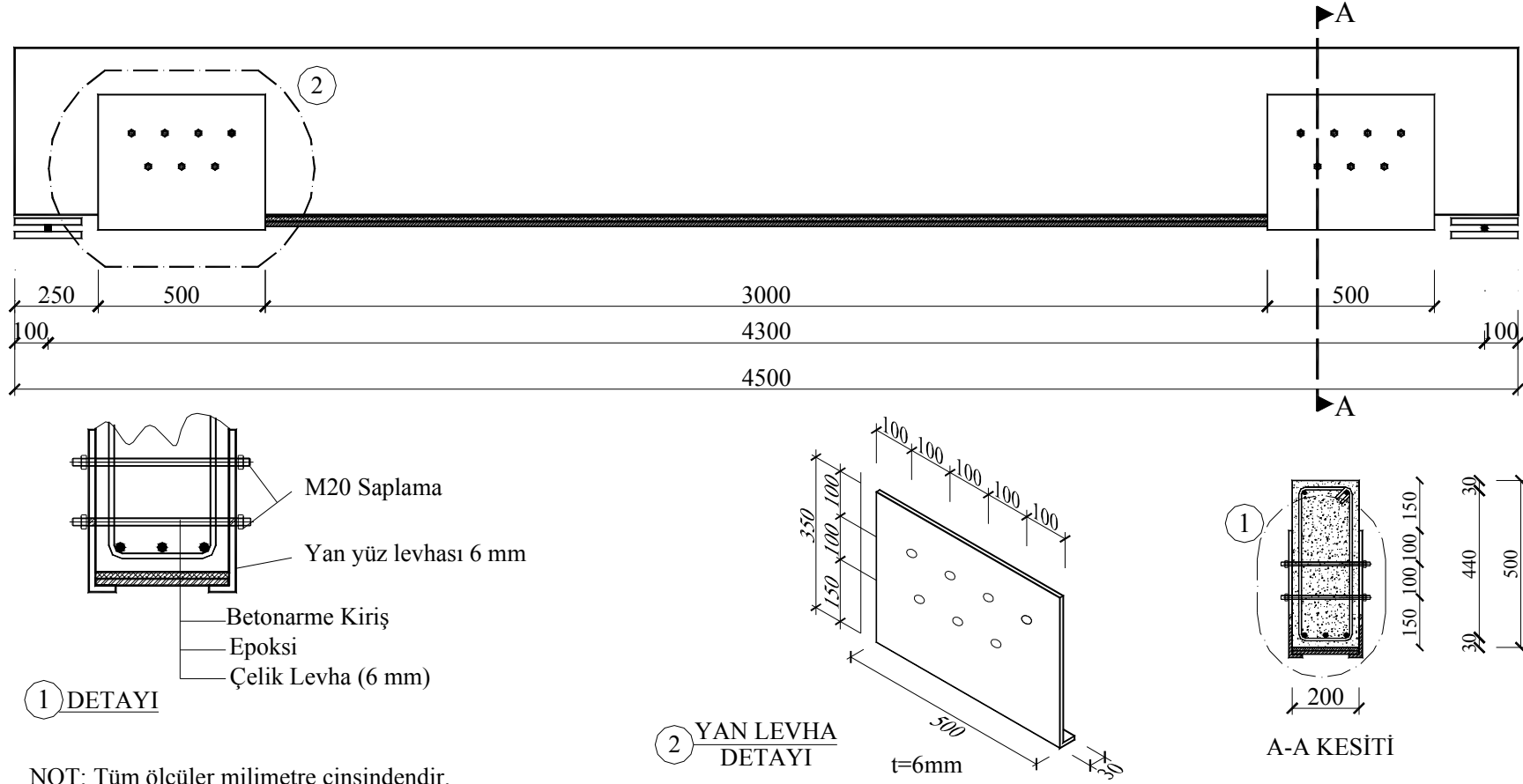
NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.



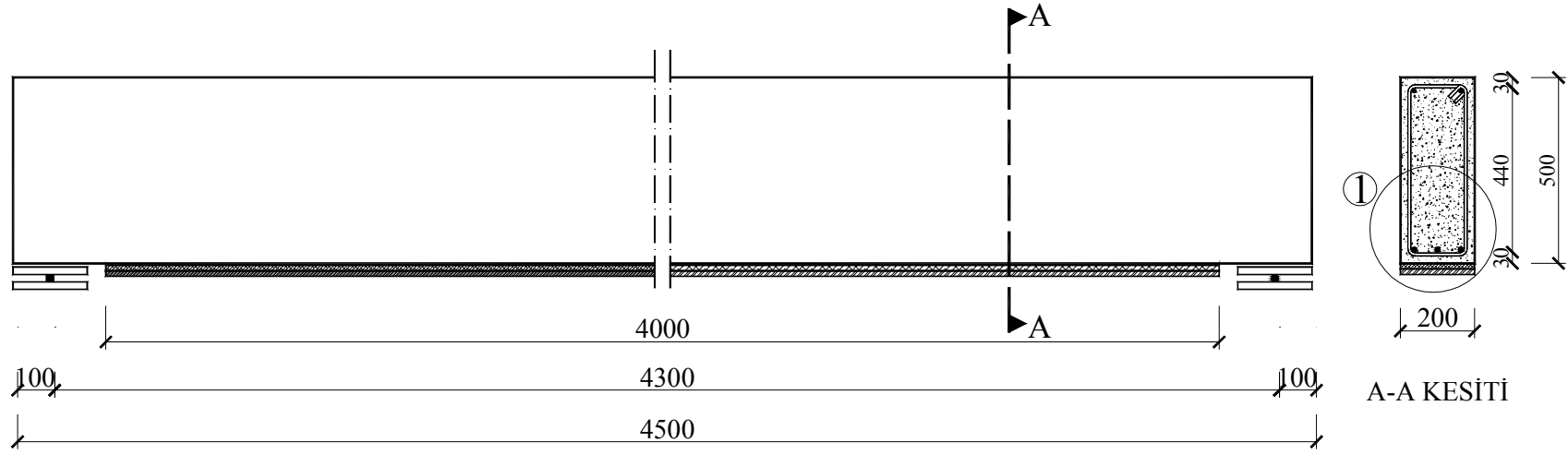
Şekil 4.4. Sbb3 deney elemanı



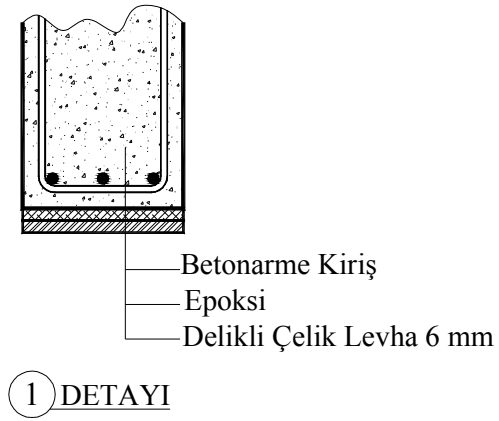
Şekil 4.5. Sub6 deney elemanı



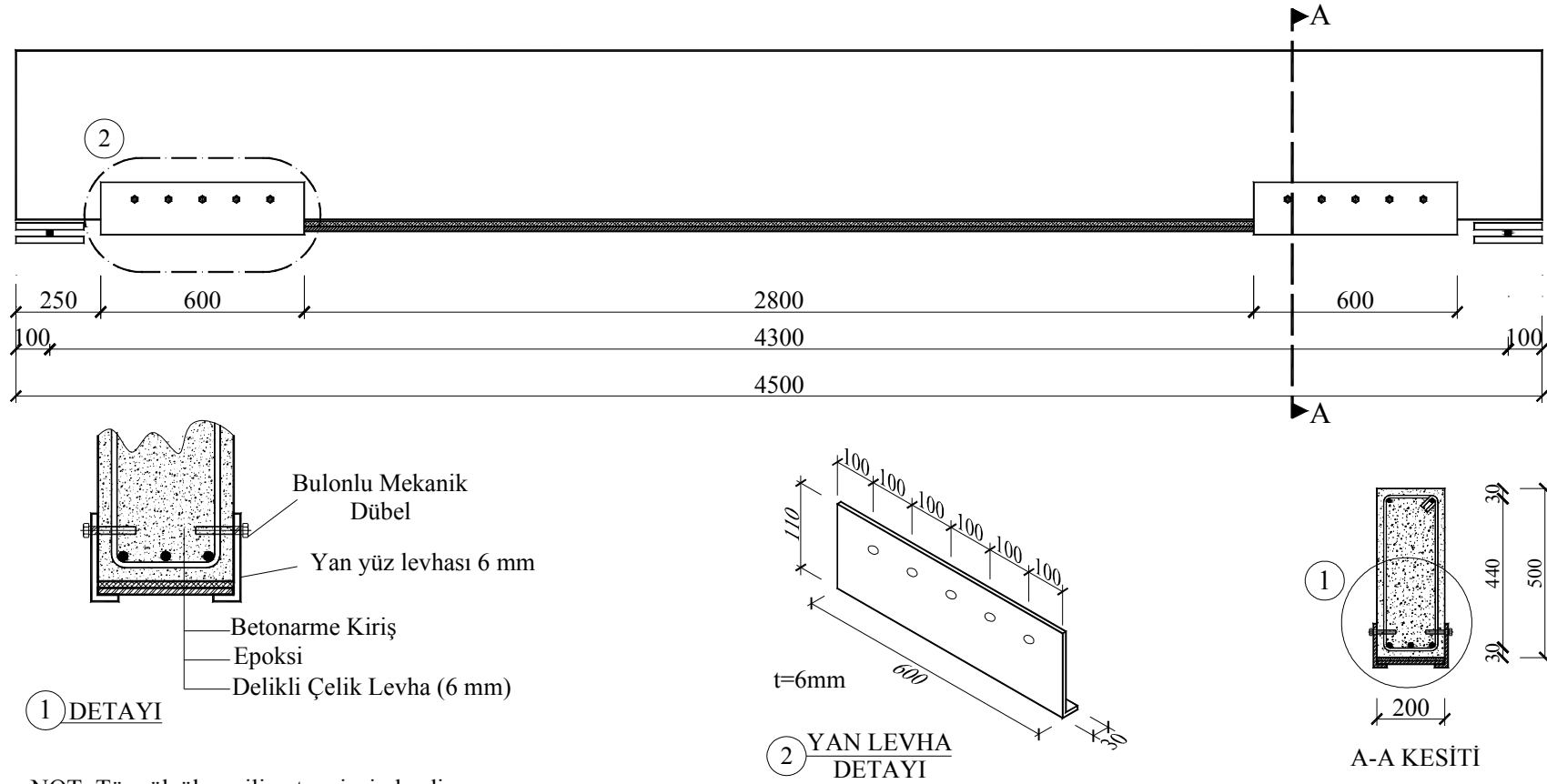
Şekil 4.6. Rub6 deney elemanı



NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.



Şekil 4.7. PRb6 deney elemanı



Şekil 4.8. PRub6 deney elemanı

4.3. Malzeme Özellikleri 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 üretim serisinden temin edilen nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan beton ve donatılardan alınan numuneler laboratuarda testlere tabi tutulmuş ve özellikleri belirlenmiştir.

Deney elemanlarının betonları hazır beton fabrikasından sipariş edilerek dökülmüştür. Betonların ortalama karakteristik dayanımları (f_{ck}) 20 MPa'dır. Donatı olarak 8 mm, 10 mm ve 14 mm çaplı donatı kullanılmıştır. Bu donatıların akma dayanımı (f_{yk}) 450 MPa kopma dayanımı (f_u) 620 MPa olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan çelik levhaların akma ve kopma dayanımlarının yaklaşık olarak eşit ve 280 MPa civarında olduğu belirlenmiştir. Çelik levhalar DKP saçlarından A1 kalitesinden en yumuşak çelik kullanılmıştır.

Çelik levhayı beton yüzeye yapıştırmak üzere Sika-Deteks firmasının ürettiği "Sikadur-31" isimli epoksi yapıştırıcı uygun görülerek kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği özellikler Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Solventsiz, tiksotropik, 2 bileşenli epoksi reçine ve özel olarak seçilmiş yüksek dayanımlı dolgu maddelerinin bir kombinasyonundan oluşmuş yapıştırma ve tamir harcıdır. Hamur kıvamında olması nedeniyle kolay ve değişik ortamlarda uygulama olanağı sağlamaktadır.

Çizelge 4.2. Yapıştırıcı (epoksi) özellikleri

RENK	Gri (A:Beyaz, B:Siyah)
YOĞUNLUK	1,65 kg/l
KARIŞIM ORANI	A:B=3:1 hacimce ve ağırlıkça
DAYANIM	
BASINÇ DAYANIMI	60-70 N/mm ²
ÇEKME DAYANIMI	15-20 N/mm ²
YAPIŞMA (ÇELİĞE)	15 N/mm ²
YAPIŞMA (BETONA)	3,0-3,5 N/mm ² (Beton Dayanmaz)
EĞİLME DAYANIMI	30-40 N/mm ²
YOUNG MODÜLÜ	8500 N/mm ²
ELASTİSİTE MODÜLÜ	4300 N/mm ²
GENLEŞME KATSAYISI	50x10 ⁻⁶ (-20 ⁰ C ile +40 ⁰ C Aralığında)
SARFIYAT	1,7-3,4 kg/m ² (kalınlık 1-2 mm))

4.4. Yapıştırma Tekniği

Betonarme kirişlere çelik levhalar yapıştırılmadan önce kirişin alt yüzeyi zımpara taşı ile silinip düz yüzey elde edilmiştir. Beton yüzey üzerinde toz kalmayacak şekilde temizlenmiştir. Çelik levhalar üzerindeki pas ve çapaklar alındıktan sonra levha hafif şekilde pürüzlendirilmiş ve daha sonra levha üzerindeki yağ tabakası tamamen temizlenmiştir.

Betonarme yüzey ve çelik levha hazırlandıktan sonra, epoksi yapıştırıcının A ve B bileşenleri 3/1 oranlarında tartılarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sabit matkapta ucuna karıştırma aparatı takılarak 600 devir/dakikayı geçmeyecek şekilde malzeme yumuşak kıvama gelene ve karışım homojen gri renk alana kadar karıştırılmıştır.

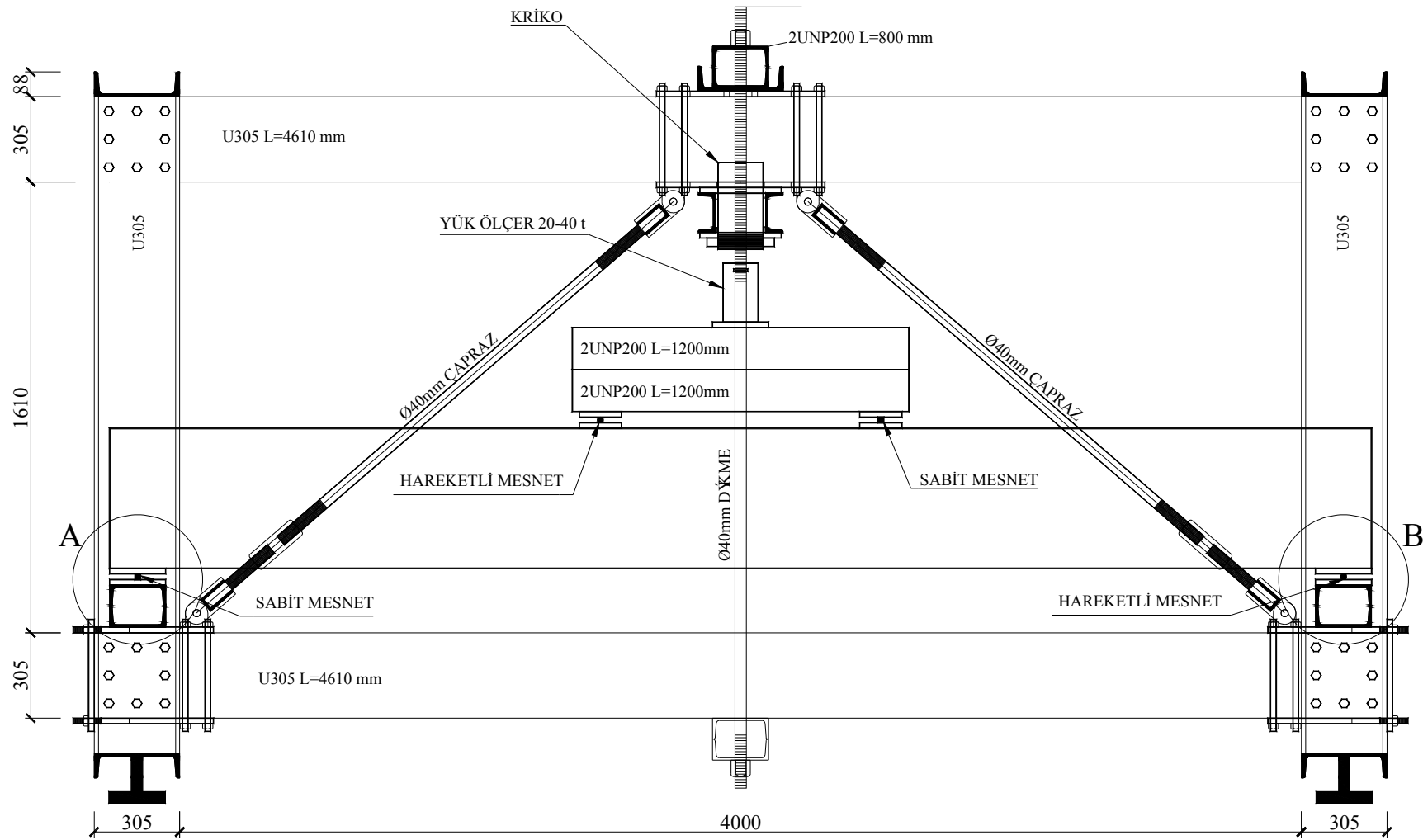
Karıştırılan malzeme yüzeye dişli spatula yardımıyla her yerde aynı kalınlık olacak şekilde sürüldükten sonra, çelik levha beton yüzey üzerine konulmuştur. Yan yüz uygulamalarının olduğu elemanlarda alt yüzeye gelen çelik levha yapıştırıldıktan sonra, yan yüz levhalarının geleceği yerlere yapıştırıcı sürülmüş ve sıkıştırma

işlemine geçilmiştir. Çelik levhanın beton yüzeye her yerde aynı şekilde yapışmasının sağlanması amacıyla tahta ve işkenceler yardımıyla düzenli bir şekilde sıkıştırma yapılmıştır. Priz alması için gerekli süre beklendikten sonra deney aşamasına geçilmiştir.

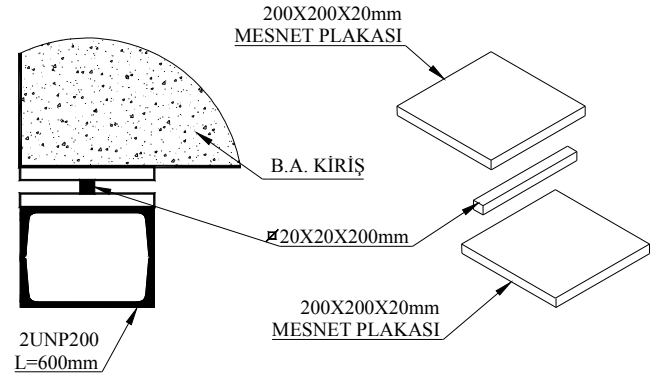
4.5. Deney Düzeni

4.5.1. Deney çerçevesi

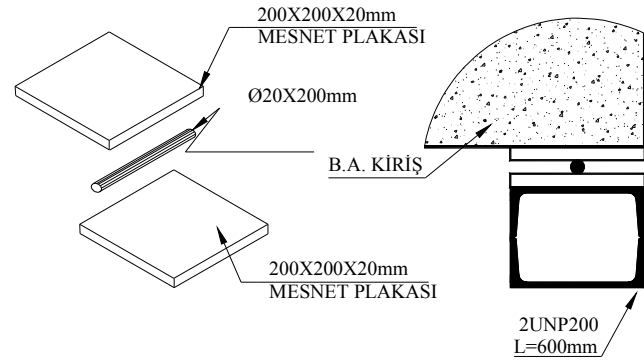
Deneyler Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde mevcut kapasitesi 200 kN olan yük çerçevesi kullanılmıştır. Yapılacak deneylerde çerçevenin kapasitesinin üzerine çıkılacağından, çerçeve ek çelik çaprazlar ile güçlendirilmiştir. Deney düzeneğinde iki noktalı tekil yükleme yapılmıştır. Deney çerçevesinin ortasında bulunan hidrolik krika ile yük önce çelik kirişe ve buradan deney elemanına iki eşik tekil yükü aktaracak şekilde deney elemanına verilmiştir. İki noktalı yükleme aralığı yayılı altında kirişte meydana gelecek moment diyagramını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Deney sırasında kirişin yanal stabilitesini sağlayabilmek ve kirişin boyuna eksen etrafındaki dönmeleri engelleyebilmek için ek önlemler alınmıştır. Deney çerçevesi, reaksiyonları kendi içerisinde deney elemanlarına iletebilmektedir. Betonarme kiriş bir ucunda sabit, diğer ucunda hareketli mesnetlere oturtulmuştur. Deney çerçevesi ve mesnet detayları Şekil 4.9. Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.9. Deney düzeneği ön görünüş

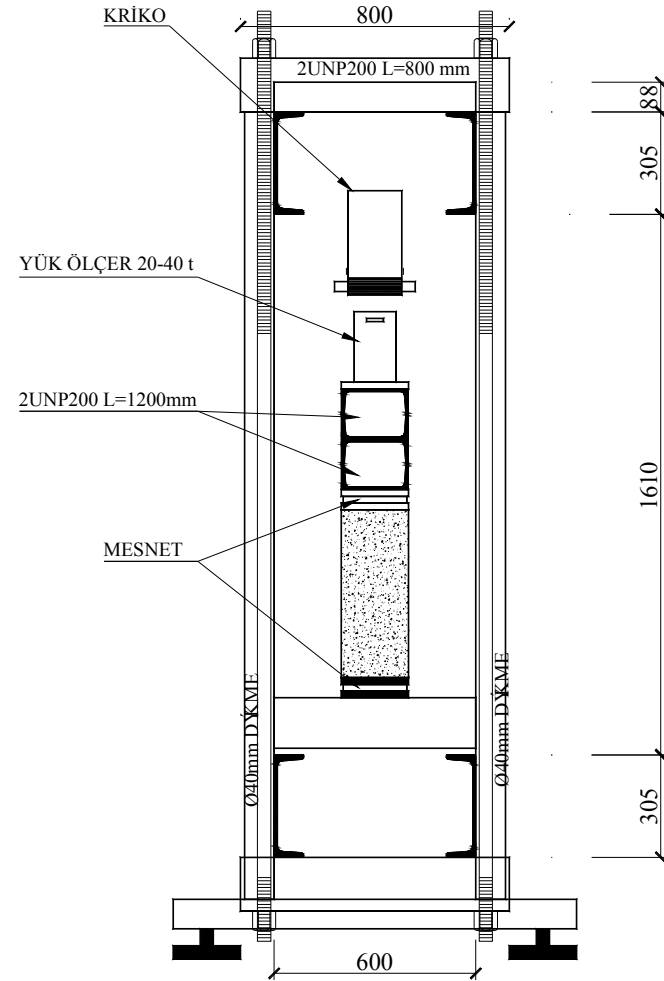


A SABİT MESNET
DETAYI



B HAREKETLİ MESNET
DETAYI

Şekil 4.10. Mesnet detayları



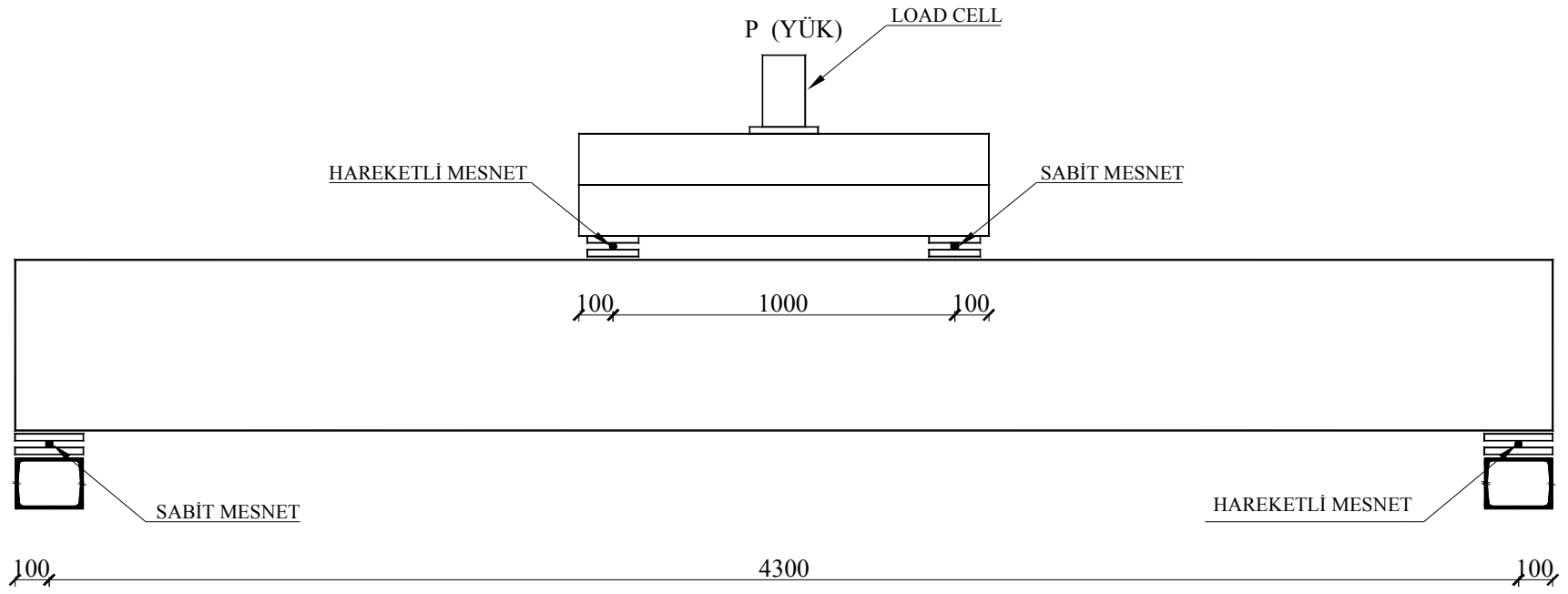
Şekil 4.11. Deney düzeneği yan görünüş

4.5.2. Yükleme düzeni

İki ucundan basit kiriş gibi mesnetlenen deney modellerinde kesme kuvvetinin olmadığı, basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanarak Şekil 4.12.'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 model üzerinde, model ekseninden 500 mm kenarlara biri sabit diğeri hareketli olarak mesnetlenen, önemli bir sehim yapmayacak şekilde boyutlandırılmış üst üste kaynaklanmış 4 adet U 200 çelik kullanılmıştır. Yük aktarımında kutu profilin mesnetlenmesi iki çelik lama arasına konulan yuvarlak ve kare çubuklarla yapılmıştır. Kutu profil üzerine yükün uygulanabilmesi için 600 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ile yük kontrolü için 400 kN kapasiteli yük ölçer (load-cell) simetri merkezleri çakıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir.

4.5.3. Ölçüm düzeni

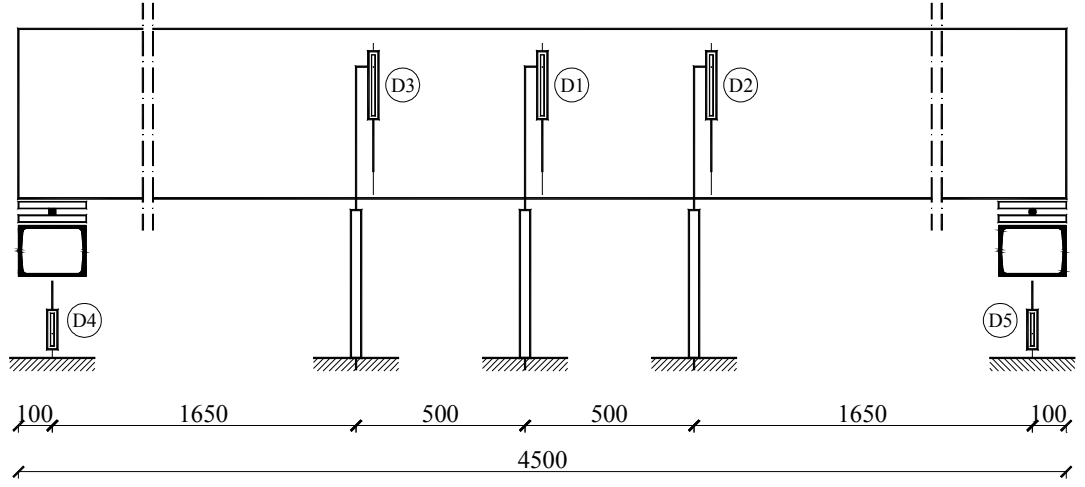
Deneyler sırasında çeşitli yön ve doğrultudaki deplasman ölçümleri için, 0,01 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, elektronik deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bu LVDT'lere gelen bilgiler bir okuyucu tarayıcıdan geçtikten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında kirişteki deplasman ile yükün değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir. 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 deney elemanı üzerine ankre edilmiş olan ölçüm çubuklarına bağlanmıştır. Deney elemanı üç ölçüm bölgesine ayrılmış ve eleman üzerine mesnetlenmiş olan LVDT'ler bu bölgelere yerleştirilmiştir. (Şekil 4.13.a-b)



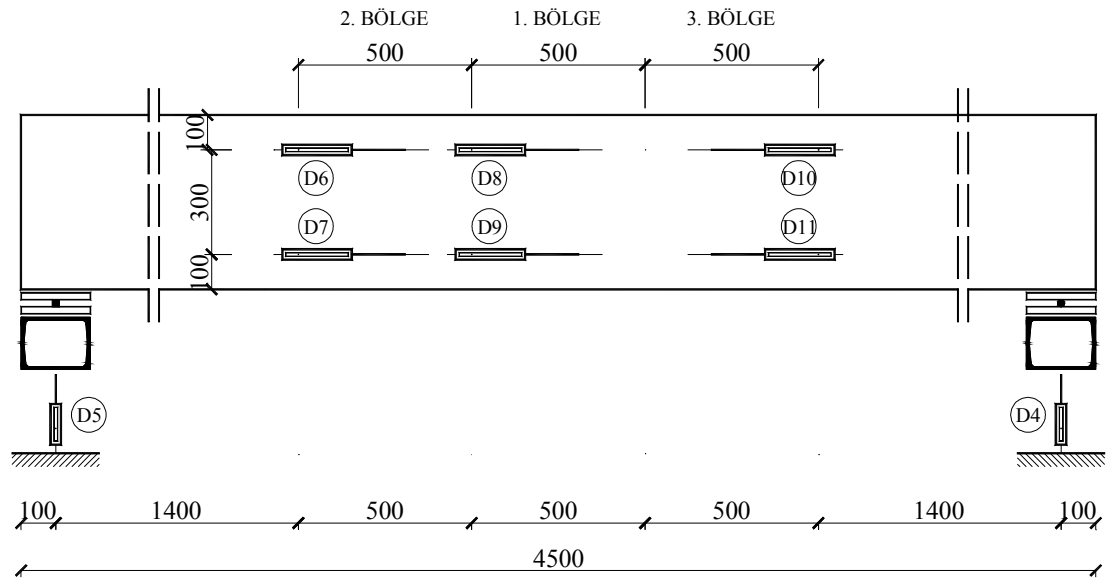
Şekil 4.12. Yükleme noktalarının yeri

Çizelge 4.3. Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'lerin ölçüm amaçları

LVDT NUMARASI	ÖLÇÜM AMACI
D1	Orta nokta düşey deplasman
D2	Sağ taraf düşey deplasman
D3	Sol taraf düşey deplasman
D4	Sol yük mesnedi düşey deplasman
D5	Sağ yük mesnedi düşey deplasman
D6	Sol bölge üst eğrilik ölçümü
D7	Sol bölge alt eğrilik ölçümü
D8	Orta bölge üst eğrilik ölçümü
D9	Orta bölge alt eğrilik ölçümü
D10	Sağ bölge üst eğrilik ölçümü
D11	Sağ bölge alt eğrilik ölçümü



a)



b)

Şekil 4.13. Ölçüm düzeneği

a) Ölçüm düzeneği ön yüzü

b) Ölçüm düzeneği arka yüzü

4.6. Deneyler

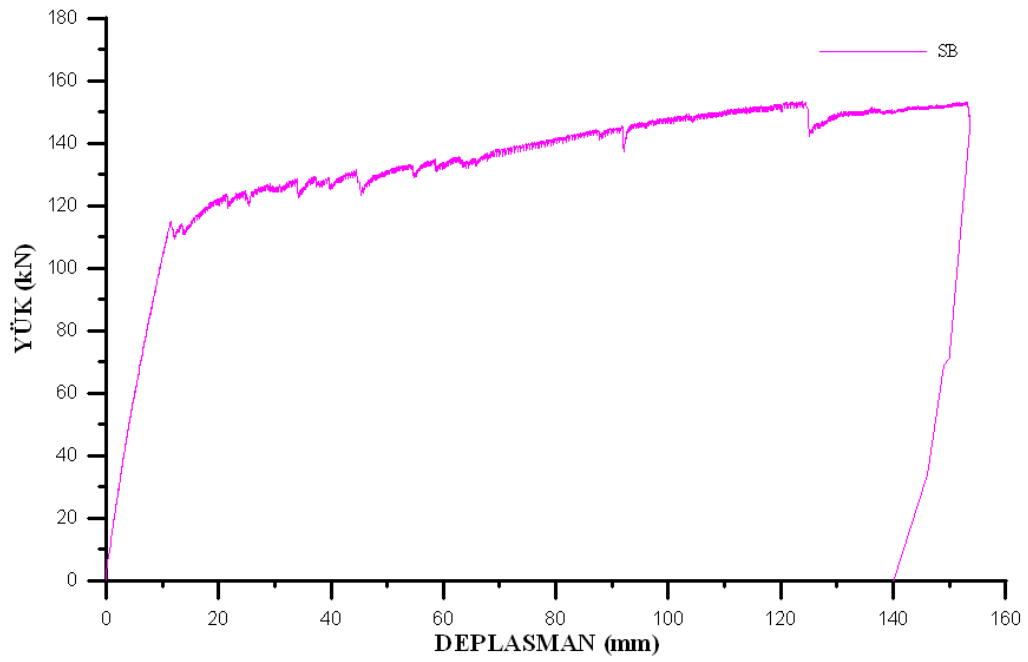
4.6.1. SB referans(yalın) kirişi

Yapılan çalışmalar için referans olması amacıyla herhangi bir güçlendirilme işlemi uygulanmamış SB kirişi yalın halde düzenlenmiştir.

Deney başladıktan sonra 30 kN yükte ilk çatlaklar görülmüştür. Yük 66 kN düzeyine geldiğinde kiriş orta bölgesinde oluşan eğilme çatlakları 0,1 mm ulaşmıştır. Elemanda 115 kN yük ve 130 mm deplasmanda akma görülmüştür. Bu aşamadaki maksimum çatlak genişlikleri 0,5 mm' ye ulaşmıştır. 120 kN yükte eleman tekrar yük almaya başlamıştır. Donatıda pekleşme sınırına ulaşılmıştır. Deplasman değeri 30 mm' ye ulaştığında maksimum çatlak genişliği 3 mm olarak ölçülmüştür. Yük 150 kN, 128 mm deplasman değerine kadar ulaştıktan sonra açıklıkta üst bölgede sol mesnet ve her iki mesnet ortasında ezilme meydana gelmiştir. Deplasman 148 mm olduğunda basınç donatılarında burkulma belirtileri meydana gelmiştir. Deneye 145 kN yük ve 154 mm deplasmanda son verilmiştir. Çatlaklar beklenildiği biçimde gelişmiştir. Kiriş eğilme dayanımının yenilmesi ile sünek bir şekilde göçmüştür.



Resim 4.2. SB deney elemanı



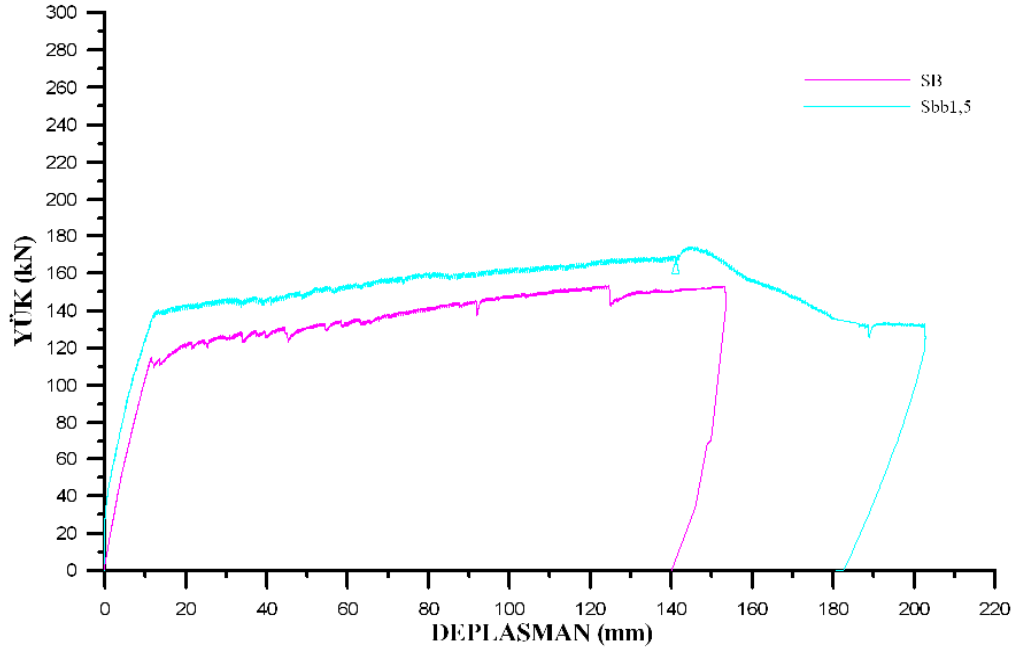
Şekil 4.14. SB deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.2. Sbb1,5 deney elemanı

Sbb1,5 deney elemanı yalın kirişin yalnızca alt yüzeyine 1,5 mm kalınlığında elik levhanın epoksi ile yapıştırılması ve aynı enkesite tek bulon gelecek şekilde 300 mm ara ile bulonlarla desteklenerek deneye tabi tutulmuştur. Yüklemenin başlatılmasından sonra 0,05 mm genişliğinde ilk çatlaklar, 50 kN yük sınırında orta bölgede gözlemlenmiştir. 138 kN yük ve 14 mm deplasman değeriinde akma meydana gelmiştir. 150 kN yük ve 65 mm deplasman değeriinde epoksi ile beton arasında aderans özölmesi başlamış ve yük bulonlara direkt olarak aktarılmıştır. 160 kN yük değeriinde basınç bölgesinde ezilme gözlenmiştir. Eleman maksimum 170 kN yük değeriine ulaşmış ve bu yük durumunda deplasman 175 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanı 130 kN yük değeriinde 204 mm deplasman yaptığı sırada, orta bölgede levhada bulon kesitinde kopma meydana gelmiştir. Deney sonrasında levha boyu 4045 mm ve orta bölgede levha eni 180 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 4.3. Sbb1,5 deney elemanı



Şekil 4.15. Sbb1,5 deney elemanı

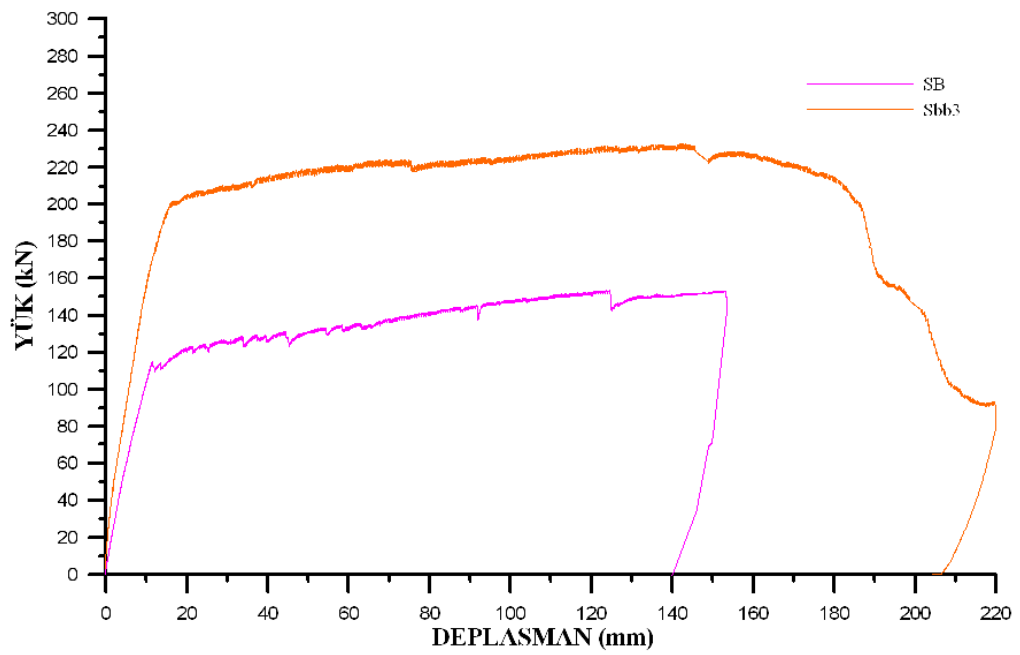
4.6.3. Sbb3 deney elemanı

Sbb3 deney elemanı, yalın kirişin yalnızca alt yüzeyine 3 mm kalınlığında çelik levhanın epoksi ile yapıştırılması ve aynı enkesite tek bulon gelecek şekilde 300 mm ara ile bulonlarla desteklenmiştir. Deneye başladıktan sonra ilk kılcal eğilme çatlakları orta bölgede 80 kN yük ve 4,5 mm deplasman değerinde gözlenmiştir. 200 kN yük, 19 mm deplasman olduğu sırada elemanda akma meydana gelmiştir. Bu durumda maksimum çatlak genişliği 0,8 mm civarında ve basınç bloğu yüksekliği 150 mm olarak ölçülmüştür. 215 kN yük, 48 mm deplasmanda levhanın sol ucundan başlayarak yaklaşık 45° eğimli 0,1 mm'den küçük bir kesme çatlağı oluşmaya başlamıştır. 220 kN yük, 57 mm deplasmanda aderans çözümleri başlamıştır; ancak levha bulonlar tarafından tutulduğundan çözülme sınırlı kalmıştır. 220 kN yük, 75 mm deplasmanda basınç bölgesinde ezilme meydana gelmiştir. Kesme çatlağında ilerleme devam etmekle birlikte levha uçlardan ayrılmaya başlamıştır. 225 kN yük, 160 mm deplasmanda basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Kırılma beton kapasitesinin kesme dayanımının tükenmesi ile meydana gelmiştir. Deney

sonrasında levha boyu 4070 mm ve orta bölgede levha eni 195 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 4.4. Sbb3 deney elemanı



Şekil 4.16. Sbb3 deney elemanı



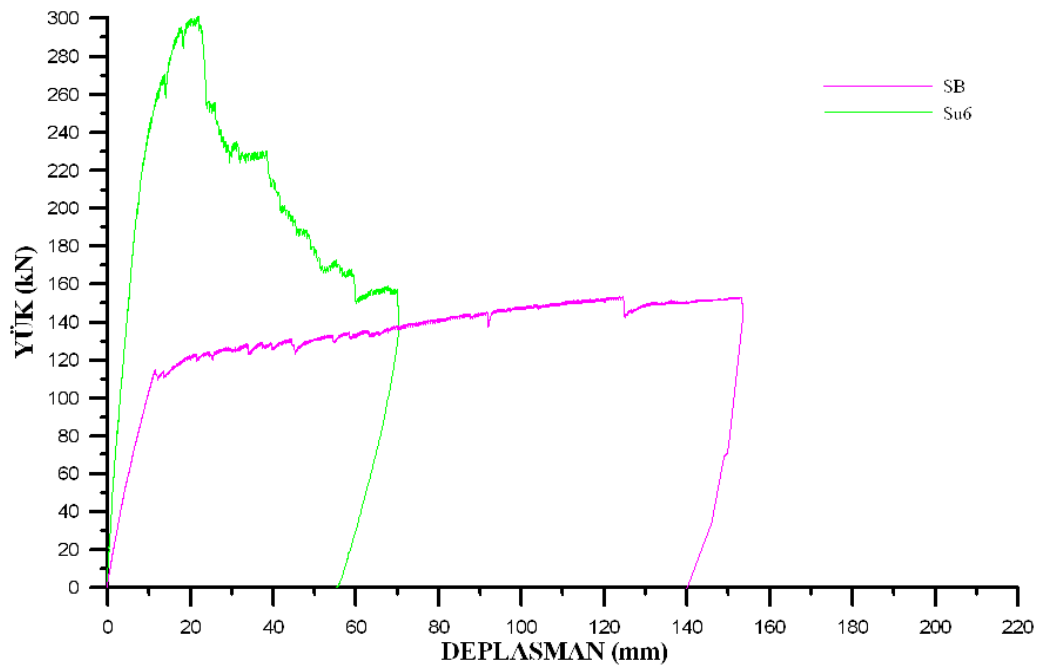
Resim 4.5. Sbb3 deney elemanı basınç donatılarında burkulma

4.6.4. Sub6 deney elemanı

Sub6 deney elemanı, yalın kirişin alt yüzeyine 6 mm kalınlığında çelik levhanın epoksi ile yapıştırılması ve uç kısımlardan yan yüzeylere 6 mm kalınlığındaki çelik levhanın bulonlanması ile güçlendirilmiştir. Deney başladıktan sonra 300 kN yük değerine kadar lineer olarak artış gözlenmiş ve 22 mm deplasman elde edilmiştir. Elemanda sağ uçta meydana gelen kesmeden dolayı levha sıyrılmasıyla göçme meydana gelmiş ve bu nedenle akma gözlenememiştir. Burada yan yüz levhalarının yüksekliğinin ve bulon uzunluğunun az olması etkili olmuştur. Bu aşamadan sonra rijitlikte ani değişim meydana gelmiş ve deneye son verilmiştir.



Resim 4.6. Sub6 deney elemanı



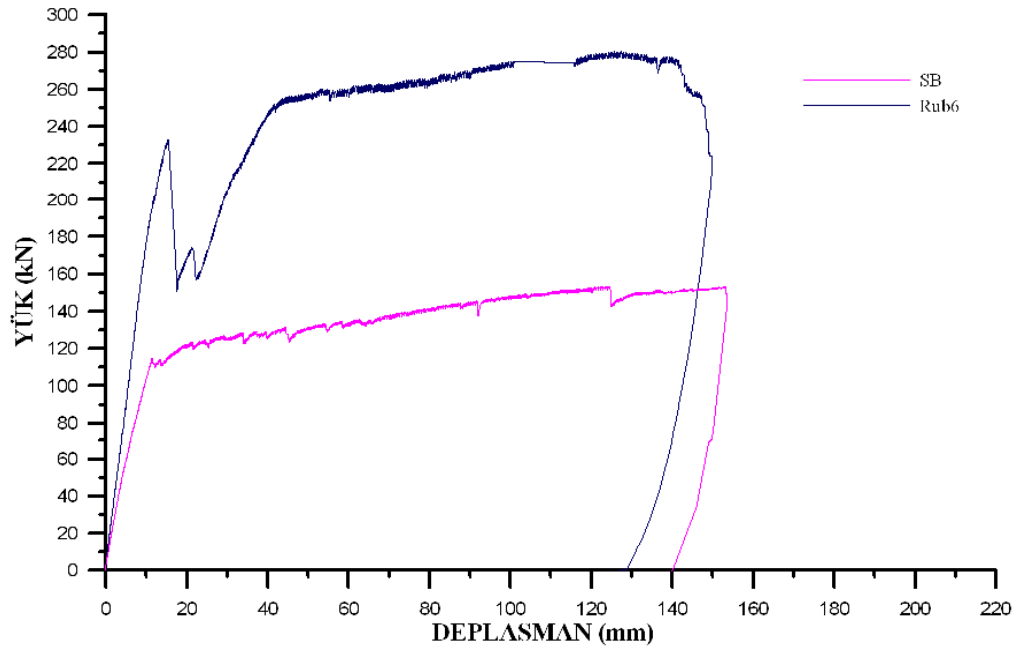
Şekil 4.17. Sub6 deney elemanı

4.6.5. Rub6 deney elemanı

Rub6 deney elemanı, hasarlı kirişin alt yüzeyine 6 mm kalınlığındaki çelik levha yapıştırılarak kiriş uçlarına 500 mm genişliğinde ve 350 mm yüksekliğinde, 6 mm kalınlığındaki çelik levhalar 7 adet M20 saplamalar kiriş eni boyunca uzatılarak onarılmıştır. 115 kN yük ve 7 mm deplasman değerinde elemanda yeni çatlaklar görülmeye başlanmıştır. 230 kN yük ve 16 mm deplasmanda epoksi ile levha arasında aderans çözülmesi görülmüştür. Bu aşamada yükte ani düşüş meydana gelmiştir. Uç levhalar devreye girerek eleman tekrar yük taşımaya başlamıştır. 240 kN yük ve 40 mm deplasmanda betonda ezilme görülmüştür. 250 kN yük 48 mm deplasmanda akma meydana gelmiştir. Ezilme paspayı ile sınırlı kalarak her iki uçta 60° eğimli kesme çatlakları gözlenmiştir. Deplasman 84 mm' ye ulaştığında orta bölgede tam anlamıyla aderans çözülmesi oluşmuştur. Deneye 275 kN yük ve 140 mm deplasmanda son verilmiştir. Deney elemanında basınç kapasitesinin aşılması ile göçme meydana gelmiştir.



Resim 4.7. Rub6 deney elemanı



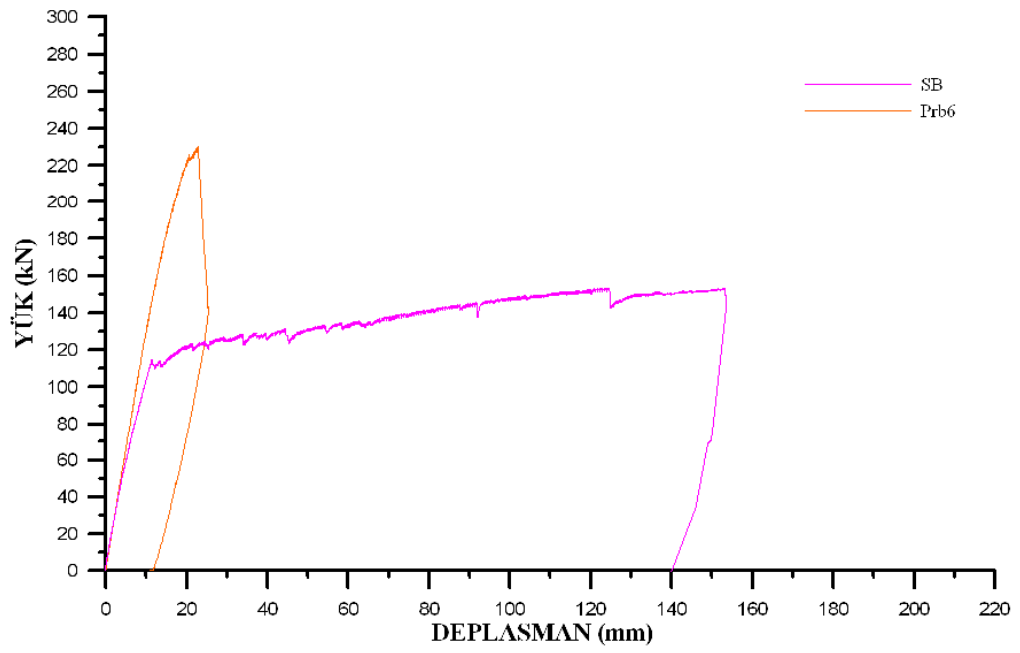
Şekil 4.18. Rub6 deney elemanı

4.6.6. PRb6 deney elemanı

PRub6 deney elemanı, hasarlı kirişe yalnızca alt yüzünden 6 mm kalınlığındaki delikli çelik levhanın yapıştırılması ile onarılmıştır. 100 kN yük ve 8 mm deplasmanda elemanda yeni çatlaklar oluşmaya başladı. Bunlardan bir kısmı kesme çatlağı olarak görüldü. 215 kN yük, 20 mm deplasmanda maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak ölçülmüş ve bu sırada levhanın sağ ucunda meydana gelen açılma nedeniyle levha sıyrılmıştır. Bunun nedeni hasarlı kirişin aynı bölgede daha önceden paspayı tabakasının tamamen sıyrılmış olması ve herhangi bir ekstra yan yüz önlemi alınmamış olması olarak öngörülmüştür. Gerçekte genellikle hasarlı kirişlerde paspayının tamamen yenilenmesi durumu sıklıkla karşılaşılan bir durum olmadığı düşünüldüğünde bunun deneyi olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Bu sakıncaların ortadan kaldırılması amacıyla uçlardan takviye edilerek PRub6 onarım deneyi yapılmıştır.



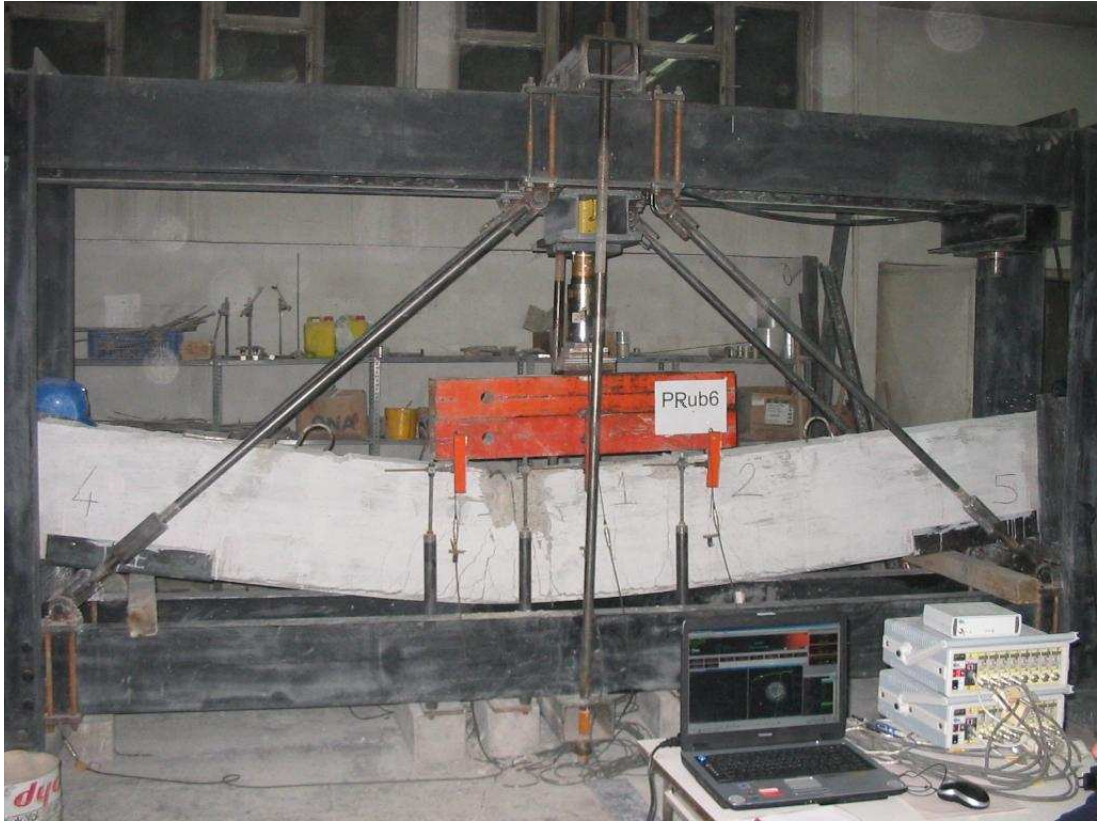
Resim 4.8. Prb6 deney elemanı



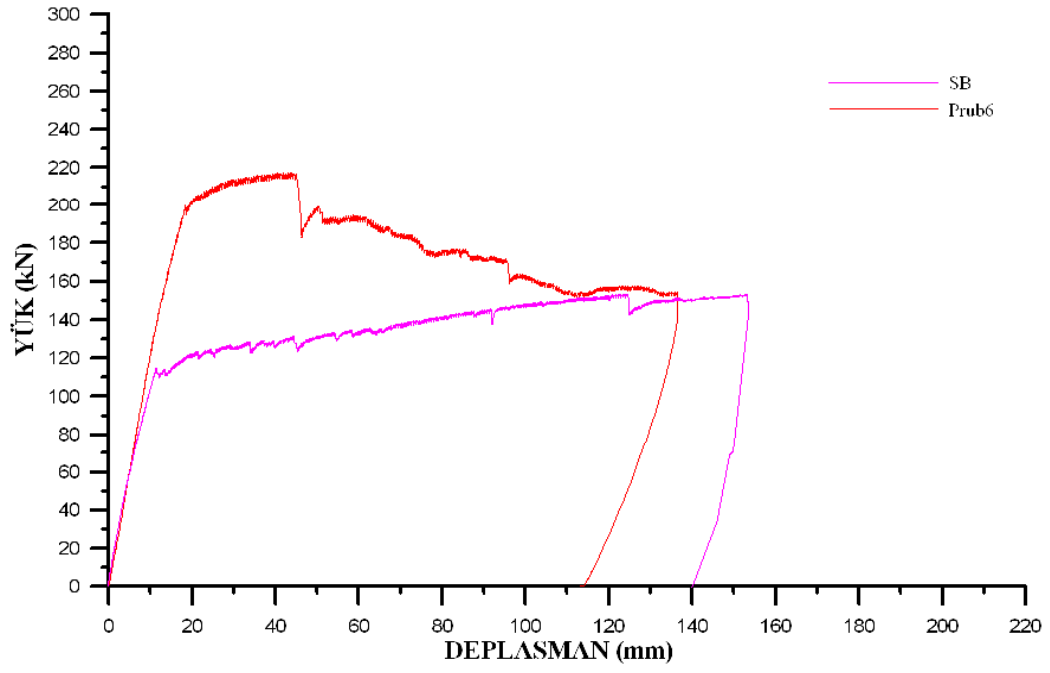
Şekil 4.19. Prb6 deney elemanı

4.6.7. PRub6 deney elemanı

PRub6 deney elemanı, hasarlı kirişe alt yüzünden 6 mm kalınlığındaki delikli çelik levhanın yapıştırılmış ve uçlardan yan yüzlere 6 mm kalınlığındaki düz çelik levhaların bulonlanarak onarıldığı kiriştir. Yüklemeye başladıktan sonra 105 kN yük, 9 mm deplasmanda sadece açıklıkta alt bölgede kılcal çatlaklar görülmüştür. 200 kN yük, 21 mm deplasmanda orta bölgede epoksi ile beton arasında aderans çözümleri başlamıştır ve maksimum çatlak genişliği 0,5 mm olarak ölçülmüştür. 210 kN yük, 34 mm deplasmanda akma gerçekleşmiştir. Orta bölgede aderans çözülmesi yan yüzdeki levhaların etkisi ile azalarak devam etmektedir. 190 kN yük, 65 mm deplasmanda basınç bölgesinde ezilme oluşmuştur. Sol uç bölgede levha açılmaya başlamıştır. 160 kN yük, 135 mm deplasmanda levhanın sol uça tamamen sıyrılması nedeniyle deneye son verilmiştir.



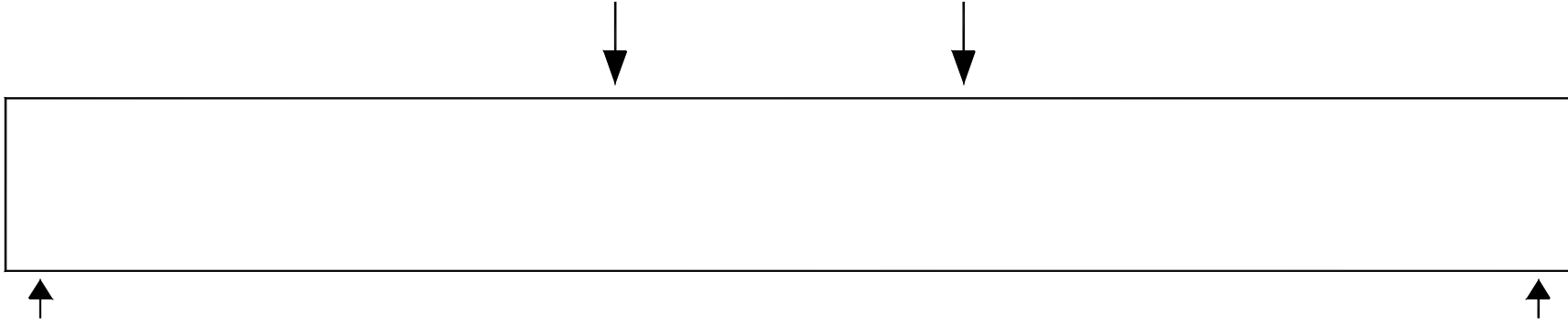
Resim 4.9. PRub6 deney elemanı



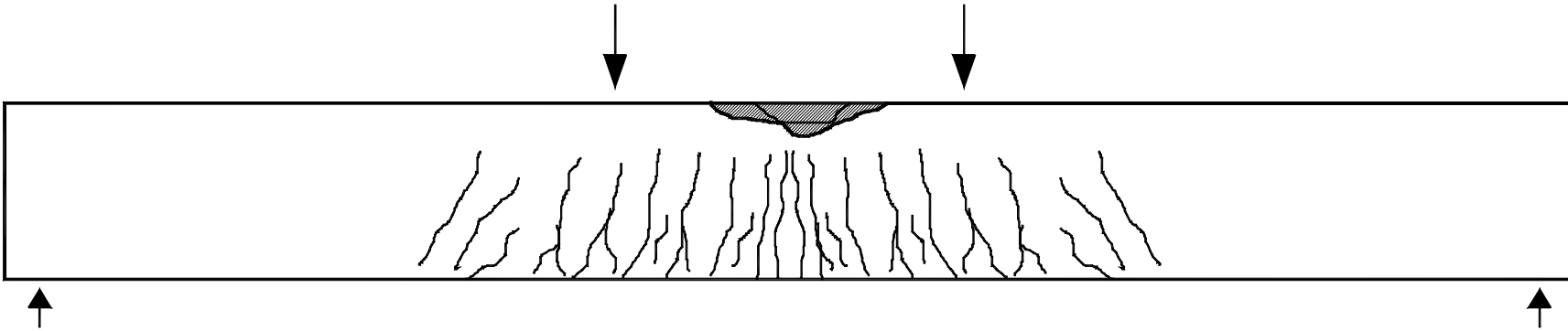
Şekil 4.20. PRub6 deney elemanı



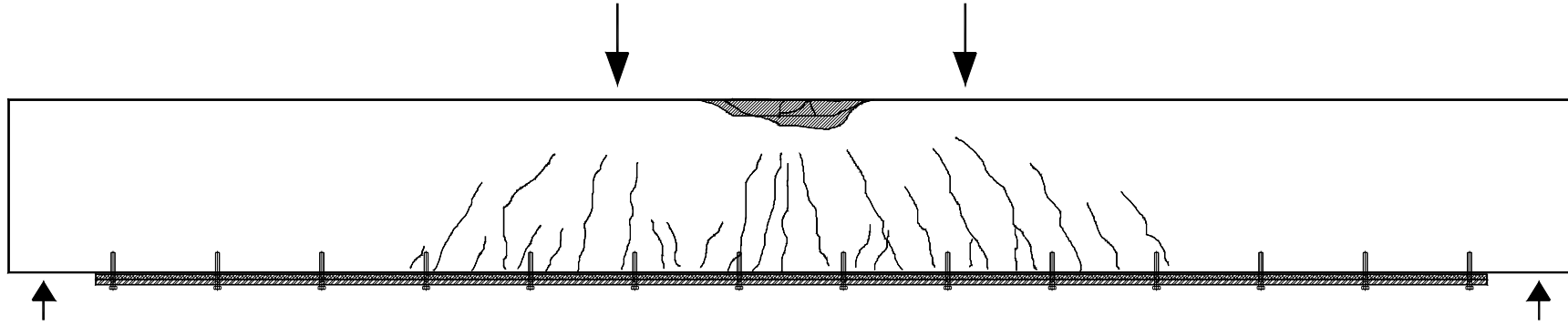
Resim 4.10. Deney elemanları



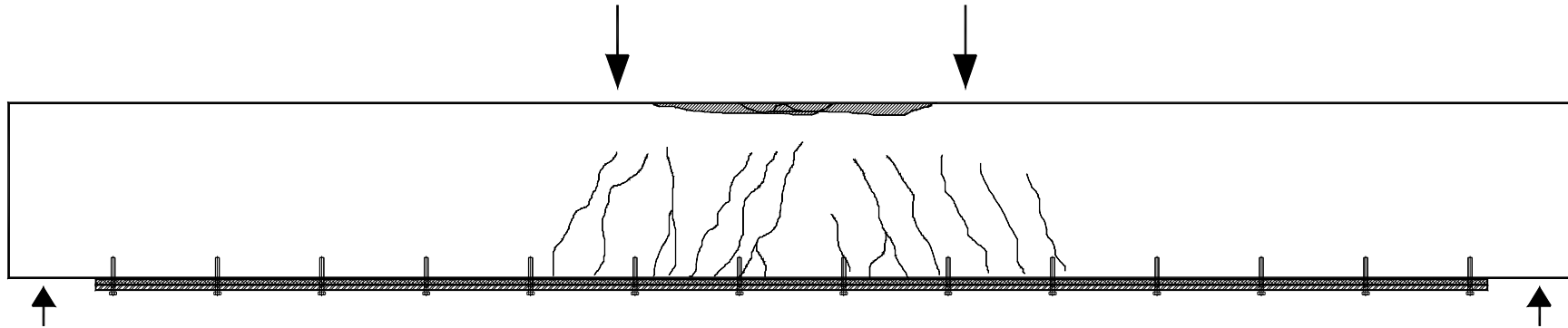
Şekil 4.21. SB deney elemanı (deney öncesi hasarsız durum)



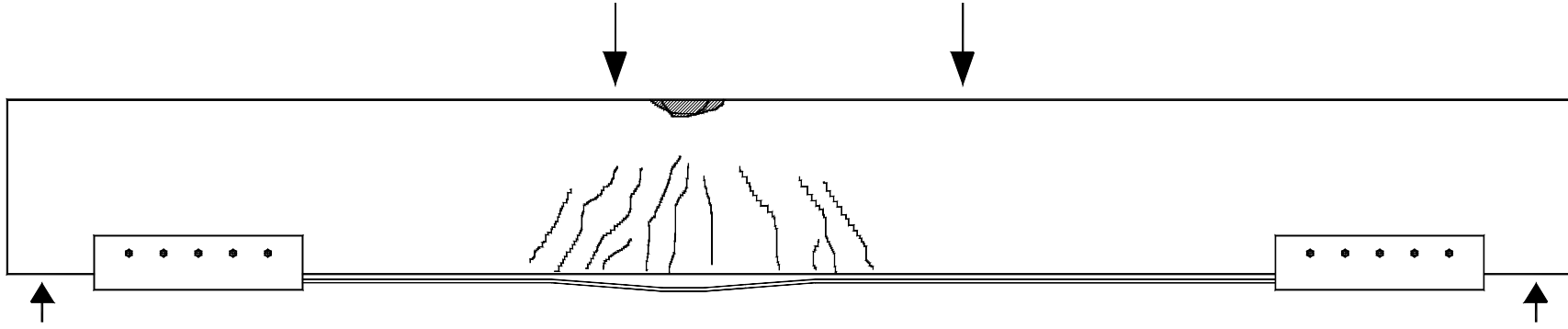
Şekil 4.22. SB deney elemanı çatlak haritası



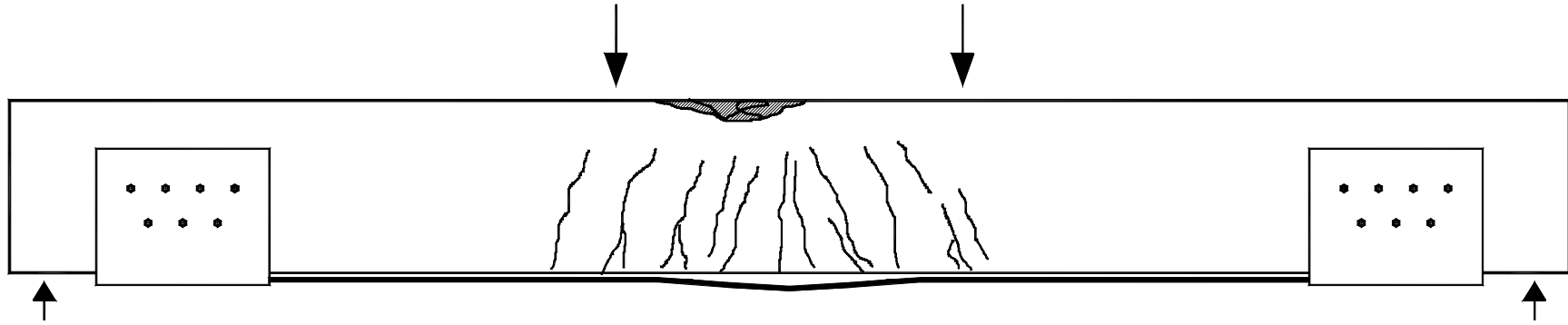
Şekil 4.23. Sbb1,5 deney elemanı çatlak haritası



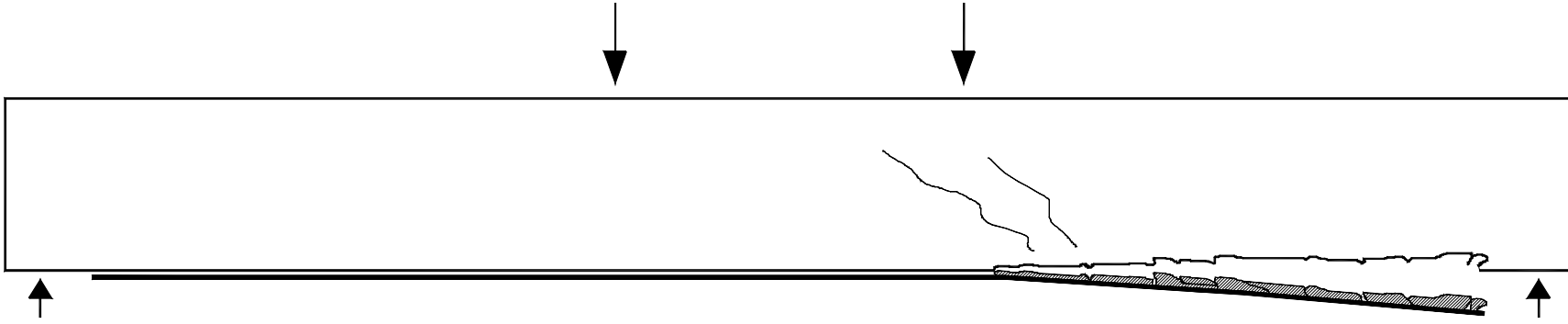
Şekil 4.24. Sbb3 deney elemanı çatlak haritası



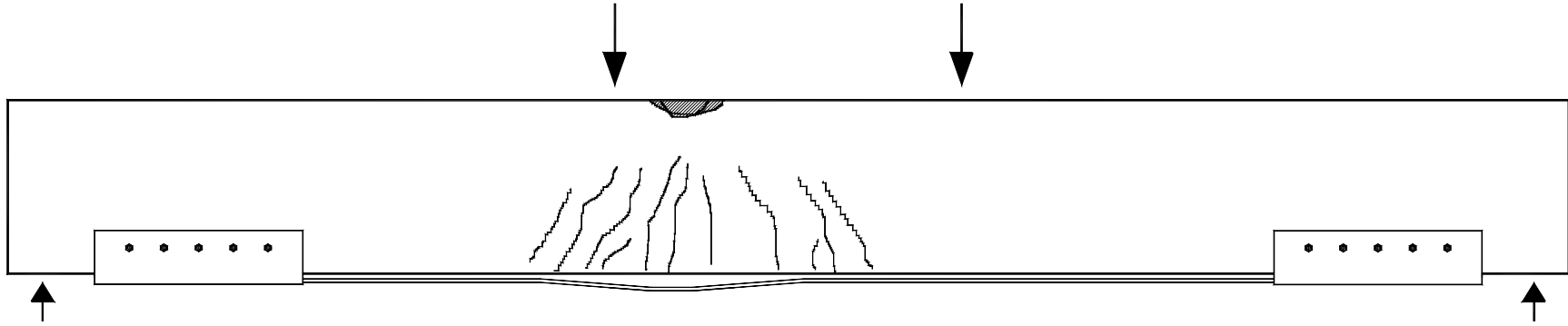
Şekil 4.25. Sub6 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.26. Rub6 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.27. PRb6 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.28. PRub6 deney elemanı çatlak haritası

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Genel

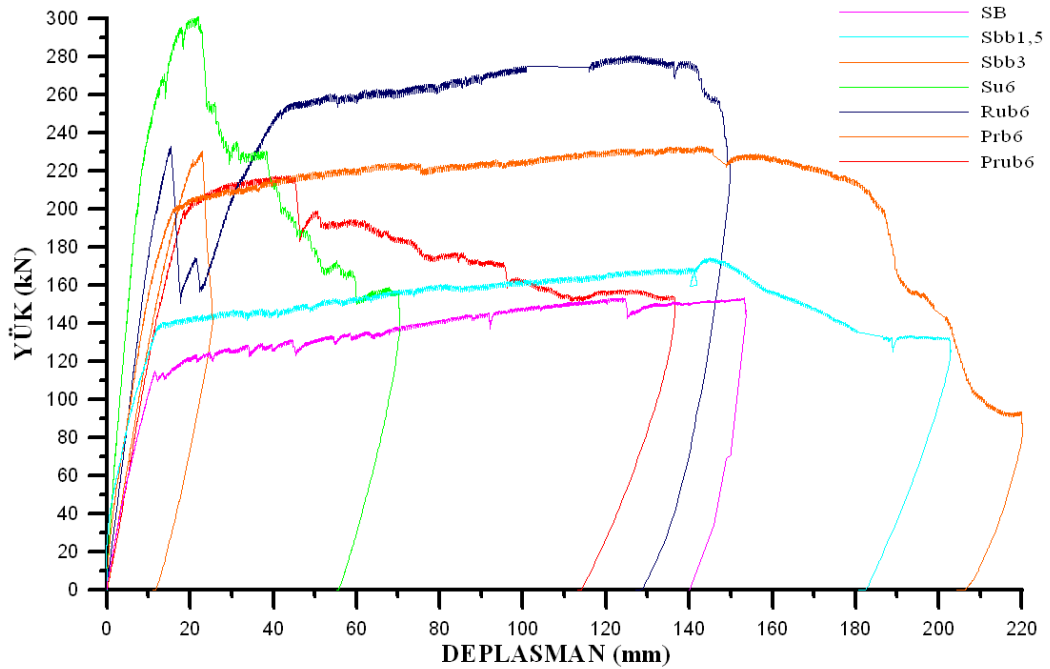
Yapılan deney sonuçların değerlendirilmesi kapsamında elemanların taşıma güçleri, süneklik oranları, eğilme rijitlikleri ve enerji tüketme kapasiteleri ele alınmıştır. Öncelikle deney sonuçlarından elde edilen bulgular kendi içinde incelenmiş ve çizelgeler halinde sunulmuştur. Yapılan deney sonuçları Uysal, A [6], ve bu çalışma ile birlikte eş zamanlı yürütülen Karahan'ın¹ çalışmaları ile karşılaştırılmış ve çelik levhalar ile güçlendirme ve onarım yönteminin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi yapılmıştır.

5.2. Taşıma Gücü

Bu çalışmanın güçlendirme kısmında bulon ile desteklenmiş 1,5 mm, 3mm ve 6mm'lik düz çelik levha kullanılmasının taşıma gücüne olan etkileri incelenmiştir. Sbb1,5 ve Sbb3 yalnızca alttan bulonlu, Sub6 elemanı ise yalnızca yan yüzden bulonlanmıştır. Tüm deney elemanlarına ait yük-deplasman eğrileri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Sbb1,5 ve Sbb3 deney elemanlarında teorik olarak hesaplanan taşıma gücü değerlerine ulaşılmış ancak, Sub6 deney elemanında bütün deney elemanlarının üzerinde olan 300 kN yük sınırına ulaşılmasına rağmen akma gerçekleşmediği için dayanımda ani düşüş görülmüş ve göçme meydana gelmiştir. Bunun nedeni, kalın levha kullanımında uç kısımlarda kayma gerilmelerinden meydana gelen sıyrılma problemlerinin önlenmesi amacıyla uygulanan yan yüz levhaların yüksekliğinin yeterli seviyede olmaması ve yan yüzden uygulanan bulonların paspayı içerisinde kalmasından dolayı kaynaklanan nedenler yer almaktadır. Bu deneyin sonuçlarını olumsuz olarak etkileyen yan yüz levha ile ilgili alınan tecrübe doğrultusunda onarım kirişlerinde daha iyi bir tasarım yapılmıştır.

¹ Bu tez çalışması ile eş zamanlı olarak yürütülen Karahan'ın deneysel çalışması ile ilgili grafik ve çizelgeler Ek-2'de verilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında Rub6, PRb6 ve PRub6 hasarlı kirişlerin rehabilitasyonunun taşıma güçlerine etkileri incelenmiştir. PRb6 deney elemanında taşıma gücü levhanın aderans çözülmeleri nedeniyle yüzeyden sıyrılıp düşmesi sonucunda düşük seviyede kalmıştır. Bu nedenle ek tedbir açısından yan yüzölü PRub6 deney elemanı hazırlanmıştır. Rub6 ve PRub6 deney elemanlarında teorik olarak hesaplanan taşıma gücü değerlerinin yaklaşık %90'lara varan dayanım elde edilmiştir. Hasar sonrasında düz çelik levha ile 6 mm kalınlığında ve uçlardan yan yüzlerle tutturulmuş ve bulon ile desteklenmiş olan Rub6 deney elemanı taşıma gücü yönünden başarılı sonuç vermiştir. Düz çelik levha ile delikli çelik levhanın hasarlı kirişlerde davranış olarak taşıma gücüne olan etkilerinin incelenmesi amacıyla hazırlanan 6 mm kalınlığında ve uçlardan yan yüzlerle tutturulmuş ve bulonlarla desteklenmiş PRub6 deney elemanı hazırlanmıştır. Delikli levha ile güçlendirilen bu elemanda da ulaşılan taşıma gücü hasar görmemiş gibi hesaplanan teorik taşıma gücünün %90'ına ulaşılmıştır. Çizelge 5.1'de deney elemanlarının teorik ve deneysel taşıma güçleri belirtilmiştir.



Şekil 5.1. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri

Çizelge 5.1. Teorik hesaplardan ve deneylerden elde edilen taşıma güçleri ve oranları

Deney Elemanı	h	d'	d	As ₁	As ₂	As _L	Py ₁	Pu ₁	Py ₂	Pu ₂	Py ₁ / Py ₂	Pu ₁ /Pu ₂
	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	kN	kN	kN	kN		
SB	500	30	470	157	462	0	115	152	112	151	1,03	1,01
Sbb1,5	500	30	470	157	462	276	140	170	153	201	0,92	0,85
Sbb3	500	30	470	157	462	552	200	225	192	248	1,04	0,91
Sub6	500	30	470	157	462	1200	---	---	277	347	---	---
Rub6	500	30	470	157	462	1200	230	275	277	347	0,83	0,79
PRb6	500	30	470	157	462	720	---	---	215	275	---	---
PRub6	500	30	470	157	462	720	200	210	215	275	0,93	0,76

h : kiriş yüksekliği

d' : paspayı

d : çekme donatısının üst yüzeye mesafesi

Py₁ : test akma yükü

Pu₁ : test kopma yükü

Py₂ : hesap akma yükü

Pu₂ : hesap kopma yükü

Py₁/ Py₂ : test/hesap akma yükleri oranı

Pu₁/Pu₂ : test/hesap kopma yükleri oranı

As₁ : basınç donatısı alanı

As₂ : çekme donatısı alanı

As_L : levha kesit alanı

5.3. Süneklik

Proje mühendislerinin güçlendirme sırasında karşılaştığı sorunlardan en önemlisi süneklik sorunudur. Sünek bir tasarım ile amaçlanan yeterli bir dayanımın yanı sıra iyi bir enerji tüketme kapasitesine sahip eleman oluşturmaktır. Süneklik betonarme elemanın yük taşıma kapasitesinde büyük ölçüde bir değişim olmaksızın deplasman yapabilme kabiliyetidir. Süneklik oranı, belirlenirken yük kapasitesinin %15 değer kaybettiği yük değerindeki deplasmanın, akma anındaki elemanın yaptığı deplasmana oranı olarak hesap edilmektedir. Çizelge 5.2.'de deney elemanlarının süneklik oranları ve yalın kiriş olan SB deney elemanının süneklik oranı 1 kabul edilerek hesaplanan göreceli süneklik değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Deney elemanları süneklik oranları

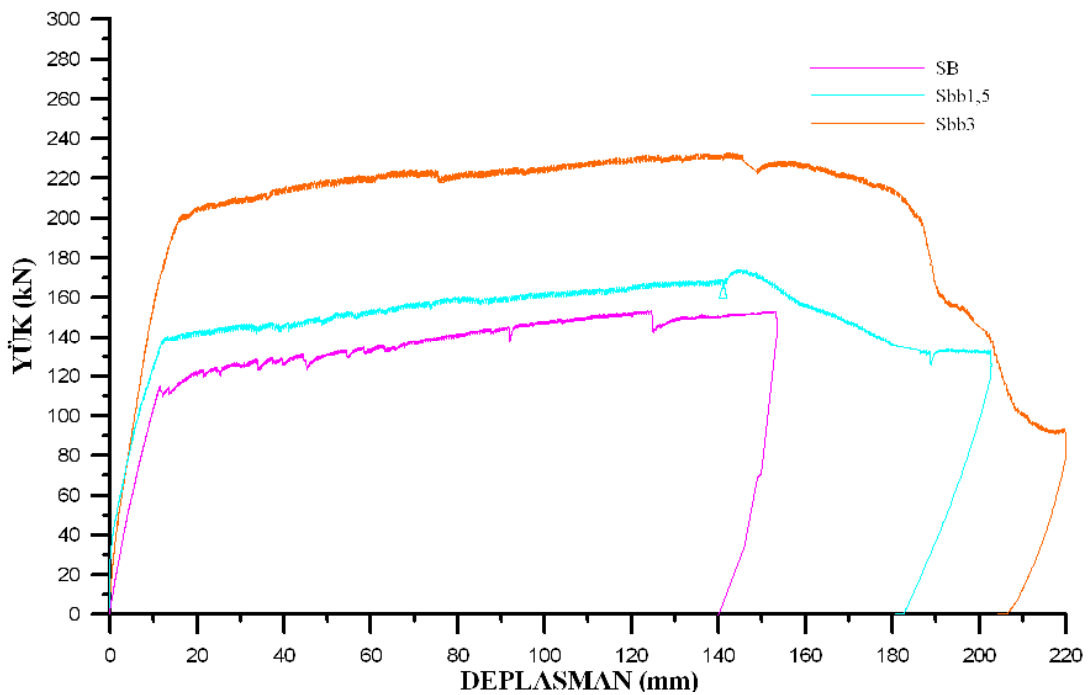
Deney Elemanı	Süneklik Oranı (δ_u / δ_y)	Göreceli Süneklik
SB	16,8	1,00
Sbb1,5	13,5	0,80
Sbb3	11,6	0,69
Sub6	---	---
Rub6	6,5	0,39
PRb6	---	---
PRub6	5,9	0,35

Çizelge 5.2'de de görüldüğü gibi, Sbb1,5 elemanına ait süneklik oranı 13,5 olarak belirlenmiştir. Sbb3 deney elemanında ise kullanılan güçlendirme levhası enkesit alanı fazla olduğu için betonarme davranışa uygun bir şekilde süneklik oranı daha düşük olmuştur. Her iki deneyde de istenilen süneklik oranın çok üzerinde süneklik oranı sağlanmıştır. Betonarme elemanlarda bu oranın en az 4 olması istenmekte iken Sbb1,5 ve Sbb3' te yaklaşık olarak 3 katı kadar süneklik sağlanmıştır. Şekil 5.2'de bu elemanların yük-deplasman grafikleri birlikte gösterilmiştir.

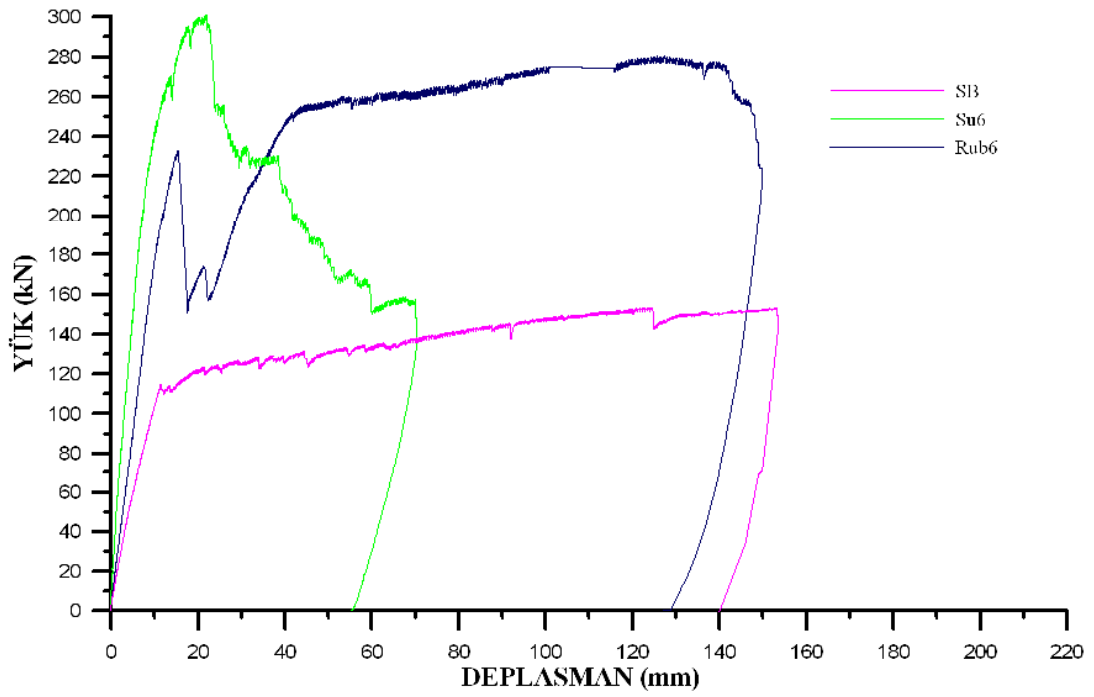
Güçlendirilmiş olan Sub6 deney elemanında yan yüzlere rağmen sıyrılmanın önlenememesi nedeniyle süneklik yönünden kötü bir davranış görülmüştür. Bu deney

dikkate alınarak hasarlı kiriş yeni alt yüz çelik levhası kullanılarak onarılmıştır. Ancak, önceki kirişten farklı olarak yan yüz levhası yüksekliği arttırılmış ve bulonlama işlemi enkesit boyunca karşıdan karşıya yapılmıştır. Bu sistem Şekil 4.6.'da verilmiştir. Bu deney sonucunda sıyrılma önlenmiş ve eleman hasarlı olmasına rağmen normal bir süneklik elde edilmiştir. Bu da göstermektedir ki iyi tasarlanmış yan yüz levhası hasar görmüş kirişlerde bile sünek bir davranışı sağlamaktadır. Şekil 5.3'te 6 mm'lik düz çelik levha ile onarılmış/güçlendirilmiş kirişlerin yük deplasman grafikleri verilmektedir.

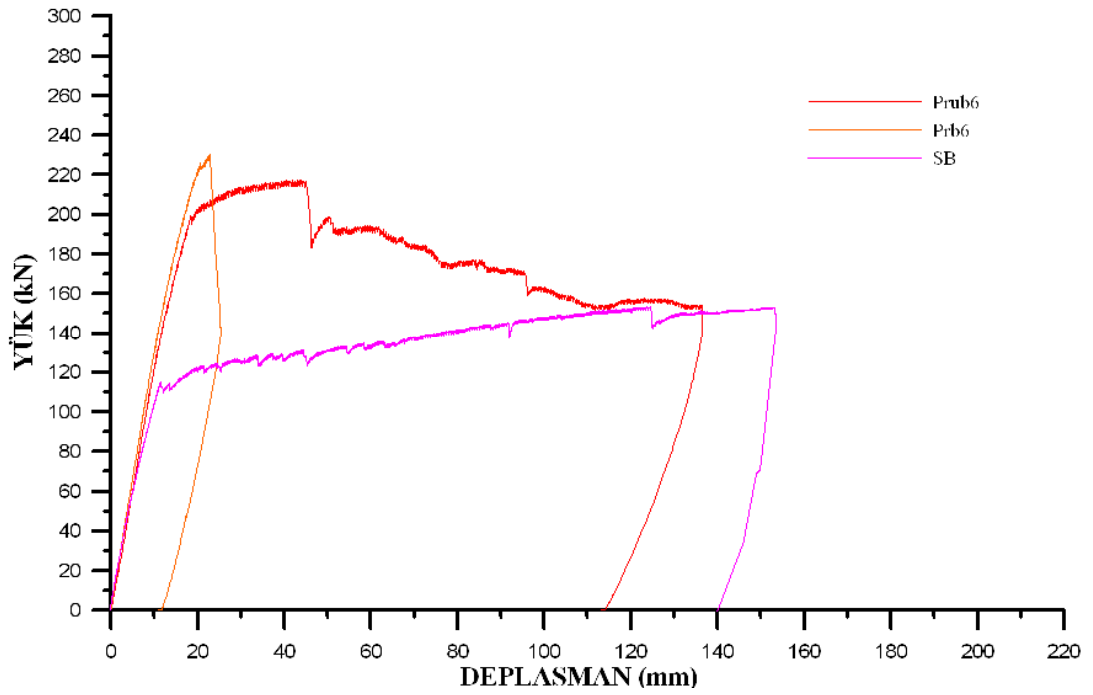
Delikli çelik levha kullanılarak onarılmış PRb6 ve PRub6 deneyleri incelendiğinde PRb6 deney elemanında süneklik levhanın aderans çözümleri nedeniyle yüzeyden sıyrılıp düşmesi sonucunda düşük seviyede kalmıştır. Bu nedenle PRub6 deneyi; yan yüz kullanılarak denenmiştir. Deney sonucunda hasarlı bir birliğin onarılması sonucunda süneklik oranı 6 olarak belirlenmiştir. Bu değer istenilen süneklik şartını sağlamaktadır. Şekil 5.4.'te delikli çelik levha ile onarılmış kirişlerin yük-deplasman grafikleri belirtilmiştir.



Şekil 5.2. Yalnızca alt yüzden düz çelik levha yapıştırılarak ve alt yüzden bulon ile desteklenmiş deney elemanları yük-deplasman grafikleri



Şekil 5.3. 6 mm'lik düz çelik levha ile onarılmış/güçlendirilmiş kirişlerin yük deplasman grafikleri



Şekil 5.4. 6 mm'lik delikli çelik levha ile onarılmış kirişlerin yük deplasman grafikleri

5.4. Enerji Tüketimi

Betonarme yapıların tasarımında dayanımın yanı sıra sünek bir davranış sergilenmesi istenmektedir. İlk bakışta dayanım ve süneklik kavramları birbirine zıt olarak algılanabilmektedir. Ancak, betonarmenin davranışını iyi bilen bir tasarımcının bu iki kavramı birbiriyle uyumlu ve tutarlı kılacak çözümler geliştirmesi mümkündür. Bir eleman için sadece elastik bölge içerisinde büyük kuvvetlere çıkılması önemli değildir. Önemli olan elastik bölge dışında bile taşınabilen sünek bir davranışın sergilenebileceği bir yük değerine ulaşmaktır. Bu ise uygun donatı oranına bağlıdır. Betonarme kirişlerin donatı hesabında sünek davranışın sergilenebilmesi açısından üst sınır olarak 0,85pb değerinin aşılması istenmektedir. Bu sınırın yetersiz olduğu durumlarda kesit büyütülmeli veya çift donatılı çözüm yapılmalıdır. Bütün bu değerlendirmeler sonucunda betonarme bir elemanın yeterli bir dayanım ve sünekliğin her ikisini de aynı anda sağlaması durumunda en yüksek enerji tüketimi kapasitesine ulaşacağı görülmektedir.

Betonarme yapıların deprem etkisi altında maruz kaldığı dış yükler nedeniyle ortaya çıkan enerjinin tüketilmesi gerekmektedir. Ekonomik bir çözüm için, enerjinin büyük bir kısmının elastik bölge dışında tüketilebilmesi gerekmektedir. Böyle bir çözümde enerji tüketimi kapasitesi en üst seviyede sağlanacaktır.

Deney elemanlarının toplam enerji kapasiteleri elemanlara ait yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır. Çizelge 5.3.' te elemanlara ait toplam enerji tüketilebilme kapasiteleri ve toplam enerji oranları verilmiştir.

Sbb1,5 deney elemanı Sbb3 elemanına göre daha yüksek bir süneklik sergilediği halde, Sbb3 deney elemanında akma yükü daha üst seviyeye ulaştığı için daha yüksek enerji tüketilmiştir. Buradan hareketle süneklik oranı tek başına enerji tüketimi kapasitesini belirlemede yeterli değildir. Elemanın akma dayanımının da süneklik oranı ile beraber üst seviyelerde olması gerekmektedir. Sbb3 deney elemanında yalın kirişin 2 katından fazla enerji tüketimi kapasitesi elde edilmiştir.

Çizelge 5.3'te de görüleceği gibi, Sub6 deney elemanında enerji tüketimi kapasitesi yalın kirişten daha düşük olarak gerçekleşmiştir. Elemanda yüksek yük değerlerine ulaşıldığı halde, akma gerçekleşmediği için bu yük elastik bölge dışında taşınamamıştır. Akmanın gerçekleşmemesi kullanılan çelik levha alanının TS500 de üst sınır olarak verilen 0,85pb değerini aşmasından değil, yan yüz levhalarının sıyrılmayı engelleyememesinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlar doğrultusunda Rub6 onarım deneyi yapılmış ve akma başarı ile gerçekleşerek yalın kirişin 2 katı enerji tüketimi elde edilmiştir.

Hasarlı kirişlerin rehabilitasyonu kapsamında delikli çelik levhalar ile hazırlanan elemanlar incelendiğinde yan yüz kullanılmayan PRb6 deney elemanında akma gerçekleşmemiş ve enerji tüketimi kötü çıkmıştır. Devamında yan yüz kullanılarak hazırlanan PRub6 deney elemanında akma gerçekleşmiş ve onarım kirişi olmasına rağmen yalın kirişin üzerinde enerji tüketimi kapasitesi elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

Deney Elemanı	Toplam Enerji (Joule)	Toplam Enerji Oranı
SB	20994	1,00
Sbb1,5	28248	1,35
Sbb3	44832	2,14
Sub6	15097	0,72
Rub6	36961	1,76
PRb6	3796	0,18
PRub6	23395	1,11

5.5. Eğilme Rijitliği

Eğilme rijitliğinin hesaplanmasında moment eğrilik grafiğinin eğimi dikkate alınmaktadır. Deneysel olarak moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesi çok zordur. Bunun nedeni, ölçüm yapılan bölgenin sınırlı olması ve 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 deney elemanları arasında bir karşılaştırma yapılacağı düşünüldüğünde yapılan kabul çokta sakıncalı değildir.

Rijitlik değerleri yük-deplasman eğrilerindeki akma anındaki yük değerinin deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.4'te elemanların rijitlik değerleri ve yalın kiriş rijitliği 1 alınarak diğer elemanların rijitlik oranları verilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde tüm elemanların eğilme rijitliği yalın kirişe oranlara daha yüksek çıkmıştır. Onarım kirişlerinin eğilme rijitliği güçlendirilmiş kirişlere nazaran daha düşük olmuştur. Buda onarım kirişlerinin hasarlı olması ile doğrudan ilişkilidir.

Çizelge 5.4. Deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları

Deney Elemanı	Rijitlik Ölçüsü (P/δ_y)	Göreceli Rijitlik
SB	8,85	1,00
Sbb1,5	15,96	1,80
Sbb3	17,66	2,00
Sub6	37,30	4,22
Rub6	18,40	2,08
PRb6	13,17	1,49
PRub6	12,00	1,36

5.6. Uysal, A' nın [1] Çalışması ile Karşılaştırma

Bu kısımda, çelik levhalar ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin rehabilitasyonu çalışması ile Uysal'ın yaptığı delik çelik levhalar ile kirişlerin güçlendirilmesi karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Karşılaştırma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda düz levha ile yapılan güçlendirme, Uysal'ın yaptığı delikli levha kullanılarak yapılan güçlendirme ile karşılaştırılmıştır. İkinci kısımda ise delikli levha kullanılarak onarılan kirişlerin davranışı, Uysal'ın delikli levha kullanarak güçlendirdiği kirişlerin davranışı ile karşılaştırma yapılmıştır. Ek-1'de Uysal'ın çalışmasına ait çizelgeler ve yük-deplasman grafikleri verilmektedir.

5.6.1 Düz ve delikli levhalar ile yapılan güçlendirmelerin karşılaştırılması

Sbb1,5 deney elemanında kullanılan düz güçlendirme levhasının enkesit alanı 276 mm^2 , Uysal'ın Psbb3 deney elemanında kullanılan delikli çelik levhanın enkesit alanı 360 mm^2 olmaktadır. Süneklik yönünden PSbb3 deney elemanı daha iyi bir davranış göstermiştir. Sbb1,5 deney elemanında kullanılan levha alanı az olmasına rağmen, levhanın yırtılarak kopması nedeniyle daha yüksek süneklik değeri elde edilememiştir. Bunun nedeni bulon deliklerinin kesiti zayıflatmasıdır. Elde edilen bu sonuçlar incelendiğinde, sadece alt yüzden düz levha kullanılması durumunda bulonlu uygulamaya karar verilirken levha kalınlığı dikkate alınmalıdır.

Sbb3 deney elemanında kullanılan düz güçlendirme levhasının enkesit alanı 552 mm^2 , Uysal'ın Psbb6 deney elemanında kullanılan delikli çelik levhanın enkesit alanı 720 mm^2 olmaktadır. Deney sonuçlarına bakıldığında, enkesit alanı az olan Sbb3 elemanı ile PSbb6 elemanı aynı akma yüküne (200 kN) sahiptir. PSbb6 deney elemanının süneklik oranı 13,1, Sbb3 deney elemanının süneklik oranı ise 11,6 olarak tespit edilmiştir. Uysal'ın süneklik oranı biraz fazla çıkmıştır ancak, Sbb3 deney elemanı PSbb6 elemanına göre daha fazla deformasyon yapmıştır. Buda Sbb3 deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin daha fazla olmasını sağlamıştır.

PSbb3 deney elemanının enerji tüketebilme kapasitesi 39293 joule, Sbb3 deney elemanının enerji tüketme kapasitesi 44832 joule'dur.

5.6.2 Delikli levhalar ile yapılan onarım ve güçlendirmelerin karşılaştırılması

Aynı kesitli PRub6 deney elemanı ile Uysal'ın PSub6 deney elemanları karşılaştırıldığında hasarlı kirişin onarılması sonucunda, güçlendirilmiş kiriş ile aynı akma yüküne ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ancak, Uysal'ın PSub6 deney elemanı süneklik olarak daha iyi sonuç vermiştir. Bu sonuç, hasarlı kirişten yüksek bir süneklik oranı beklenmemesi açısından normal bir sonuçtur. Yinede hasarlı kirişin onarılması ile süneklik oranı 6 olarak elde edilebilmiş ve bu oran onarım açısından oldukça yeterli olmuştur.

5.8. Karahan, S.'nin Çalışması ile Karşılaştırma

Çalışmasında çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Farklı kalınlıklardaki çelik levhaların alt yüzden kiriş yüzeyine direk olarak yapıştırılması ele alınmıştır. Karahan'ın deney elemanları bu çalışmadaki deney elemanları ile aynı malzeme ve boyut özellikleri sahip olup levhaların alt yüzden bulonla desteklenmesinin davranış üzerine etkisi bu kısımda karşılaştırılmıştır. Ek-2'de Karahan'ın çalışmasına ait deney grafikleri ve çizelgeleri sunulmuştur.

Bu çalışmada Sbb1,5 elemanının süneklik oranı 13,46 olarak tespit edilmiştir. Karahan'ın alt yüzden direkt yapıştırılmış Sb1,5 deney elemanındaki süneklik oranı ise 18,57 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında Sbb1,5 elemanında bulon kullanılması enkesit alanını azaltmış ama beklenen süneklik artışı meydana gelmemiştir. Bunun nedeni, levhanın kesit alanının azalması sonucu kopması sınırına ulaşılmasıdır. Karahan'ın elemanında daha yüksek süneklik elde edilmiştir.

Sbb3 deney elemanında süneklik oranı 11,57, Sb3 deney elemanında ise süneklik oranı 9,44 olarak belirlenmiştir. Önceki kısımda incelenen 1,5 mm’lik çelik levhadan beklenen süneklik artışı kopmanın meydana gelmesi nedeniyle sağlanamamıştı. 3 mm’lik çelik levhalar incelendiğinde ise kesit alanının azalması kopmayı gerçekleştirebilecek düzeyde olmadığından bulon kullanılması sünekliğin artmasında olumlu yönde etkili olmuştur.

Bulon kullanılması beton ile çelik levha arasındaki aderans çözümlerini geciktirdiğinden dolayı süneklikte artışa neden olmuştur. Ancak, ince levhalarda bulon kullanılması kopmanın gerçekleşmesinden dolayı aderans çözümlerine olan katkısı tek başına yeterli olmamıştır. İnce levhaların kullanılması durumunda, kesitin zayıflamasına neden olmayan ve kopmayı meydana getirmeyecek bulon tasarımı yapılmalı veya bulon kullanılmamalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Betonarme yapıların tasarımında, dayanımın yanı sıra sünek bir davranışın sergilenmesi özellikle istenmektedir. Sünek bir davranış ancak; uygun eğilme donatısı kullanmak, yeterli sargı donatısı kullanmak, uygulamaya dönük anlaşılabilir detaylandırma yapmak ve elemanın kesme kapasitesinin eğilme kapasitesinden yüksek olmasını sağlayacak şekilde tasarım yaparak kırılmanın eğilme kapasitesinin aşılmasıyla gerçekleşmesiyle oluşturulabilir.

Yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin donatı hesabında güçlendirme levhaları da dikkate alınarak sünek bir davranışın sergilenebilmesi açısından üst sınır olarak TS500 de belirtilen 0,85pb değeri içerisinde tasarımlar yapılmıştır. Sargı donatısı olarak, elemanın eğilme kapasitesini artırırken kesme dayanımını yetersiz kılmayacak sargı donatısı belirlenmiştir. Sık etriye kullanılması neticesinde elemanın, deneysel çalışmada beklenen maksimum yük sınırlarında bile sadece kesme kapasitesinden dolayı ortaya çıkması muhtemel göçmenin önüne geçilmiştir. Bu da bize deneysel çalışmanın sadece eğilme kapasitesinin incelenmesi açısından uygun bir ortam sağlamıştır.

Deney elemanlarının tamamında güçlendirme/onarım malzemesi olarak epoksi, çelik levha, bulon gibi temin edilmesi kolay ve ekonomik malzemeler kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda incelenen iyileştirme yönteminin uygulamada kendini yansıtabilmesi açısından kolaylık sağlayacak çözümler geliştirilmiştir. Uygulama alanları dikkate alındığında, kısa zamanda tamamlanacak ve ekonomik olacak şekilde bir yöntem olduğu söylenebilir.

Yapılan deneysel çalışmada hazırlanan kirişler, boyutları, eğilme donatısı, basınç donatısı, sargı donatısı ve malzeme özellikleri aynı olacak şekilde oluşturulmuştur.

Deney sonuçları, kirişlerin içerisindeki eğilme donatısı oranı dikkate alınarak incelenmelidir. İncelenen kirişlerde eğilme donatısı oranı minimum donatı oranına yakın olup, kullanılacak çelik levha kalınlığının bu oran dikkate alınarak belirlendiği özellikle bilinmelidir. Deneysel sonuçların, mevcut donatı oranı daha yüksek olan kirişler için düşünüldüğünde, betonarmenin davranışından da bilindiği gibi aynı sonuçları vermesi mümkün değildir. Dolayısıyla bu bölümde açıklanan sonuçlar elemanların sınırlı sayıda olması ve elemanların eğilme donatısı ile ilişkili olup bu çerçevede ele alınmalıdır.

Deneysel çalışmada 1 yalın, 3 güçlendirme ve 3 onarım elemanı olmak üzere toplam 7 adet deney yapılmıştır. Çalışmanın konusu olan çelik levhalar ile onarılmış/güçlendirilmiş kirişlerin rehabilitasyonu açısından yapılan deneylerden aşağıda maddeler halinde belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Epoksi ile gerçekleştirilen yapıştırma yöntemi tüm deneylerde yapıştırma tekniği açısından başarılı sonuçlar vermiştir.
2. Güçlendirilmiş deney elemanlarında levha kalınlığının artması ile dayanımda artış gözlenmiş ancak, kalın levha kullanılan Sub6 deney elemanında referans kirişin taşıma kapasitesinin çok üzerinde bir dayanım gerçekleşmesine rağmen, levhanın uç kısımlarında kayma gerilmelerinden dolayı meydana gelen sıyrılmanın yeterince önlenememesi nedeniyle akma gerçekleşmemiş ve yük taşıma kapasitesinde ani düşüş gözlenmiştir. Bu gözlem sonucunda yapılması gereken, güçlendirmede kalın levha kullanılması halinde yükteki bu artışın, akmanın gerçekleşmesiyle sünek bir davranışın elde edilebilmesi açısından sıyrılmaya karşı uç kısımlarda uygun yan yüz levha kullanılması gerekmektedir.
3. Alt yüzden düz çelik levha kullanılarak bulonla desteklenen güçlendirilmiş deney elemanlarından yeterli süneklik elde edilmiştir. 1,5 mm'lik ince çelik levha kullanılması durumunda bulon uygulanması süneklik yönünden bulonsuza göre daha düşük sonuç vermiştir. Bunun oluşmasında ince levhada bulon

kullanılmasının kesiti zayıflatması ve bu suretle kopmanın daha önceden gerçekleşmesidir. Dolayısıyla ince levha ile yapılacak güçlendirmelerde bulon kullanılması uygun sonuç vermemektedir.

4. Deneysel çalışma içerisinde orta kalınlıkta tabir edilecek 3mm kalınlığındaki çelik levha ile bulonlu olarak yapılan güçlendirmede bulonsuz olarak yapılan güçlendirmeye karşı daha iyi bir süneklik oranı elde edilmiştir. Bu da bize ince levhaların dışında bulon kullanılmasının sünekliği arttırdığını göstermektedir.
5. Sadece alt yüzden bulonla desteklenerek yapılan güçlendirme yönteminde levhanın delikli veya düz olması incelendiğinde, ince levha kullanılması durumunda delikli levhanın dayanım, süneklik ve enerji tüketimi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
6. 3mm kalınlığında düz çelik levha kullanılarak bulonla desteklenmiş deney elemanı ile 6 mm kalınlığında delikli çelik levha kullanılarak bulonla desteklenen eleman karşılaştırıldığında, enkesit alanı az olan düz levha yapıştırılmış eleman ile delikli levha yapıştırılmış eleman aynı akma yüküne sahiptir. Delikli levha kullanılan eleman daha sünek davranmıştır. Ancak, enerji tüketimi yönünden incelendiğinde, düz levha kullanılan elemanın daha fazla yerdeğiştirme yapmasından dolayı enerji tüketiminin daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, delikli çelik levhadaki deliklerin çekme kuvvetine maruz kalması ile ovalleşerek akma yükünü daha öne almasıdır. Levha kalınlığının dikkatli seçildiği durumlarda, alttan bulonla desteklenmiş düz levhanın çok iyi sonuçlar verdiği belirtilmelidir.
7. Güçlendirme elemanlarında levha kalınlığının artması ile eğilme rijitliklerinde beklenen artışlar gözlenmiştir.
8. Hasarlı kirişlerin onarımı kapsamında hazırlanan deney elemanlarından yan yüz kullanılmadan 6mm'lik delikli levha ile yapılan onarım yöntemi elemandaki

dayanım ve süneklik açısından uygun sonuç vermemiştir. Bunun nedeni, levhanın aderans çözümlerinden dolayı sıyırılmasıdır. Sıyırılma öncelikle orta bölgeden başlamış yan yüz levha kullanılmadığı için uç kısımlara ilerleyerek sıyırılma gerçekleşmiştir. Sıyırılmanın önlenmesi için uç kısımlarda yan yüz levha kullanılması gerekmektedir.

9. Onarım kirişlerinde alttan 6mm kalınlığında delikli levha kullanılması ve uçların sıyırılmaya karşı tutulması durumunda normal süneklik elde edilmiş ve hasarsız kirişe oranla %92 dayanıma ulaşılmıştır. Bu şekilde, delikli levha kullanarak uçların tutulması ile onarım yapılması etkili sonuçlar vermektedir.
10. Çalışmada onarım elemanlarında alttan düz levha kullanılması ve uçların sıyırılmaya karşı yüksek yan yüz levhaları ile enkesit boyuca bulonlarla desteklenmesi durumunda normal süneklik elde edilmiş ve hasarsız kirişe oranla %83 dayanım elde edilmiştir. Burada hasarlı kirişin hasar derecesinin de deney sonucundaki etkisi dikkate alındığında elde edilen dayanımın son derece iyi olduğu söylenebilir.
11. Onarılmış kirişlerin eğilme rijitlikleri incelendiğinde tüm elemanların yalın kirişe oranla daha yüksek eğilme rijitliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Onarılmış kirişlerin güçlendirilmiş kirişlere göre eğilme rijitlikleri incelendiğinde %50'ye varan azalmalar görülmektedir. Bu sonuç kirişlerin hasar dereceleri ile ilgilidir.
12. Betonarme kirişlerin onarım/güçlendirilmesinde levha kalınlığının artması ile mesnede yakın levha uçlarında sıyırılmanın önlenmesi için yan yüz levha kullanılması gerekmektedir. Yan yüz levhaların kiriş yüksekliği boyunca döşeme altına kadar uzatılması ve kullanılan bulonun paspayı üzerinden kirişin enkesiti boyunca (karşıdan karşıya) uzatılması önerilen bir yöntemdir. Yan yüz levha genişliği hesaplarda elde edilecek bulon sayısı ile orantılı olduğundan kesin bir oran verilememektedir. Ancak minumun 500mm genişliğinde olması tavsiye edilmektedir.

13. Betonarme kirişlerinin güçlendirme/onarım aşamasında kullanılacak levha kalınlığının belirlenmesinde betonarmede monolitik kirişler için uygulanan taşıma gücü yöntemi kullanılabilir.

6.2. Uygulamaya Yönelik Öneriler

Çelik levhalar ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin rehabilitasyonu kapsamında uygulamaya yönelik yapılması gereken öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. Güçlendirilecek/onarılacak kirişin alt yüzündeki sıva tabakası kaldırılmalı ve yüzeyi temizlenmelidir. Gerekli görülmesi durumunda tamir harçları kullanılarak yüzey düzeltilmelidir.
2. Kullanılacak yapıştırma malzemesinin karışımı dikkatli bir şekilde hazırlanmalı ve belirtilen sürede uygun kalınlıkta sürülmelidir. Elemanda yapışmayan kısım kalmayacak şekilde işlem uygulanmalıdır.
3. Çelik levhanın epoksi ile yüzeye yapıştırılması sırasında uygulamadaki sıkıntı dikkate alındığında sıkıştırma işlemi için ön hazırlıklar iyi tasarlanmalıdır. Uygulamada karşımıza çıkabilecek en önemli sorun yeterli yapışmanın sağlanamamasıdır. Dolayısıyla yeterli desteklemenin yapılması gerekmektedir.
4. Yapıştırıcı prizini almadan destek elemanları kesinlikle alınmamalıdır.
5. Çelik levha yüzeye yapıştırılmadan önce üzerinde bulunabilecek kir, pas ve özellikle yağ tabakaları iyice temizlenmeli ve kurutulmalıdır.
6. Bulun uygulanması durumunda, mevcut kirişin donatı yerleşiminin metal detektörle tespiti yapılmalı ve mevcut donatılara hiçbir şekilde zarar verecek

müdahalede bulunulmamalıdır. Gerekirse bulon aralıklarında şaşırtma yapılmalıdır.

7. Yan yüzden bulon uygulanması durumunda yan yüz levha yüksekliği kirişin yüksekliğinin yarısını geçmeli ve alt hizadaki bulon yeri çekme donatısının üzerinde kalacak şekilde belirlenmelidir. Buradaki amaç uç kısımlardaki sıyrılmanın engellenmesini sağlamaktır.
8. Çelik levha uygulaması yapıldıktan sonra korozyona karşı koruyucu önlemlerin alınması gerekmektedir.
9. Güçlendirme sonrasında kirişin davranışını bozabilecek dış etkiler (askı yükleri) oluşturulmamalıdır.
10. Güçlendirme levhalarının yangına karşı korunması amacıyla gerekli önlemler alınmalıdır.

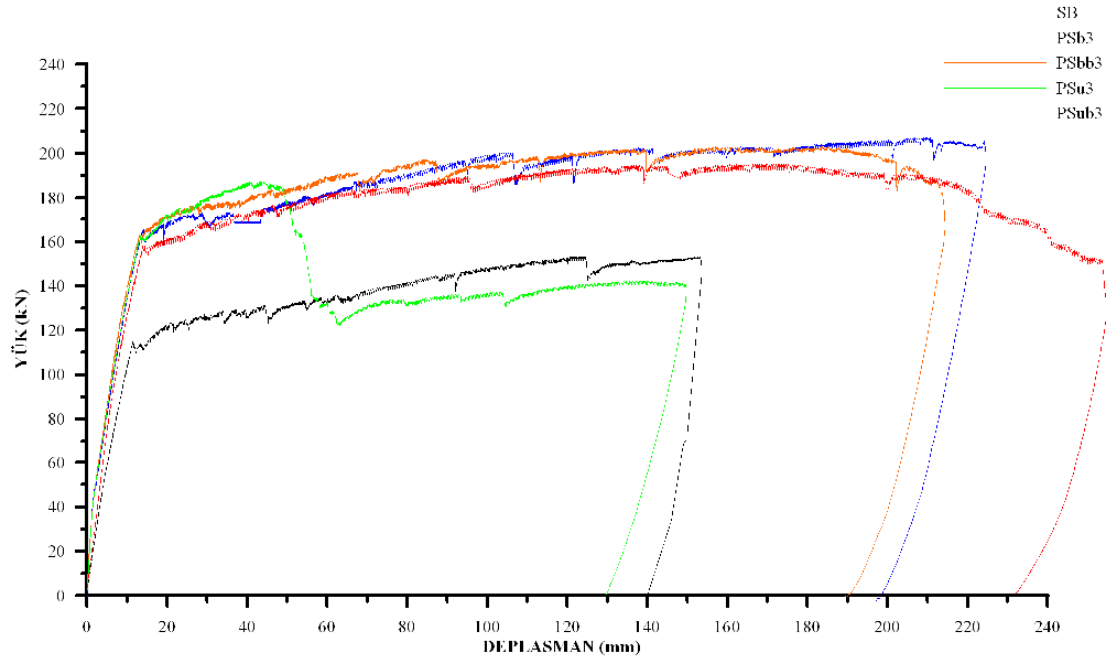
KAYNAKLAR

1. Ünsal, T.Ç., “Güçlendirilmiş betonarme kirislerin davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 16-28 (1989)
2. Çelikel, T.F., “Güçlendirilmiş betonarme kirislerin yinelenir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 19-24 (1991)
3. Özdemir, İ., “Onarılmış betonarme kirislerin tersinir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 18-27 (1994)
4. Aykaç, S., “Onarılmış/Güçlendirilmiş betonarme kirislerin deprem davranışı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-54, (2001)
5. Arslan, M., “Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-69 (1991)
6. Uysal, A., “Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 59-75 (2006)
7. Arslan G., Sevuk F., Ekiz I., “Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams”, **Construction and Building Materials**, 22: 143-153 (2008)
8. Oehlers, D.J., Park, S.M., Mohammed Ali, M.S., “A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs”, **Composites**, Part A 34: 887-897 (2003)
9. Baluch, M. H., Ashrafuddin, M., Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Azad, A. K., Khan, A. R., “Peeling and diagonal tension failures in steel plated RC beams”, **Construction and Building Materials**, 13: 459-467 (1999)
10. Altin, S., Anil, Ö., Kara M.E., “Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates”, **Engineering Structures**, 27: 781-791 (2005)
11. Oh, B.H., Cho, J.Y., Park, D.G., “Static and Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel Plates for Flexure”, **Journal of Structural Engineering**, 129: 527-535 (2003)

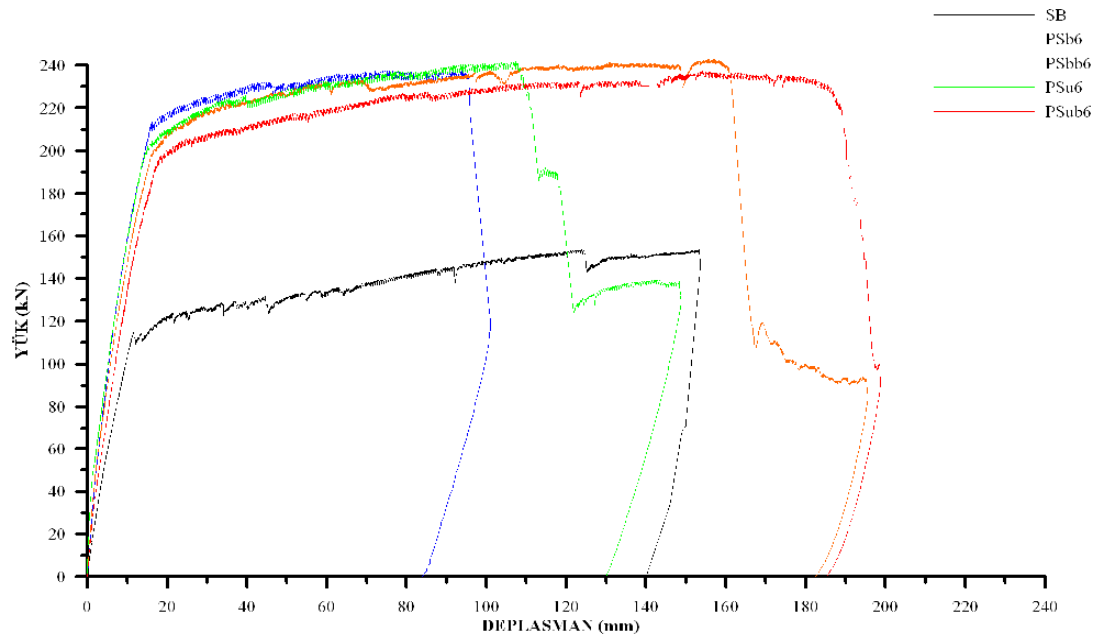
12. Baglin, P.S., Barnes, R.A., Mays, G.C., Subedi, N.K., “External steel plate systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams”, *Engineering Structures*, 23: 1162–1176 (2001)
13. Barnes, R.C., Mays, G.C., “Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1 – Experimental programme”, *Construction and Building Materials*, 20: 396–402 (2006)
14. Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J., Park, S.M., “Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams”, *Composites*, Part A 32:1319-1328 (2001)
15. Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Sano, M., “Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis”, *Construction and Building Materials*, 14: 237-244 (2000)
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. Swamy, R.N., Jones, R., Charif, A., “The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams”, *Structural Engineer*, 67: 45- 54 (1989)
18. Hussain, M., Sharif, A., Basunbul, I.A., Baluch, M.H., Al-Sulaimani, G.J., “Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates”, *ACI Structural Journal*, 92: 14-22 (1995)
19. Ritchie, P.A., Thomas, D.A., Lu, L., Connelly, G.M., “External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics”, *ACI Structural Journal of Structural Engineering*, 88: 490-499 (1992)
20. Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, A., Baluch, M.H., Ghaleb, B.N., “Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP”, *ACI Structural Journal of Structural Engineering*, 91: 160-167 (1994)
21. Quantrill, R.J., Hollaway, L.C., Thorne, A.M., *Magazine of Concrete Research*, 48: 331-341 (1996)
22. Norris, T., Saadatmanesh, H. Ehsani, M.R., “Shear and Flexural Strengthening of RC Beams with Carbon Fiber Sheets”, *Journal of Structural Engineering*, 123: 903-911 (1997)

EKLER

EK-1. Uysal, A.'ın [6] çalışmasına ait grafik ve çizelgeler



Şekil 1.1. Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri (3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği)



Şekil 1.2. Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri (6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği)

EK-1.(Devam) Uysal, A.'ın [6] çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

Çizelge 1.1. Uysal'ın deney elemanlarının süneklik oranları

Deney Elemanı	Süneklik Oranı ($\delta u / \delta y$)	Göreceli Süneklik
SB	16,8	1,00
PSb3	20,9	1,24
PSb6	7,7	0,46
PSbb3	21,5	1,28
PSbb6	13,1	0,78
PSu3	4,8	0,29
PSu6	9,7	0,58
PSub3	20,2	1,20
PSub6	13,3	0,79

Çizelge 1.2. Uysal'ın deney elemanlarına ait taşıma güçleri tablosu

Deney Elemanı	Akma Yüğü P_y (kN)	Kopma Yüğü P_u (kN)
SB	113	152
PSb3	165	204
PSb6	207	235
PSbb3	163	203
PSbb6	200	241
PSu3	162	---
PSu6	202	240
PSub3	160	185
PSub6	195	235

EK-1.(Devam) Uysal, A.'ın [6] çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

Çizelge 1.3. Uysal'ın deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

Deney Elemanı	Toplam Enerji (Joule)	Toplam Enerji Oranı
SB	20536	1,00
PSb3	41968	2,04
PSb6	21244	1,03
PSbb3	39997	1,95
PSbb6	39293	1,91
PSu3	21529	1,05
PSu6	29408	1,43
PSub3	45089	2,20
PSub6	42022	2,05

Çizelge 1.4. Uysal'ın deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları

Deney Elemanı	Rijitlik Ölçüsü ($P/\delta y$)	Göreceli Rijitlik
SB	9,99	1,00
PSb3	13,11	1,31
PSb6	14,74	1,48
PSbb3	14,90	1,49
PSbb6	13,73	1,37
PSu3	13,36	1,34
PSu6	15,19	1,52
PSub3	12,42	1,24
PSub6	12,20	1,22

EK-2 Karahan, S.'nin çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

Çizelge 1.1. Karahan, S'nin deney elemanlarının süneklik oranları

Deney Elemanı	Süneklik Oranı ($\delta u / \delta y$)	Göreceli Süneklik
SB	16,82	1,00
Sb1,5	18,57	1,10
Sb3	9,44	0,56
Sb3,6	9,00	0,54
Sb4,5	---	---
Su4,5	10,36	0,62
Sb6	---	---

Çizelge 1.2. Karahan, S'nin deney elemanlarına ait taşıma güçleri tablosu

Deney Elemanı	Akma Yüğü Py (kN)	Kopma Yüğü Pu (kN)
SB	115	152
Sb1,5	162	205
Sb3	210	258
Sb3,6	183	228
Sb4,5	---	---
Su4,5	240	282
Sb6	---	---

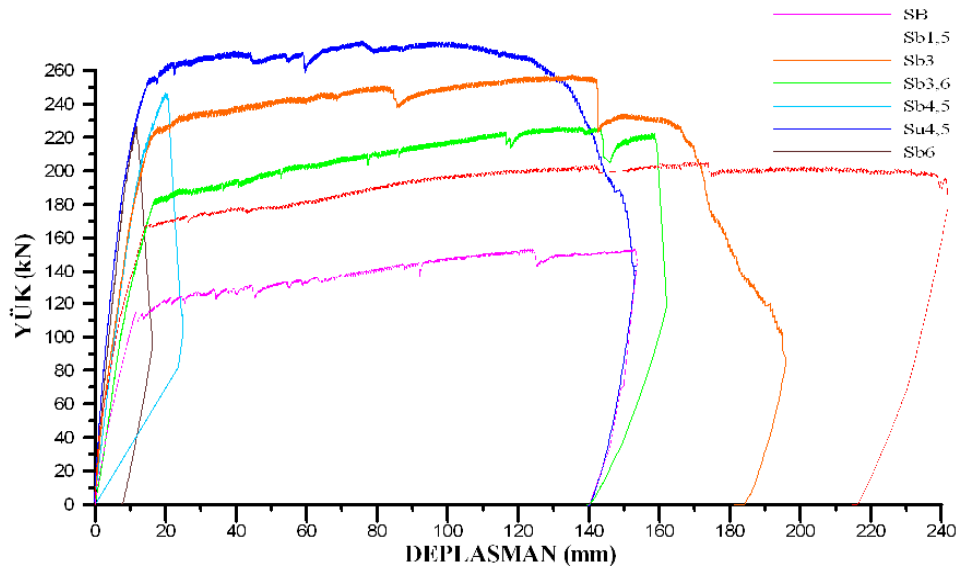
Çizelge 1.3. Karahan, S'nin deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

Deney Elemanı	Toplam Enerji (Joule)	Toplam Enerji Oranı
SB	20994	1,00
Sb1,5	46602	2,22
Sb3	43728	2,08
Sb3,6	32240	1,54
Sb4,5	3952	0,19
Su4,5	39200	1,87
Sb6	2290	0,11

EK-2.(Devam) Karahan, S.'nin çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

Çizelge 1.4. Karahan, S'nin deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları

Deney Elemanı	Rijitlik Ölçüsü (P/δ_y)	Göreceli Rijitlik
SB	8,85	1,00
Sb1,5	10,38	1,17
Sb3	11,54	1,30
Sb3,6	10,17	1,15
Sb4,5	12,92	1,46
Su4,5	16,55	1,87
Sb6	21,51	2,43



Şekil 1.1. Karahan'ın tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYAR, Sinan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 03.08.1981, Trabzon
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (533) 713 86 05
e-mail : kayar01@mynet.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Yılı

Lisans	Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	Ankara Çankaya 50.Yıl Lisesi	1998

Yabancı Dil

İngilizce

İlgi Alanları

Betonarme Yapılar, Betonarme Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi