

**BETONARME KİRİŞLERİN
ÇELİK LEVHALAR İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

Servet KARAHAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2008

ANKARA

Servet KARAHAN tarafından hazırlanan BETONARME KİRİŞLERİN ÇELİK LEVHALAR İLE GÜÇLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Öğr. Gör. Dr. Bengi AYKAÇ

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

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. Bengi AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA

Mimarlık, 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.

Servet KARAHAN

**BETONARME KİRİŞLERİN ÇELİK LEVHALAR
İLE GÜÇLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Servet KARAHAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2008**

ÖZET

Bu çalışmada, çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma, biri yalın, altısı güçlendirilmiş kiriş olmak üzere toplam yedi adet 1/1 ölçekli kiriş modeli ile gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları iki noktalı tek düze yükler altında test edilmiştir. Çalışmada, çelik levha kalınlığının, yapıştırma yöntemi etkinliğinin ve yan yüz çelik levha kullanımının davranış üzerine etkileri ele alınmıştır. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, çelik levha kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin yeterli davranış sergilediği görülmüştür.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : Güçlendirme, betonarme kiriş, çelik levha, epoksi
Sayfa Adedi : 87
Tez Yöneticisi : Öğr. Gör. Dr. Bengi Aykaç,
Öğr. Gör. Dr. Sabahattin Aykaç

**STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS
WITH STEEL PLATES
(M.Sc. Thesis)**

Servet KARAHAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
July 2008**

ABSTRACT

Experiments for flexural strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded steel plates were carried out. Seven 1/1 scaled reinforced concrete beams including one reference and six strengthened beams were tested under two point monotonic loading. In this study, main parameters considered were plate thickness, efficiency of bonding method and using side face steel plates. On basis of the experimental study, the performance of the specimens were evaluated as regards strength, ductility, energy dissipation and stiffness. At the end of the study, it was observed that satisfactory behaviors can be achieved with using epoxy bonded steel plate for strengthening of reinforced concrete beams.

Science Code : 911.1.144

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

Page Number: 87

**Adviser : Öğr. Gör. Dr. Bengi Aykaç,
Öğr. Gör.Dr. Sabahattin Aykaç**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde beni yönlendiren değerli hocalarım Dr. Bengi AYKAÇ ve Dr. Sabahattin AYKAÇ' a, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Araştırma Görevlileri Şule BAKIRCI ER, Eray ÖZBEK, Mahmut Cem YILMAZ ve Uzman Faruk OGÜN'e teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmada beraber emek sarf ettiğimiz değerli arkadaşım Sinan KAYAR ve burada isimlerini sayamadığım emeği geçen herkese teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. AMAÇ VE KAPSAM.....	3
3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	24
4.1. Deney Programı.....	24
4.2. Deney Elemanları.....	25
4.3. Malzeme Özellikleri ve Dayanımları	34
4.4. Yapıştırma Tekniği	36
4.5. Deney Düzeni.....	36
4.5.1. Deney çerçevesi	36
4.5.2. Yükleme düzeni.....	37
4.5.3. Ölçüm düzeni.....	41
4.6. Deneyler.....	43
4.6.1. SB referans(yalın) kirişi.....	43

	Sayfa
4.6.2. Sb1,5 güçlendirilmiş giriş.....	45
4.6.3. Sb3 güçlendirilmiş giriş.....	46
4.6.4. Sb3,6 güçlendirilmiş giriş.....	48
4.6.5. Sb4,5 güçlendirilmiş giriş.....	49
4.6.6. Su4,5 güçlendirilmiş giriş.....	51
4.6.7. Sb6 güçlendirilmiş giriş.....	52
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	58
5.1. Genel	58
5.2. Taşıma Gücü.....	58
5.3. Süneklik.....	61
5.4. Enerji Tüketimi.....	64
5.5. Eğilme Rijitliği	65
5.6. Uysal, A' nın [1] Çalışması ile Karşılaştırma.....	67
5.7. Arslan, M.'nin [2] Çalışması İle Karşılaştırma.....	69
5.8. Kayar, S.'nin Çalışması İle Karşılaştırma.....	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	76
EKLER.....	79
EK-1.Uysal, A.'ın [1] çalışmasına ait grafik ve çizelgeler	80
EK-2 Arslan, M.'nin [2] çalışmasına ait grafikler	83
EK-3 Kayar, S.'nin çalışmasına ait grafik ve çizelgeler	85
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney elemanları.....	26
Çizelge 4.2. Yapıştırıcı(epoksi) özellikleri.....	35
Çizelge 4.3. Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT’lerin ölçüm amaçları.....	41
Çizelge 5.1. Teorik hesaplardan ve deneylerden elde edilen taşıma güçleri ve oranları.....	60
Çizelge 5.2. Deney elemanları süneklik oranları.....	61
Çizelge 5.3. Çelik levhalarda oluşan uzama ve kısalma miktarları.....	63
Çizelge 5.4. Deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri.....	64
Çizelge 5.5. Deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları.....	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Sb referans kiriş (yalın) detayı	27
Şekil 4.2. Sb1,5 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	28
Şekil 4.3. Sb3 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	29
Şekil 4.4. Sb3,6 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	30
Şekil 4.5. Sb4,5 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	31
Şekil 4.6. Su4,5 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	32
Şekil 4.7. Sb6 güçlendirilmiş kiriş detayı.....	33
Şekil 4.8. Deney düzeneği ön görünüş.....	38
Şekil 4.9. Deney düzeneği mesnet detayları.....	39
Şekil 4.10. Deney düzeneği yan görünüş.....	39
Şekil 4.11. Yükleme noktalarının yeri.....	40
Şekil 4.12. Ölçüm düzeneği a) ön yüzü b) arka yüzü.....	42
Şekil 4.13. Sb deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	44
Şekil 4.14. Sb1,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	45
Şekil 4.15. Sb3 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	47
Şekil 4.16. Sb3,6 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi	48
Şekil 4.17. Sb4,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi	50
Şekil 4.18. Su4,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi	51
Şekil 4.19. Sb6 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	53
Şekil 4.20. Sb deney elemanı (deney öncesi hasarsız durum).....	54
Şekil 4.21. Sb deney elemanı çatlak haritası.....	54
Şekil 4.22. Sb1,5 deney elemanı çatlak haritası	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. Sb3 deney elemanı çatlak haritası	55
Şekil 4.24. Sb3,6 deney elemanı çatlak haritası	56
Şekil 4.25. Sb4,5 deney elemanı çatlak haritası	56
Şekil 4.26. Su4,5 deney elemanı çatlak haritası	57
Şekil 4.27. Sb6 deney elemanı çatlak haritası	57
Şekil 5.1. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri.....	59
Şekil 5.2. Yalnızca alt yüzden çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş sünek davranış gösteren deney elemanları.....	62
Şekil 5.3. 4,5 mm'lik çelik levha ile güçlendirilmiş kirişin yan yüz kullanılarak güçlendirilmiş kiriş ile karşılaştırılması.....	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Sb deney elamanı.....	44
Resim 4.2. Sb1,5 deney elamanı.....	46
Resim 4.3. Sb3 deney elamanı.....	47
Resim 4.4. Sb3,6 deney elamanı.....	49
Resim 4.5. Sb4,5 deney elamanı.....	50
Resim 4.6. Su4,5 deney elamanı.....	52
Resim 4.7. Sb6 deney elamanı.....	53

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 tüm dünyada ve ülkemizde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Betonarmenin farklı mimarı tasarımlara imkân vermesi ve diğer taşıyıcı sistem elemanlarına oranla daha ekonomik olması tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Yoğun bir kullanım alanı bulan betonarme yapıların, projesinde ve yapımı esnasında oluşan hatalar, taşıyıcı sistemde yapılan değişiklikler, zamanla kullanım amacının değişmesi ve deprem gibi etkenler nedeniyle onarım/güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Betonarme yapılarda onarım, hasar gören yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ve diğer davranışlarının eski konumuna getirilmesine ya da daha da iyileştirilmesine denir. Güçlendirme ise, elemanın yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini hasar öncesi veya mevcut durumun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan iyileştirmedir. Burada amaçlanan, dayanım ve diğer taşıyıcı durumla ilgili olan değerleri hasardan önceki veya mevcut durumun üzerine çıkarmaktır.

Güçlendirme yapmak için yapının hasar görmesi gerekmemektedir. Yapıda herhangi bir hasar olmayıp da projelendirmede ve/veya imalatla yapılan bir kusurun varlığı, ya da daha evvelce konu edilmemiş ancak yapılan araştırmalar, edinilen deneyimler ve değişen deprem yönetmelikleri sonucu yapılmasına kesinlikle izin verilmeyen hususların giderilmesi için de güçlendirme yapılması gerekebilmektedir.

Betonarme elemanları güçlendirme üzerine değişik yöntemler araştırılmakta ve bunlardan bazıları günümüzde uygulanmaktadır. Güçlendirme yöntemlerine yalnızca elemanın teknik gereksinimleri değil, aynı zamanda uygulama kolaylığı, istenilen amaca uygunluk, uygulama süresi, yapı kullanımını kısıtlama ve ekonomik etkenleri de inceleyerek karar vermek gerekmektedir.

Betonarme yapı elemanlarından kirişlerin güçlendirilmesinde genellikle uygulanan yöntemler arasında; mevcut elemana ek beton katman ekleme, karbon elyaflarla sargılama ve çelik levha kullanımı yer almaktadır.

Bu çalışma kapsamında betonarme kirişlerin epoksi ile yapıştırılmış çelik levha ile eğilmeye karşı güçlendirilmesinin, elemanın dayanımı ve davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında biri yalın olmak üzere toplam yedi adet eleman test edilmiştir. Bu elemanlarda çelik levha kullanımının dayanım, süneklik ve enerji tüketimi kapasiteleri üzerine etkileri araştırılarak geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar neticesinde çelik levha kullanılarak yapılan güçlendirme yönteminin dayanım ve süneklik açısından uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Uygulama kolaylığı, uygulama süresi ve ekonomik olması da dikkate alındığında mevcut yöntemlere alternatif bir yöntem olabileceği görülmektedir.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Betonarme yapı elemanları içerisinde üzerindeki normal kuvvete göre eğilme momentinin çok daha etkin olduğu elemanlar kiriş olarak adlandırılmaktadır. Eğilme altındaki bir betonarme kirişte yüklerin düşük olması durumunda çekme bölgesindeki beton çatlamayabilir. Bu durumda donatı ve beton, kesitte oluşan çekme kuvvetini beraber taşır. Yüklerin artması durumunda beton çekme dayanımına ulaşacağından, çekme kuvvetini donatı taşıyacaktır. Mevcut elemana taşıyabileceğinden fazla yük gelmesi durumunda, mevcut donatılar yeterli olmayacaktır. Bu yetersizliklerin meydana gelmesi halinde elemanın eğilme kapasitesinin artırılması ihtiyacı doğacaktır.

Eğilme altındaki betonarme kirişlerin güçlendirilmesi gerektiği durumlarda çelik levha kullanımının etkilerinin nasıl olacağının araştırıldığı bu çalışmada aşağıda belirtilen amaçlar doğrultusunda deneyler yapılmıştır.

- Yapıştırma yönteminin etkinliği: Epoksi ile yapıştırılmış çelik levha kullanımının betonarme kirişlerin eğilme dayanımı ve davranışı üzerindeki etkilerinin nasıl olacağı,
- Güçlendirme levhası kalınlığı: Çelik levha kalınlığının davranış ve dayanım üzerindeki etkileri ve levha kalınlığının artırılmasının süneklik üzerinde hangi oranlarda değişmelere neden olacağı
- Güçlendirme levhasının yapıştırma yöntemi: Çelik levhaların kiriş alt yüzüne veya alt yüzüne yapıştırıldıktan sonra U şeklindeki levhaların kirişin alt yüzüne ve yan yüzlerine yapıştırılmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada hazırlanan kirişler yukarıda belirlenen amaçlar doğrultusunda boyutları, eğilme donatısı, basınç donatısı, sargı donatısı ve malzeme özellikleri aynı olacak şekilde oluşturulmuştur. İncelenen kirişlerde eğilme donatısı oranı, minimum donatı oranına yakın tutulup, kullanılacak çelik levha kalınlıkları maksimum donatı oranı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çalışmada, çelik levha kullanarak elemanın taşıma kapasitesi arttırılırken sünekliğinin de istenilen seviyede olması sağlanmaya çalışılmıştır.

Yukarıda belirtilen amaç ve kapsam doğrultusunda elde edilen bulgular geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılarak çelik levha kullanımının mevcut betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerindeki etkinliği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme kirişler öz ağırlıklar, ilave ağırlıklar, hareketli yükler, deprem etkileri gibi etkilere maruz kalabilirler. Bu etkiler altında kirişlerde hasarlar veya kalite ve özellik kayıpları oluşabilir. Bu nedenlerden dolayı kirişlerin onarılma/güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalar geçmişten günümüze devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar kirişlerin dayanımlarını, rijitliklerini veya sünekliklerini arttırmaya yöneliktir. Kirişlerin güçlendirilmesinde uygulanan yöntemler arasında; mevcut elemana ek beton katman ekleme, karbon elyaflarla sargılama ve çelik levha kullanımı yer almaktadır.

Betonarme kirişlere yeni bir beton katman ekleyerek onarım veya güçlendirilmesi ile ilgili yaygın çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kirişin bir, üç veya dört yüzüne betonarme katman ilave edilerek kiriş güçlendirilmektedir. Mevcut ve yeni beton arasında yeterli aderansın temin edilebilmesi durumunda bu yöntemin oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [21–25].

Son zamanlarda, karbon veya cam fiber takviyeli polimer levhalar kullanılarak kiriş onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır. Bu çalışmalarda CFRP veya FRP levhalar betonarme kirişe epoksi ile yapıştırılmıştır. Bu malzemeler ile kiriş güçlendirilmelerinde rijitlik ve dayanımlarda artışlar gözlenmesine rağmen, yeterli sünekliklerin elde edilmesinde sıkıntılar olmuştur [26–29].

Açıklık ortasına kolon eklenmesi ile kirişlerin güçlendirilmesi, artgertme ile kirişlerin güçlendirilmesi gibi güçlendirme yöntemleri de geçmiş çalışmalara konu olmuştur. Ayrıca epoksi enjekte edilerek veya tamir harçları kullanılarak kiriş onarımı gerçekleştirilmiş ve bunlarla ilgili çalışmalar yapılmıştır [30–32].

Kirişlerin güçlendirilmesinde çelik levha kullanılması da geçmiş çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu bölümde, geçmişte çelik levhalar kullanılarak kirişlerin onarım/güçlendirilmesi ile ilgili yapılan bazı çalışmalara yer verilmektedir [1–20].

Uysal, A. 'nın Çalışması [1]

Uysal, A. [1] çalışmasında, eğilme altındaki betonarme kirişlerin epoksi ile yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmada, çelik levha yapıştırılması ile yapılan güçlendirmenin daha sünek bir hale getirilmesi amaçlanmıştır. 1/1 ölçekli 200x500x4500mm boyutlarında biri referans(yalın) kiriş olmak üzere dokuz adet kiriş tek düze yükler altında denenmiştir. 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 bulonlar ile desteklenmesinin etkileri araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan deney elemanlarının isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir ve Ekler bölümünde araştırmacının deneysel çalışmalarına ait çizelge ve grafikler verilmiştir.

- 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 çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Delikli çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiş ve delikli çelik levha kullanılmasıyla süneklik kapasitelerinde artışlar gerçekleşmiştir.
- Epoksinin delik iç yüzeylerine mekanik olarak yaslanması ile epoksi ile levha yüzeyi arasındaki yük aktarımının daha etkili olduğu görülmüştür. Deneylerde kalın levhalı elemanlar, ince levhalı elemanlardan daha az bir süneklik göstermiştir. Ancak bu elemanların da yeterli sünekliklere ulaştığı belirtilmiştir.
- Tüm elemanlarda yeterli bir eğilme rijitliği elde edilmiştir. Beklendiği gibi kalın levhalı elemanlarda daha büyük rijitlikler elde edilmiştir.
- Özellikle kalın levhalı uygulamalarda bulonlarla desteklenmiş elemanların, bulonsuz elemanlara göre çok daha fazla sünek davrandıkları görülmüştür.
- Alt yüze yapıştırılan levhanın yan yüz levhaları ile desteklenmesinin de süneklik kapasitesini arttırmada etkili olabileceği görülmüştür.
- Güçlendirme işleminde kullanılacak delikli çelik levhaların hatasız zımbalanmış olması ve özenli bir işçilik uygulanması gerektiği belirtilmiştir.

Arslan, M. 'nin Çalışması [2]

Çalışmasında, epoksi ile çelik levhalar yapıştırılarak yalnızca eğilme altında onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tekdüze yükler altındaki davranış ve dayanımlarının araştırılmasını amaçlamıştır. Çalışmada ele alınan güçlendirme, kirişin pozitif moment bölgesinde çekme yüzüne epoksi ile çelik levha yapıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Levha başlarının boşta bırakılması ve kaynak ya da başlık kullanılarak yerinde tutulması durumları da incelenmiştir.

Arslan, M. [2]'nin çalışmasında, simetrik yerleştirilmiş eşit iki tekil yük altında denenen kirişler, 150x250mm dikdörtgen kesitli olup sonradan 150x2mm kesitli ya da 150x4 mm kesitli çelik levhalarla güçlendirilmiştir. 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 ya da kısa levha ile güçlendirme),
- Güçlendirme levhası ucunun durumu (boşta, kaynaklı ya da 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, yalın kiriş ile ve de birbirileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ekler bölümünde araştırmacının deneysel çalışmalarının grafikleri sunulmuştur. Araştırma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemi ile betonarme kiriş onarım ve güçlendirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiş ancak, kısa levha ile güçlendirme çok başarısız olmuştur.
- Levhanın olabildiğince uzatılması gerektiği ve bu uzatmanın yalnız başına yeterli olmadığı açıklanarak, levha uçlarının mutlaka tutulması gerektiği belirtilmiştir.
- 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 yapıştırmada 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 artıramamanın yanı sıra çok tehlikeli davranışa da yol açmaktadır.
- İyi düzenlenmiş, boyu yeterince uzun, uçları sağlıklı biçimde yerinde tutulmuş levhalarla yapılan yüksüz onarımda ve güçlendirmede amaçlanan dayanım sağlanabilmekte 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. Yani, kirişlerde süneklikler istenilen miktarda olmamıştır.

Gülenler, C.'nin Çalışması [3]

Gülenler'in [3] çalışması, betonarme kirişlerin çelik levhalarla onarımını, bu şekilde elde edilen kompozit malzemelerin dayanım ve davranışlarını ve Türkiye'de var olan polimer yapıştırıcıların kullanılabilirliğini incelemek üzere yapılan deneysel bir çalışmadır. 200x300x4000mm ebatlarında dikdörtgen kesitli dört adet deney elemanı eşit mesafelerle iki tekil yükle çatlak oluşana kadar yüklenmiştir. Daha sonra iki tanesi farklı polimer yapıştırıcı kullanılarak çelik levhalarla takviye edilmiştir. Çalışmada, yapıştırıcıların nitelikleri de deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Çelik levhaların tamamen yapıştırılması yerine kısmen yapıştırılması yeterli olmaktadır.
- Farklı yapıştırıcıların kullanıldığı kirişlerden biri sünek diğeri ise, gevrek bir davranış göstermiştir.
- Bu yöntemle onarılan aşırı çatlamış kirişler eski rijitliğine getirilebilmektedir. Ayrıca, onarılan kirişin normal betonarme kiriş gibi davrandığı ve klasik hesaplarla boyutlandırma yapılabileceği görülmüştür. Ancak bu çalışmada onarım levhası kiriş mesnetlerinin içine kadar uzatılmış olması gerçek uygulamaya uygun değildir ve tartışmaya açıktır.

Jones, R., Swamy, R.N., Charif, A. 'nın Çalışması [4]

Çekme yüzüne epoksi ile çelik levha yapıştırılmış basit kirişlerde, levha ucunda oluşan şekil değiştirmeyi ve kiriş davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda yedi adet 155x255x250mm ebatlarında dikdörtgen kesitli betonarme kiriş deneye tabi tutulmuştur. Elemanlara, basit kiriş mesnet açıklığı 2300mm olacak şekilde üç noktalı tekil yük uygulanmıştır.

Kirişlerden üç tanesine değişik düzenlemelerde levha yapıştırılmıştır. İki kirişe düz levhalar epoksi ile yapıştırıldıktan sonra bulonlanmıştır. Diğer iki kirişe ise, alttan levha yapıştırıldıktan sonra farklı boyutlarda L şeklinde levhalar yan yüzlere yapıştırılmıştır.

Epoksi ile düz çelik levhaların direk yapıştırıldığı ilk üç deneyde, levha uçlardan sıyrılmıştır. Alttan epoksi ile levha yapıştırılmış ve bulonlanmış kirişler, maksimum momentin olduğu bölüm içerisinde betonun ezilmesi ile göçmüştür. Çalışmada, L şeklinde levhalarla takviye edilmiş kirişler en etkili sonuçları vermişlerdir. Bu kirişler maksimum eğilme kapasitelerine ulaşmışlardır. Bütün güçlendirilmiş kirişler, yalın kirişin %60' ı oranında daha fazla rijitliğe çıkmışlardır. Levhanın direk yapıştırıldığı ilk üç deneyde ani göçme, levhanın epoksi ile yapıştırılıp bulonlandığı iki kirişte gevrek göçme ve L şeklindeki levhalarla takviye edilmiş kirişlerde ise sünek göçme gözlenmiştir.

Hussain, M. ve Arkadaşlarının Çalışması [5]

Hasar görmüş kirişlerin çekme yüzüne farklı kalınlıktaki çelik levhaların yapıştırılması ile eğilmeye karşı davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında, sekiz adet 150x150x1250mm ebatlarında dikdörtgen kesitli betonarme kirişi deneye tabi tutmuşlardır. Akma gerilmesi 269 MPa olan 100x1 mm, 100x1,5mm, 100x2mm, 100x3mm ebatlarında ve boyu 1100mm olan çelik levhalar kullanılmıştır. Kiriş orta noktasında (yükün uygulandığı noktada) deplasman ölçümleri yapılmıştır. Deney elemanları 1200mm aralıkta mesnetlenmiş olup üç noktalı tekil yüklemeye maruz

bırakılmıştır. Kirişlerin tamamı taşıma kapasitelerinin %85'i oranında (orta nokta deplasmanı 10mm olacak şekilde) 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. Deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Levha kalınlığının artması göçme mekanizmasını gevrek olarak değiştirmektedir
- Uç ankrajlar ince levha ile güçlendirilmiş kirişlerde sünekliği arttırmıştır. Fakat levha kalınlaştıkça süneklik oranının azaldığı gözlenmiştir.
- 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.
- Kalın levhali kirişlerde uç bulonlarının taşıma gücüne herhangi bir katkısı olmamıştır. Ayrıca bu kirişlerde ani göçmeler görülmüştür.

Swamy, R.N., Jones, R., Charif, A. 'nın Çalışması [6]

Hasar görmüş betonarme kirişlerin 1,5mm kalınlıktaki çelik levhalar ile onarılmasını incelemiştir. Çalışmada, 9 adet 155x255x2500mm ebatlarında dikdörtgen kesitli betonarme kiriş kullanmışlardır. Mesnet açıklığı 2300mm olan üç noktalı yükleme düzeneğinde, yük-deplasman; moment-eğrilik; beton, donatı ve çelik levhanın birim şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Deney elemanlarından iki tanesi 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 tanesine, elemanın taşıma gücüne ulaşacak şekilde yük verilip hasar gördürüldükten sonra 1,5mm kalınlığındaki levha yapıştırılmıştır. Diğer üç kiriş ise, taşıma gücüne kadar yüklenmiş, fakat bunlara üzerindeki yük alınmadan 1,5 mm kalınlığındaki levha yapıştırılmıştır. Deneyler sonucunda aşağıda belirtilen gözlemlere ulaşılmıştır;

- Tüm kirişler maksimum moment bölgesinde betonun ezilmesi, donatı ve çelik levhanın akması ile eğilme kapasitelerine ulaşmıştır.
- Planlanan taşıma gücü, deplasman ve eğrilik değerlerine 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 durum 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.

Ziraba, Y.N ve Arkadaşlarının Çalışması[7]

Daha önce yapılan deneysel çalışmalara dayanarak epoksi ile yapıştırılan çelik levhaların tasarımı ile ilgili analizler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, tasarımı üç ana adımda gerçekleştirmektedirler. İlk adımda, levha ve çekme donatısının akma mukavemetlerine ulaştıkları, betonun ise ezildiği andaki gerekli levha kalınlığını hesaplamaktadırlar. İkinci adımda, levha ile epoksi ve beton arasındaki yüzey gerilmelerini ve levha sıyrılma limitini kontrol etmektedirler. Levha-epoksi-beton arasındaki kohezyon katsayısına bağlı olarak maksimum mesnet-levha ucu mesafesi bu adımda hesaplanmaktadır. Son adımda, güçlendirilmiş kirişin kesme kapasitesi kontrol edilmektedir.

Deneysel çalışmalar ve sonlu eleman analizleri ile tasarımda kullanılan karakteristik sabitleri elde etmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda 50 adet 100x150x2250 mm ebatlarındaki dikdörtgen kesitli betonarme kiriş dört noktalı yükleme ile test edilmiştir. Deney sonuçları, çeliğin akması ile kirişin göçmeye gitmesi ve taşıma kapasitesine ulaşmasının tasarım aşamasında belirlendiği gibi olduğunu göstermiştir. Ani göçmelerin levha kalınlığının artması ile oluştuğunu gözlemlemişler ve tasarım aşamasında levha kalınlığını sınırlandırmışlardır.

Salam, H.M. ve Arkadaşlarının Çalışması [8]

Çalışmalarında, çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde levha sıyrılmasından kaynaklanan göçmenin önlenmesine yönelik araştırmalar yapmışlardır. Bu amaç doğrultusunda dokuz adet denge altı donatılı 150x250x2500mm boyutlarında dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Kirişlerde çekme ve basınç bölgelerinde 2Ø12 donatı kullanılmıştır. Kirişlerde yeterli kesme dayanımının olması ve kirişleri eğilme yönünden inceleyebilmek için Ø8/100 mm aralıklarla sargı donatısı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan betonun elastisite modülü 33 GPa, basınç dayanımı 50MPa'dır. Donatı çeliği ve güçlendirme levhalarının akma dayanımları sırasıyla 437MPa ve 280 MPa'dır. Deney elemanlarına iki noktalı tekil yükleme uygulanarak yük-deplasman ölçümleri yapılmıştır. Deney elemanlarının isimleri ve özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir.

- CB :Yalın (referans) kiriş
- PB :Alt yüzeyine 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırılmış kiriş
- G1B :Kiriş alt yüzündeki 25mm'lik paspayının sıyrılmasından sonra 15mm kalınlığında epoksi ile 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırılmış kiriş
- G2B :Kiriş alt yüzündeki 25mm'lik paspayının sıyrılmasından sonra 5mm kalınlığında epoksi ile 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırılmış kiriş
- EGB :Kiriş alt yüzünde levha uçlarının geldiği 400mm'lik bölgelerdeki paspayının sıyrılmasından sonra epoksi ile 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırılmış kiriş.
- BPB : Alt yüzeyine 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırıldıktan sonra her bir ucuna beton içerisine 75mm girecek şekilde epoksi ile bulonlanmış betonarme kiriş.
- CLPB: Alt yüzeyine 3x120x2000mm boyutunda levha yapıştırıldıktan sonra her bir ucuna 15x250x300mm boyutunda kirişin alt ve üst yüzeyine gelecek şekilde levha konularak altı adet düşey saplama ile tutturulmuş kelepçe sistemli kiriş.
- SP1B: Kirişe önce levha sıyrılmasının olacağı yük verilerek hasar gördürülmüştür ve yük boşaltılmıştır. Daha sonra, kiriş alt yüzüne 3x120x2000mm boyutunda, yan yüzlere ise 3x100x2000mm boyutlarında levhalar yapıştırılmıştır.

- Yan levhalar her bir uçta altı adet yatay bulon ile kirişe tutturulmuştur. Alt yüzeydeki levha ise CLPB kirişindeki gibi kelepçe sistemi ile tutturulmuştur.
- SP3B: SP1B kirişindeki gibi güçlendirilmiştir, ancak, kirişe ön yükleme yapılmamıştır. Kiriş hasarsız halde güçlendirilmiştir.

Araştırmacılar yukarıda belirtilen deneylerden aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır,

- Klasik çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerde süneklikte azalma olmakta ve levha sıyrılmasından dolayı taşıma gücünde sınırlı bir artış olmaktadır.
- Paspaylarının sıyrılarak çelik levhaların yapıştırıldığı tüm deney elemanlarında levha, betonarme kirişten sıyrılmamıştır. Paspayının alınmadığı, levhanın direk betonarme yüzeye yapıştırıldığı deneyde, kiriş levhanın uçlardan sıyrılması ile göçmüştür.
- Uçlardan bulonla veya kelepçe sistemi ile tutturulmuş kirişlerde de sıyrılma problemi görülmemiştir.
- Beton paspayının alındığı ve uçlardan tutturulmuş deney elemanlarının hepsinde çelik levha kirişin taşıma gücünü arttırmıştır.
- Yan yüzlerden levhaların bulonlanarak yapıştırıldığı deney elemanları kontrol kirişine göre %264 daha fazla yük taşımıştır. Bu kirişler levhanın direk kirişe yapıştırıldığı deney elemanına göre de %217 daha fazla yük taşımışlardır.

Arslan G., Sevik F., Ekiz I.'nın Çalışması [9]

2008 yılında yayımlanan çalışmalarında sürekli çelik levhalar yapıştırılmış betonarme kirişlerin eğilmeye karşı dayanımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yedisi referans ve diğer yedisi güçlendirilmiş olan toplam on dört adet betonarme kirişi deneye tabi tutmuşlardır. Tüm deney elemanları 100x160x1970mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Deneyde, kalınlığı 5mm, genişliği 50mm olan farklı uzunluklarda çelik levhalar kullanılmıştır. Betonarme kirişler çekme bölgesinde 2Ø12, basınç bölgesine 2Ø8 ve sargı donatısı olarak Ø6/160mm 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 5x50x1000mm, yan yüzden 5x50x1000mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S2 kirişleri: sadece alt yüzden 5x50x1000mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S3 kirişleri: alt yüzden 5x50x1500mm, yan yüzden 5x50x1000mm levha yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdir.
- S4 kirişleri: alt yüzden 5x50x1000mm, yan yüzden 5x50x500mm 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 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., Park, S.M. ve Mohammed Ali, M.S. 'nin Çalışması [10]

Sürekli betonarme kirişlerde çelik veya FRP levhaları 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 2400mm'lik iki eşit açıklıklı betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişler kritik diyagonal çatlakların oluşmayacağı ve eğilme davranışlarının incelenebileceği biçimde tasarlanmışlardır. Deneyde kullanılan çelik levhalar 3mm kalınlığında, FRP levhalar ise 1,2mm 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 100mm genişliğinde çelik levha veya 50mm genişliğinde FRP levha yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Diğer iki kiriş ise levha genişliği 80mm 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 Arkadaşlarının Çalışması [11]

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 150x150x1250mm boyutlarında dikdörtgen kesitli betonarme kiriş kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak eğilme grubu kirişler için 2Ø10, kesme grubu kirişler için 3Ø12 donatı kullanılmıştır. Tüm kirişlerde 2Ø6 basınç donatısı, Ø6 sargı donatısı kullanılmıştır. Etriye aralıkları eğilme grubu kirişlerde 30/60/120 mm, kesme grubu kirişlerde ise 120/200 mm aralıklarında belirlenmiştir. Çelik levha kalınlıkları 1,00/2,00/3,00mm olarak değişmektedir. Levha kesme mesafeleri ise 50/100/150mm olarak değişmektedir.

Tüm kirişlere 1200mm açıklıkta iki noktali tekil yükleme uygulanmıştır. Eğilme grubu kirişlere 10mm, kesme grubu kirişlere 5mm orta nokta deplasmanı olacak şekilde ön yükleme yapılmıştır. Ön yükleme yapılarak hasara uğramış kirişlere farklı kalınlık ve uzunluklarda çelik levhalar yapıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

- 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; kesme grubu kirişlerde, diyagonal çekmeden dolayı oluşan göçme modu görülmüştür.
- 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 mesafesi, sıyrılma göçmesi modunu 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 uzunluğunun dikkatli bir şekilde hesaplanması gerektiği belirtilmiştir.

Altın, S., Anil, Ö., Kara, M.E. 'nin Çalışması [12]

Dış yüzeylerine çelik levha yapıştırılmış kesme yönünden yetersiz olan betonarme kirişlerin süneklik davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, on bir adet genişliği 120mm, yüksekliği 360mm; tabla genişliği 360mm, tabla yüksekliği 75mm ve boyu 4000mm olan T kesitli betonarme elemanları test etmişlerdir. 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 kirişinin yan yüzlerine, üçer grup halinde değişik düzenlemelerde levhalar yapıştırılmıştır. 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 arasındaki boşluklar azaldığında sünekliğin arttığı gözlenmiştir. Kesme bölgelerinde, levha yapıştırılan alan arttırıldığında kesme çatlaklarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. L biçimli çelik şerit levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerde en düşük süneklik oranları gözlenmiştir.
- Tüm kesme açıklığında tek bir parça çelik levha kullanmak yerine parçalı halde levhaları yapıştırmak daha iyi sonuç vermektedir.

Oh, B.H., Cho, J.Y., Park, D.G. 'nin Çalışması [13]

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 kirişlerde ani göçme mekanizmasının levha sıyrılması olduğu gözlenmiştir.
- 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., Barnes, R.A., Mays, G.C., Subedi, N.K 'nın Çalışması [14]

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 175x400x2370mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Kirişlerde çekme donatısı olarak 2Ø32, basınç donatısı olarak 2Ø16 ve Ø6/90mm aralıklarda sargı donatısı kullanılmıştır. Deneyde genişliği 360mm, boyu 2330mm ve kalınlığı 2,00/4,00/6,00mm olarak değişen çelik levhalar kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin dört tanesine levha yapıştırılmış, diğer üç tanesine ise bulonlanmıştır. Yapılan çalışmalardan şu bilgilere ulaşılmıştır;

- Büyük kesme kuvvetlerinde levhalar taşıma gücünü arttırmaktadır.

- İnce levhalar($t=2\text{mm}$) akma sahanlığının artmasına ve kesme kapasitesinde artışlara 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 da kullanılması gerekmektedir.
- Bulonlu sistem akmayı oluşturabilecek üst üste levha düzenlemelerine izin vermektedir.
- Bulon ve epoksinin birlikte kullanıldığı düzenlemelerin daha iyi sonuç verebileceği kanaatine varılmıştır.

Barnes, R.C., Mays, G.C. 'nin Çalışması [15]

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 on beş adet 155x250mm boyutlarında dikdörtgen kesitli; onbeş adet 160x230mm gövde genişliği ve derinliğinde, 400x75 mm tabla genişliği ve yüksekliğinde T kesitli betonarme kirişler deneye tabi tutulmuştur. Deneylerde kesme açıklığı/derinlik oranı 4,0/1,8/0,8 olan üç alternatif durum göz önünde bulundurulmuştur. Kiriş gövdesinin her iki yüzüne gövde derinliği ve kesme açıklığı boyunca 3mm kalınlığında çelik levhalar yapıştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan şu sonuçlara varılmıştır;

- 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., Oehlers, D.J., Park, S.M. 'nin Çalışması [16]

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 150x250x2800mm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir.

Eğilme yönünden incelenecek kirişlerden beş tanesine 150mm genişliğinde ve 600mm uzunluğunda çelik, CFRP ve GFRP levhalar çekme yüzüne yapıştırılmıştır. Diğer üç kiriş 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 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., Mutsuyoshi, H., Sano, M. 'nin Çalışması[17]

Kiriş gövdesine çelik levhalar yapıştırarak kesmeye karşı güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Toplam on iki adet 150x200x2600mm boyutlarında dikdörtgen kesitli kiriş test edilmiştir. Deney elemanları iki seriden oluşmaktadır. Çekme donatısı olarak A serisi kirişlerde 2Ø22, B serisi kirişlerde 3Ø22 kullanılmıştır. Tüm kirişlerde 2Ø12 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 2160mm boyunda, 2,0/3,0/4,5mm kalınlıklarında ve değişik genişliklerdedir. Yapılan deneysel çalışmalara ek olarak nümerik çalışmalar da yapılmıştır.

Kontrol kirişine göre, çelik levhalar yapıştırıldıkları kirişlerin maksimum kesme dayanımlarını, 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. 4,5mm kalınlığında ve 100mm genişliğindeki levhalar kirişin kesme dayanımını %84 oranında arttırmıştır. Buna rağmen, levha kalınlığı 2,3mm ve genişliği 150mm 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 artırılabilceği biçimde olması gerektiği savunulmuştur.

Su, R.K.L., Zhu, Y. 'nin Çalışması [18]

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 eleman kullanılmıştır. 300mm genişliğinde ve 1250mm boyundaki çelik levhalar kiriş gövdesinin her iki yüzüne bulonlanmıştır. Bu kirişlerden bir tanesine, 3mm kalınlığında çelik levha uçlardan ve

ortalardan bulonlanarak tutturulmuş, diğerine ise 6mm kalınlığında çelik levha 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.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Programı

Deney elemanlarının boyutları laboratuvar koşulları içerisinde gerçekleştirilebilecek ve uygulamadaki durumları birebir yansıtabilecek şekilde seçilmiştir. Deney sonuçlarının etkinliğini ortaya koyması amacıyla yeterli sayıda eleman hazırlanmıştır. Bu amaçla elemanların davranış ve dayanımlarının belirlenebilmesi için biri referans(yalın) kiriş olmak üzere toplam yedi adet deney elemanı kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de kullanılan deney elemanları ve özellikleri belirtilmiştir. Deneylerde aşağıda belirtilen değişkenlerin davranış ve dayanım üzerindeki etkinliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

- Yöntemin etkinliği: Epoksi ile yapıştırılmış çelik levhaların eğilme dayanımı ve davranışı üzerindeki etkilerinin nasıl olacağı,
- Güçlendirme levhası kalınlığı: Çelik levha kalınlığının davranış ve dayanım üzerindeki etkisi
- Güçlendirme levhasının yapıştırma yöntemi: Çelik levhaların kiriş alt yüzüne veya alt yüzüne yapıştırıldıktan sonra U şeklindeki levhaların kirişin alt yüzüne ve yan yüzlerine yapıştırılmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkileri

Yapılan deneysel çalışmalarda güçlendirme levhalarının belirlenmesinde, 5. bölümde bu çalışma ile karşılaştırılacak çalışmalar da dikkate alınmıştır. Burada ele alınan deney sonuçları geçmiş çalışmalarla karşılaştırılarak çelik levha kullanımının etkinliği soruşturulmuştur.

4.2. Deney Elemanları

Deneylerden elde edilen sonuçların uygulamadaki kirişleri temsil edebilmesi için deney elemanı ölçeğinin 1/1 olmasına karar verilmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 200x500mm boyutlarındaki bir kiriş kesiti model olarak seçilmiştir. Kiriş boyunun ise 4,5m alınmasına karar verilmiştir. Model kirişlerde epoksi ile yapıştırılan 1,5/3,0/3,6/4,5/6,0 mm kalınlıklarındaki çelik levhalar güçlendirme elemanı olarak kullanılmıştır. Şekil 4.1-4.7’ de deney elemanlarının detayları 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.

Model olarak ele alınmış olan 200x500mm’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.

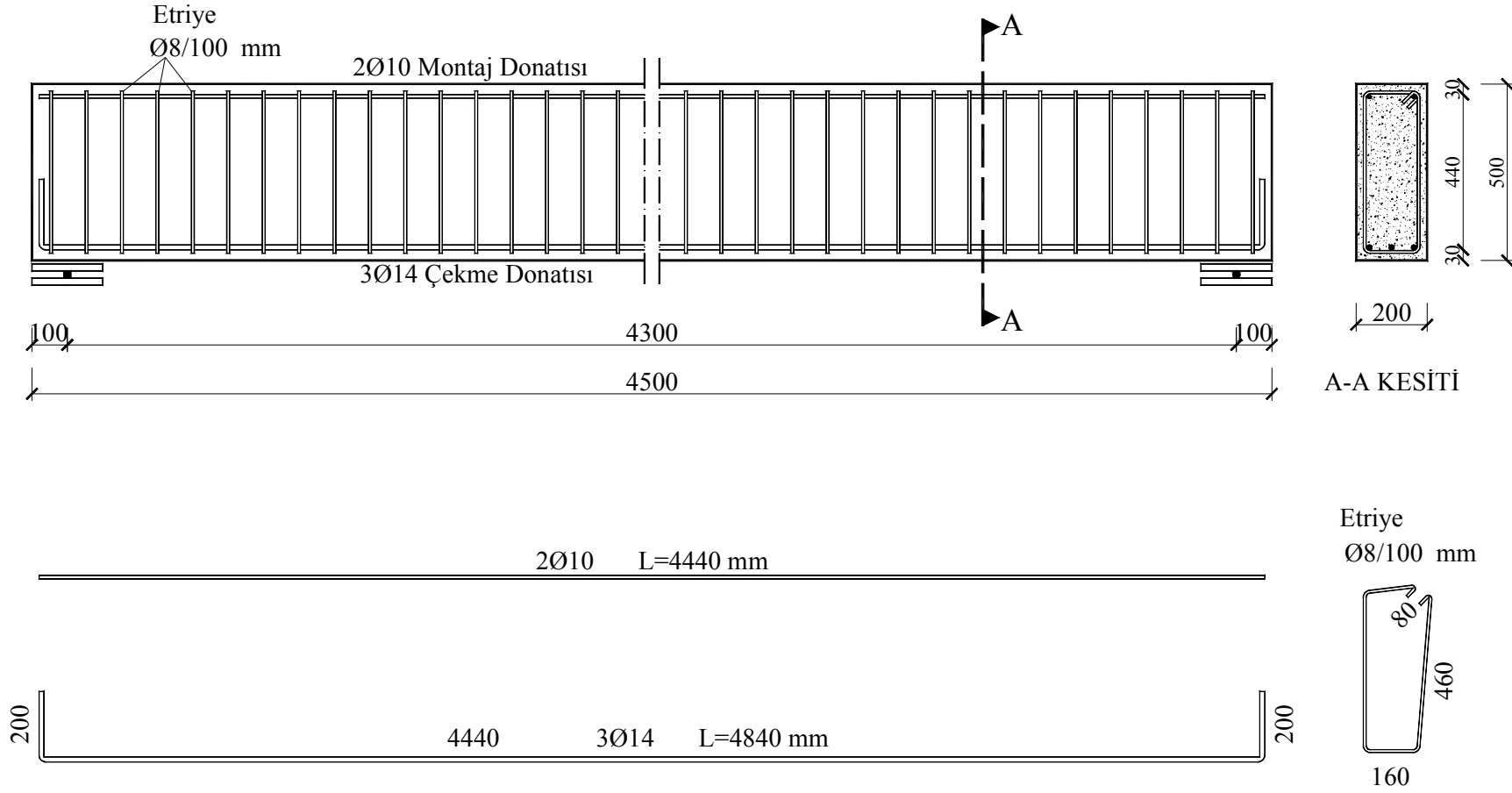
Deney elemanların isimlendirilmesinde kullanılan indisler aşağıda belirtildiği gibidir;

- S : Çelik (Steel) levhanın olduğunu göstermektedir.
- B : “B” harfi yalın kirişi göstermektedir.
- b : Levhanın alt yüzden yapıştırıldığını göstermektedir.
- u : Levhanın yan yüz levhaları ile desteklendiğini göstermektedir.
- 1.5-6 : Sondaki sayılar ise kullanılan levha kalınlığını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Deney elemanları

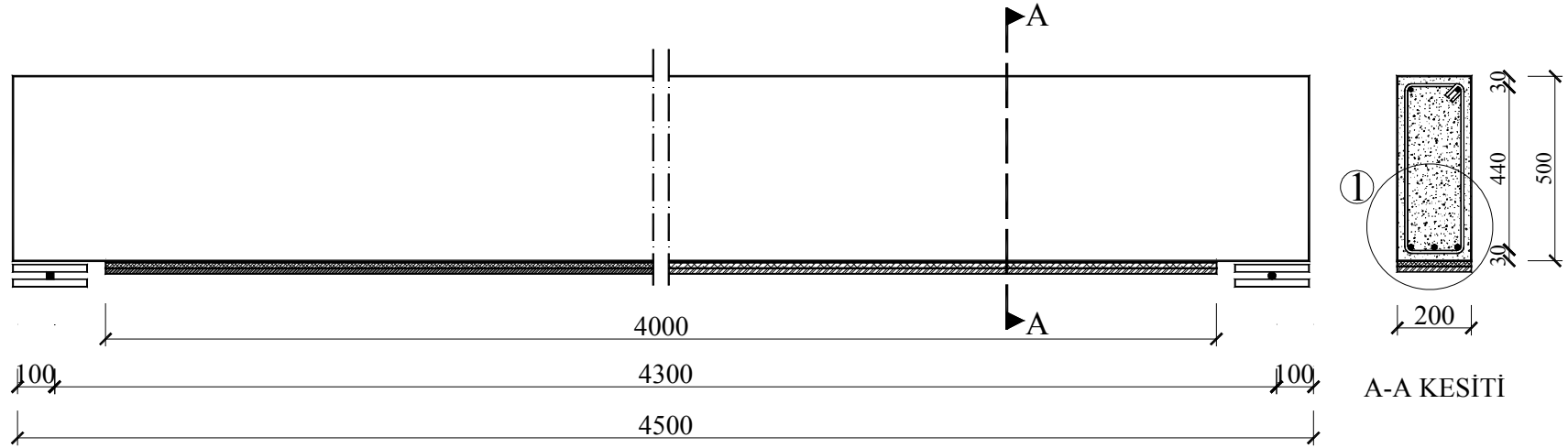
<i>KİRİŞ ADI</i>	<i>İŞLEM TÜRÜ</i>	<i>LEVHA KALINLIĞI mm</i>	<i>YAN YÜZ LEVHASI</i>
<i>SB</i>	<i>Yalın (Referans)</i>	-----	-----
<i>Sb1,5</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>1,5</i>	-----
<i>Sb3</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>3</i>	-----
<i>Sb3,6</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>3,6</i>	-----
<i>Sb4,5</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>4,5</i>	-----
<i>Su4,5</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>4,5</i>	<i>3 mm</i>
<i>Sb6</i>	<i>Güçlendirme</i>	<i>6</i>	-----

- SB ; Referans olarak kullanılacak kiriş(Yalın kiriş).
- Sb1,5 ; Sadece alt yüzüne epoksi ile 1,5mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb3 ; Sadece alt yüzüne epoksi ile 3,0mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb3,6 ; Sadece alt yüzüne epoksi ile 3,6mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb4,5 ; Sadece alt yüzüne epoksi ile 4,5mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Su4,5 ; Alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış 4,5mm kalınlığındaki çelik levhanın yan yüzlerden 3mm kalınlığında U şeklindeki levhalarla desteklenmesi ile güçlendirilmiş kiriş
- Sb6 ; Sadece alt yüzüne epoksi ile 6,0mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş

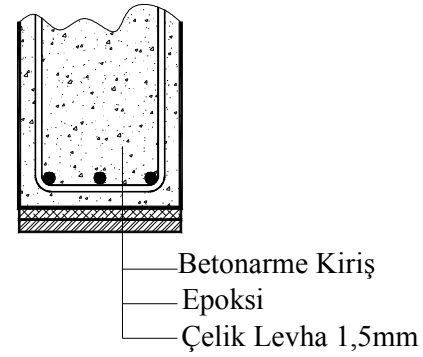


NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.1. SB referans(yalın) kiriş detayı

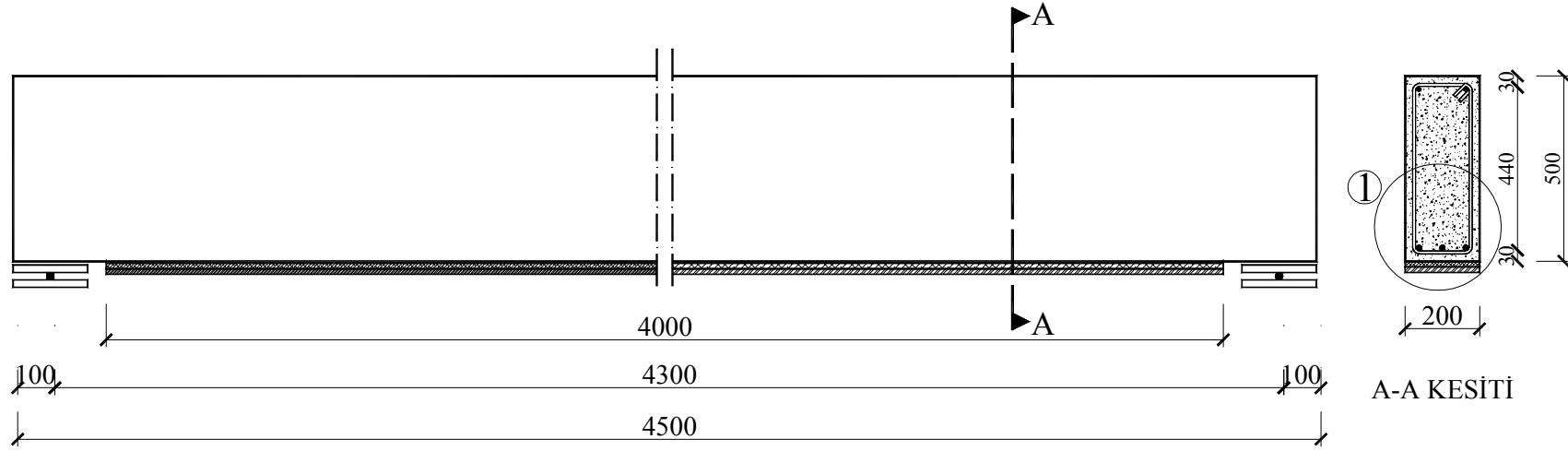


NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

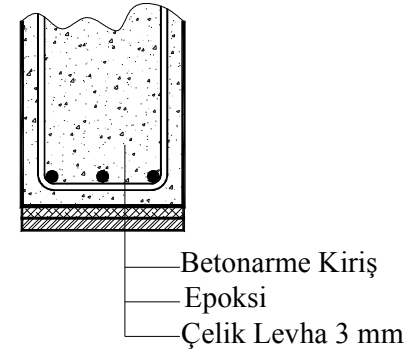


1 DETAYI

Şekil 4.2. Sb1,5 güçlendirilmiş kiriş detayı

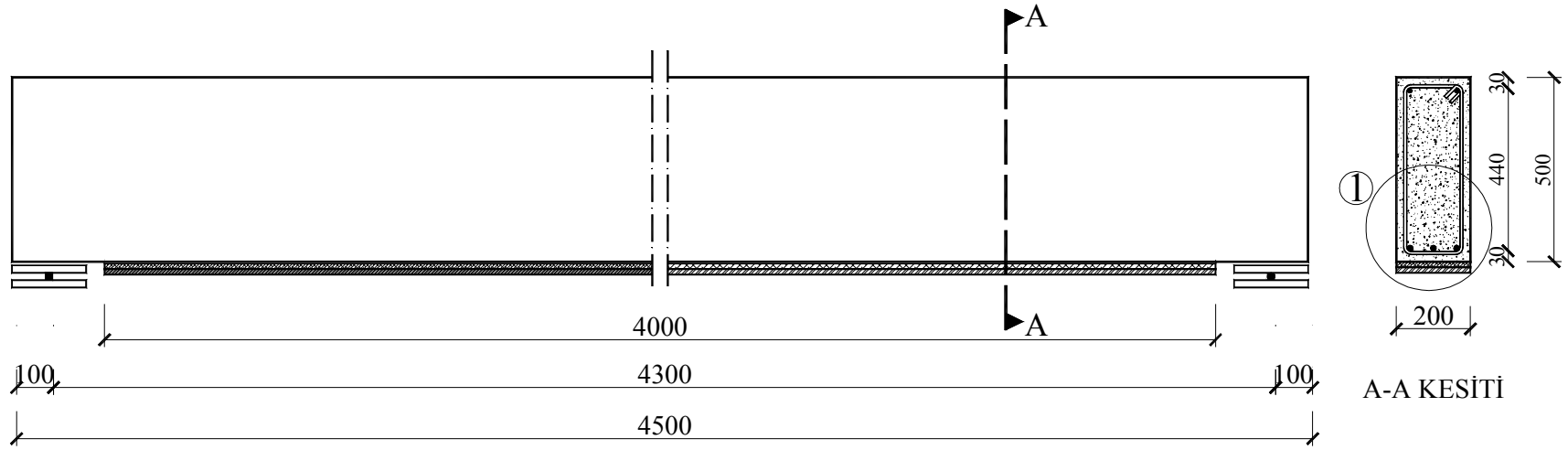


NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

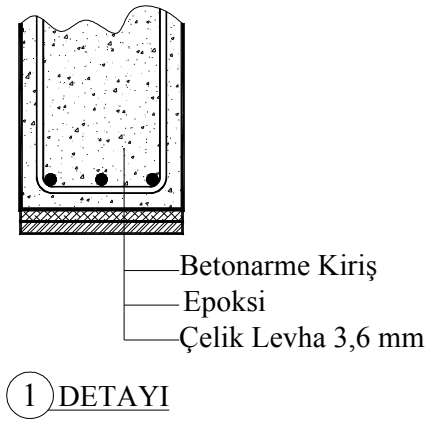


1 DETAYI

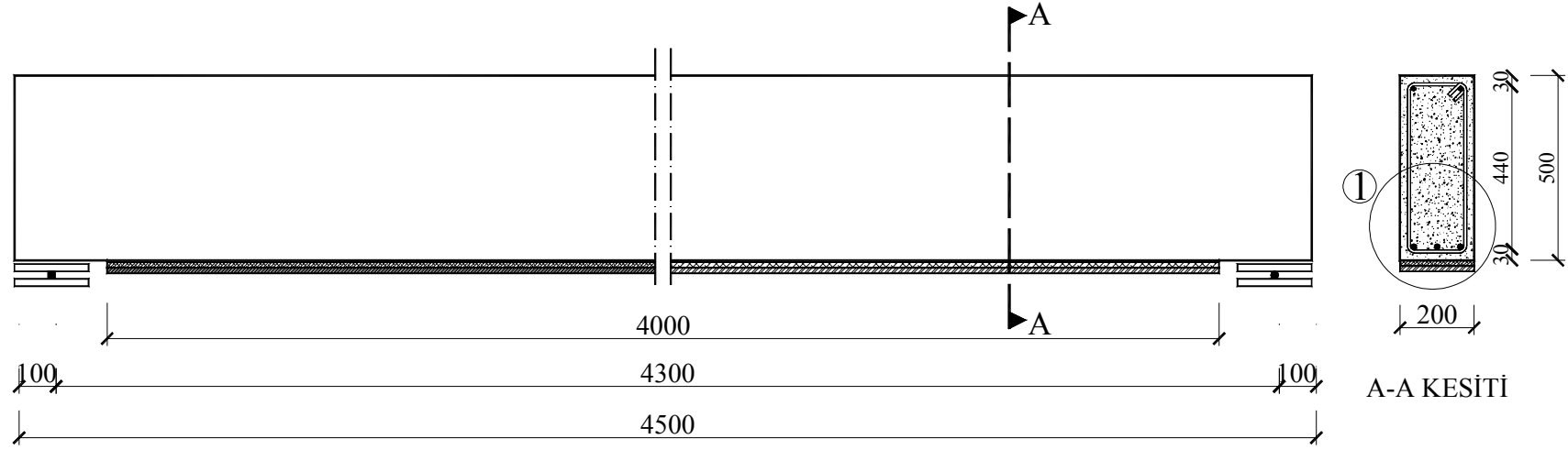
Şekil 4.3. Sb3 güçlendirilmiş kiriş detayı



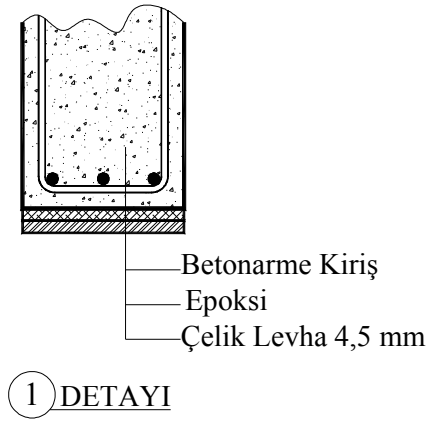
NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.



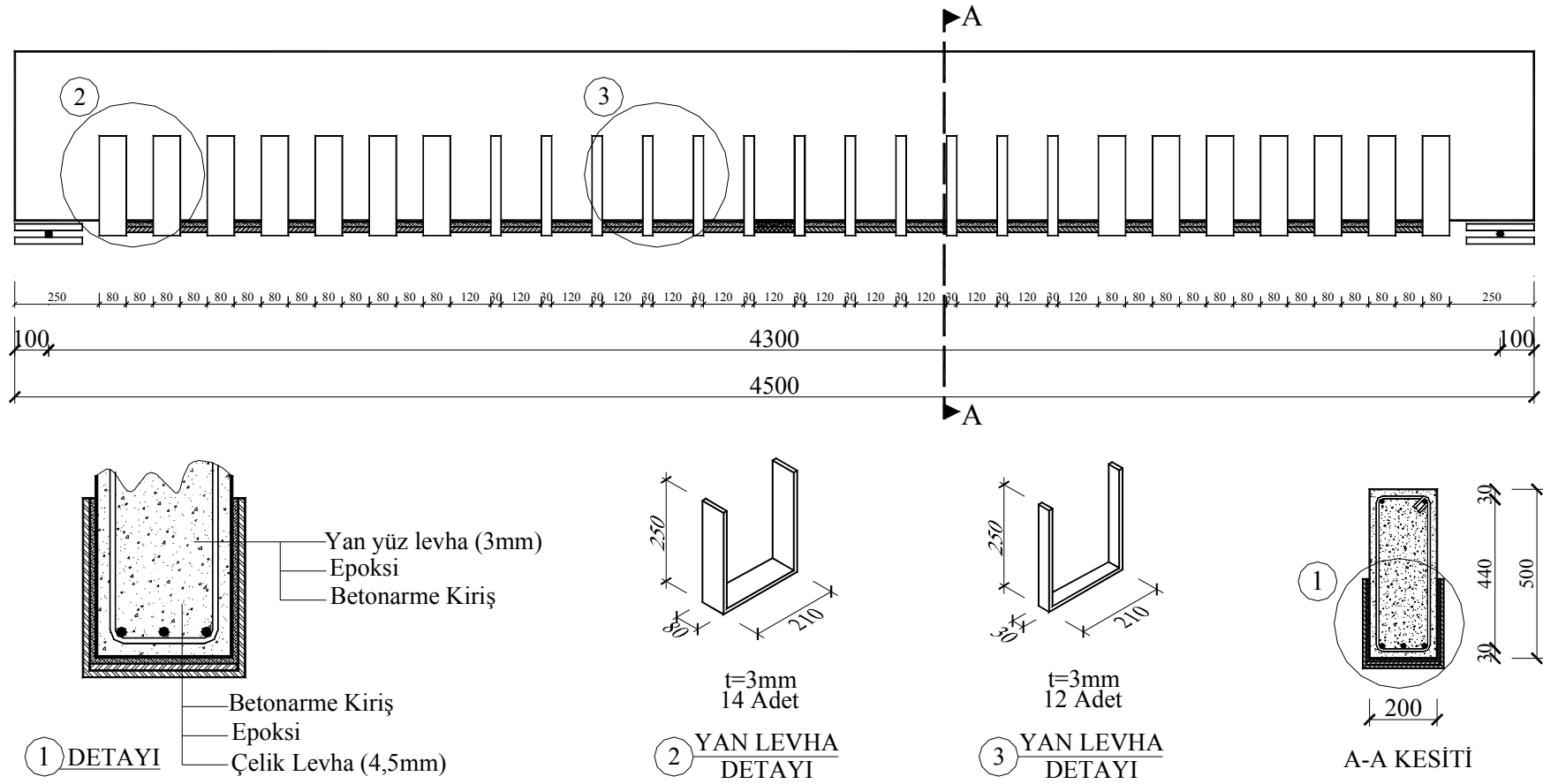
Şekil 4.4. Sb3,6 güçlendirilmiş kiriş detayı



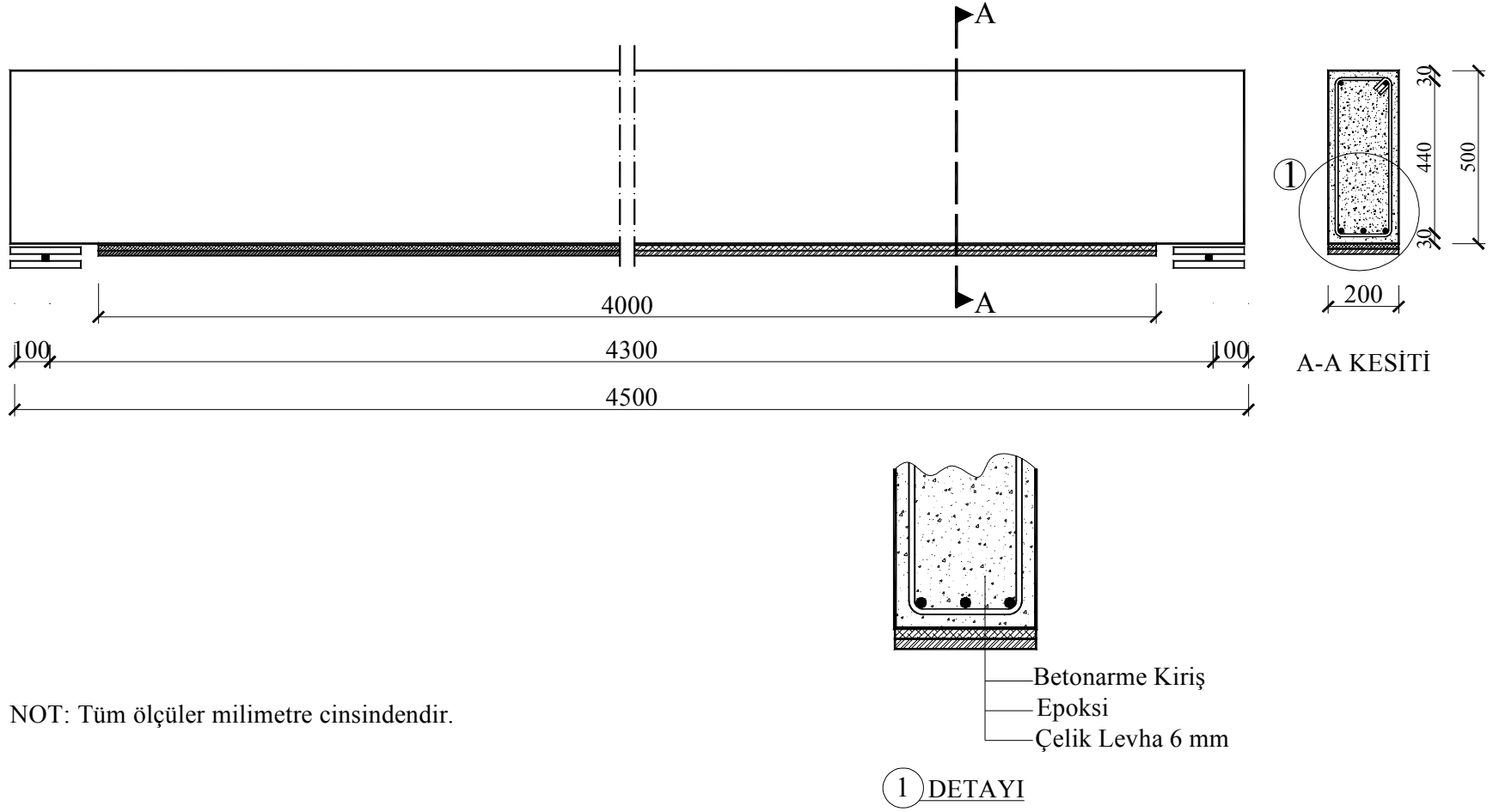
NOT: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.



Şekil 4.5. Sb4,5 güçlendirilmiş kiriş detayı



Şekil 4.6. Su4,5 güçlendirilmiş kiriş detayı



Şekil 4.7. Sb6 güçlendirilmiş kiriş detayı

4.3. Malzeme Özellikleri ve Dayanımları

Deney sonucunda elde edilen verileri karşılaştırmak 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 8mm, 10mm ve 14mm 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. Güçlendirme levhası olarak DKP saclarından A1 kalitesinde 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, 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. Bu malzemenin avantajları aşağıdaki şekilde belirtilmektedir.

- Uygulaması kolaydır,
- Kuru ve nemli yüzeylerde kullanılabilir,
- Yüksek sıcaklıklarda bile akma yapmadan uygulanabilir,
- Rötire yapmaksızın sertleşir,
- Betona ve birçok diğer malzemeye mükemmel yapışır,
- Erken yüksek dayanım sağlar,
- Bileşenleri farklı renklerde (karıştırma kontrolü sağlayacak şekilde),

- Yüksek aşınma ve kimyasal dayanıma sahiptir,
- Tiksotropik özelliği nedeniyle, tavanda, kolonda (baş üstü ve düşey uygulamalarda) uygulanabilme özelliği sağlar.

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 hafif şekilde pürüzlendirilmiş ve daha sonra üzerindeki yağ tabakası tamamen temizlenmiştir.

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

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

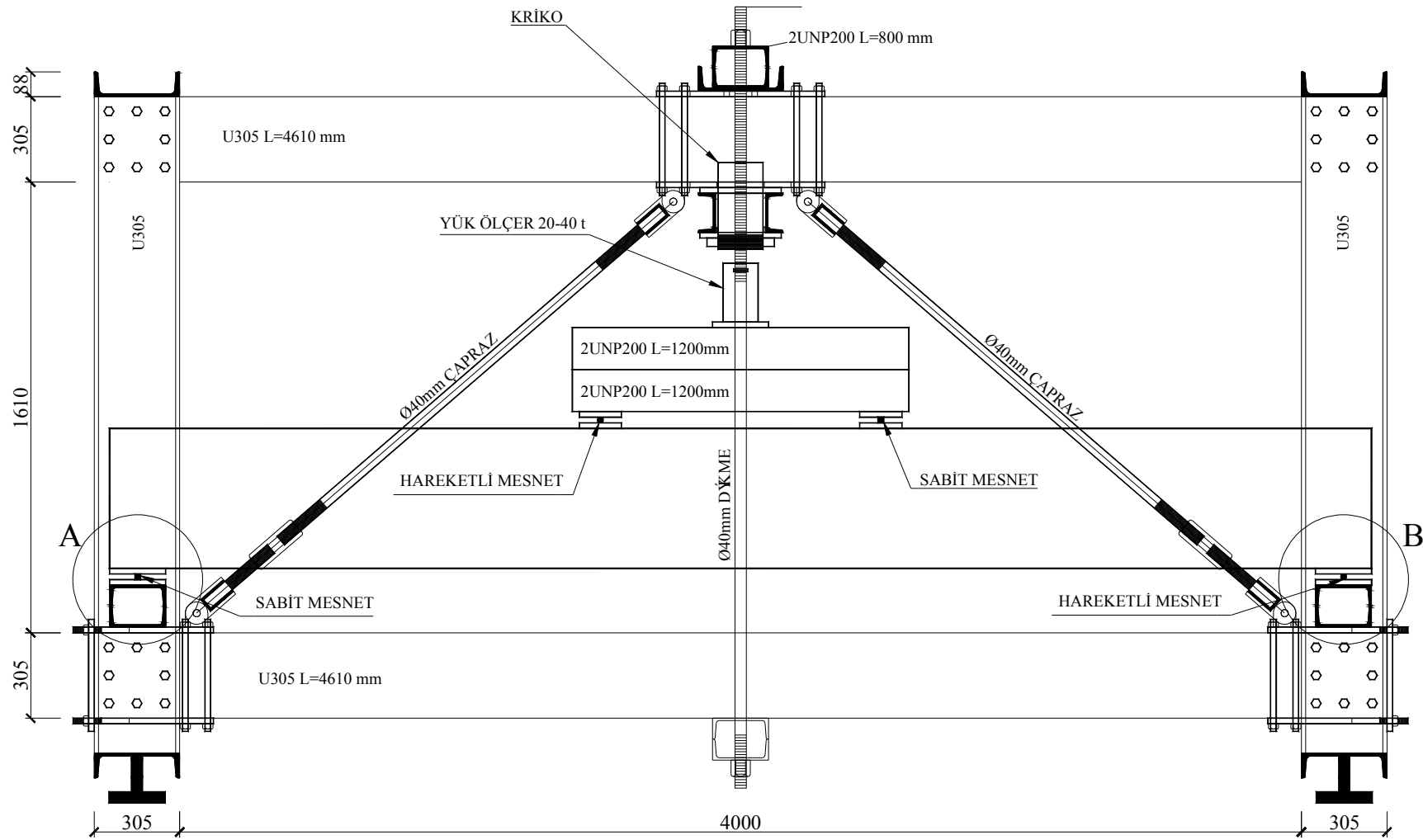
4.5.1. Deney çerçevesi

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

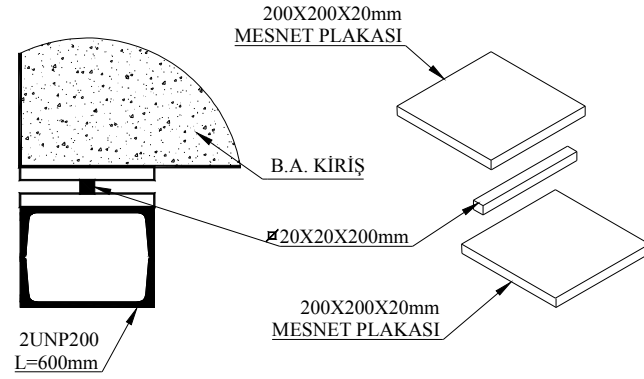
ortasında bulunan hidrolik krika ile yük önce çelik kirişe ve buradan deney elamanına iki eşik tekil yükü aktaracak şekilde verilmiştir. İki noktalı yükleme aralığı yayılı yük altında kirişte meydana gelecek moment diyagramını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Deney sırasında kirişin yanal stabilitesini sağlayabilmek ve kirişin boyuna eksenini etrafındaki dönmeleri engelleyebilmek için ek önlemler alınmıştır. Deney çerçevesi, reaksiyonları kendi içerisinde deney elemanlarına iletebilmektedir. Betonarme kiriş bir ucunda sabit, diğer ucunda hareketli mesnetler üzerine oturtulmuştur. Deney çerçevesi ve mesnet detayları Şekil 4.8. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da gösterildiği gibidir.

4.5.2. Yükleme düzeni

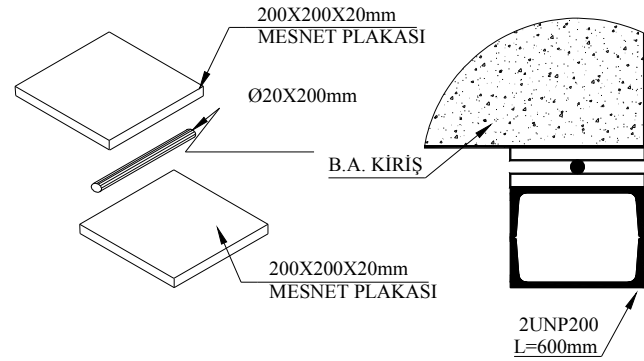
İki uçundan basit kiriş gibi mesnetlenen deney modellerinde kesme kuvvetinin olmadığı, basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanarak Şekil 4.11.'de görülen yükleme sistemi tasarlanmıştır. Oluşturulan iki noktalı yükleme sisteminin yük aralıkları, düzgün yayılı yükler altında oluşacak moment diyagramını yaklaşık olarak kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu amaçla model üzerinde, model ekseninden 500mm kenarlara biri sabit diğeri hareketli olarak mesnetlenen, önemli bir sehim yapmayacak şekilde boyutlandırılmış üst üste kaynaklanmış 4 adet U 200 çelik profil kullanılmıştır. Yük aktarımında kutu profilin mesnetlenmesi iki çelik lama arasına konulan yuvarlak ve kare çubuklarla yapılmıştır. Kutu profil üzerine yükün uygulanabilmesi için 600 kN kapasiteli bir hidrolik krika ile yük kontrolü için 400 kN kapasiteli yük ölçer (load-cell) simetri merkezleri çakıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Deney düzeneği ön görünüş

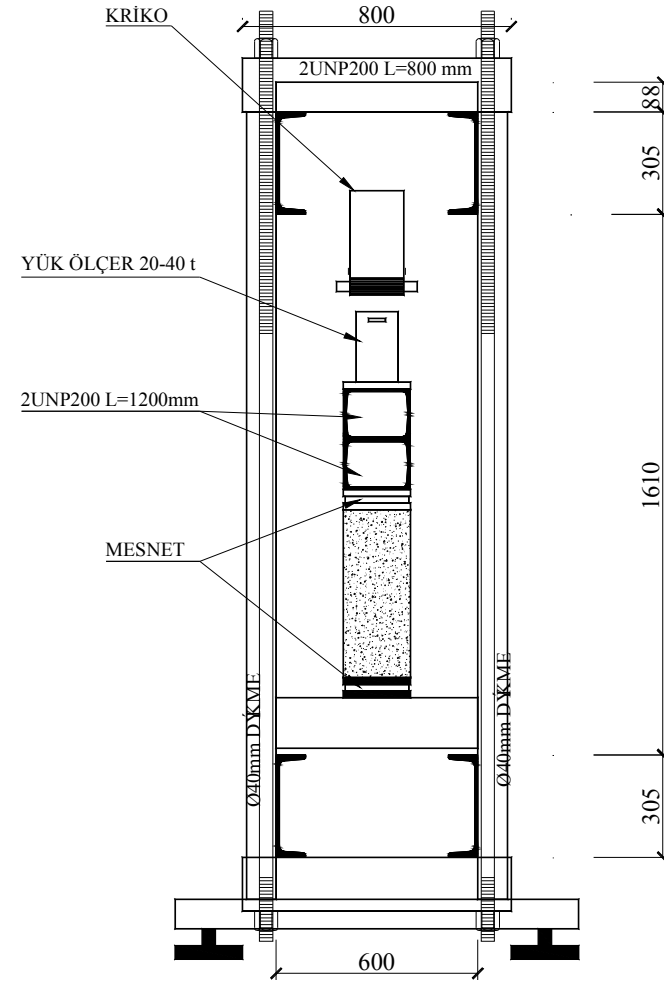


A SABİT MESNET
DETAYI

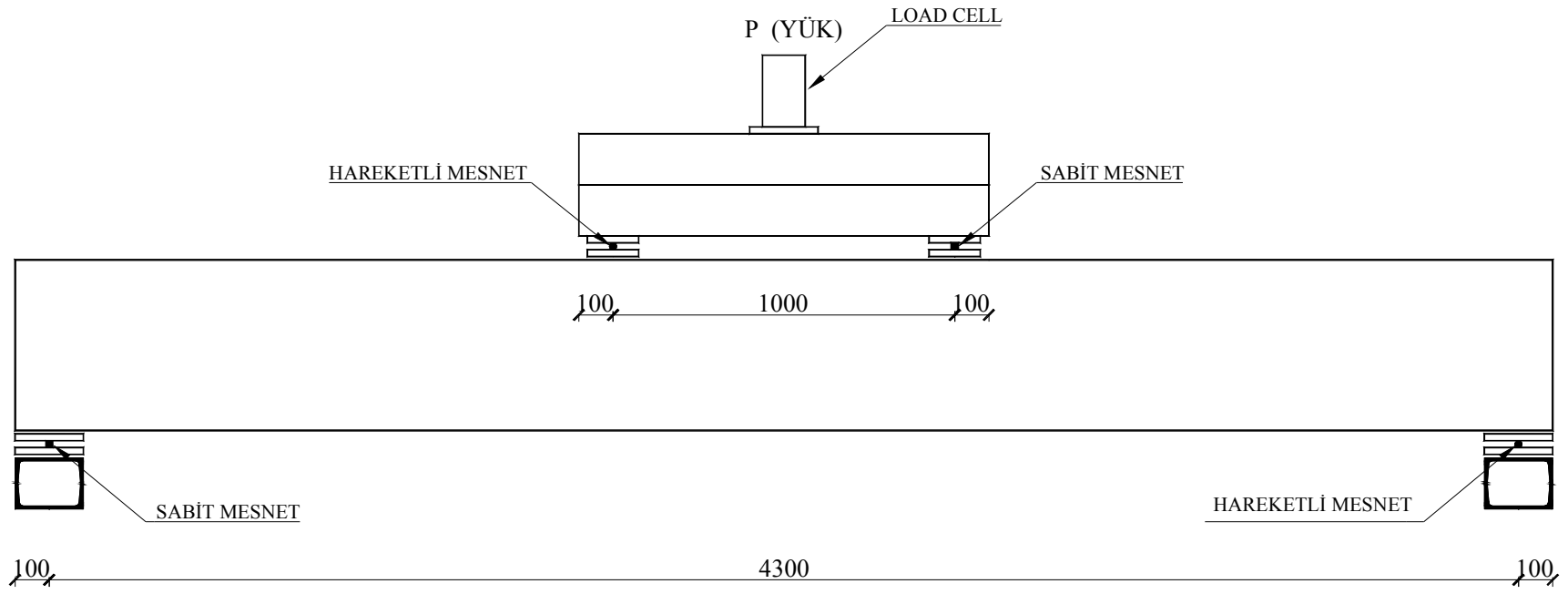


B HAREKETLİ MESNET
DETAYI

Şekil 4.9. Deney çerçevesi mesnet detayları



Şekil 4.10. Deney düzeneği yan görünüş



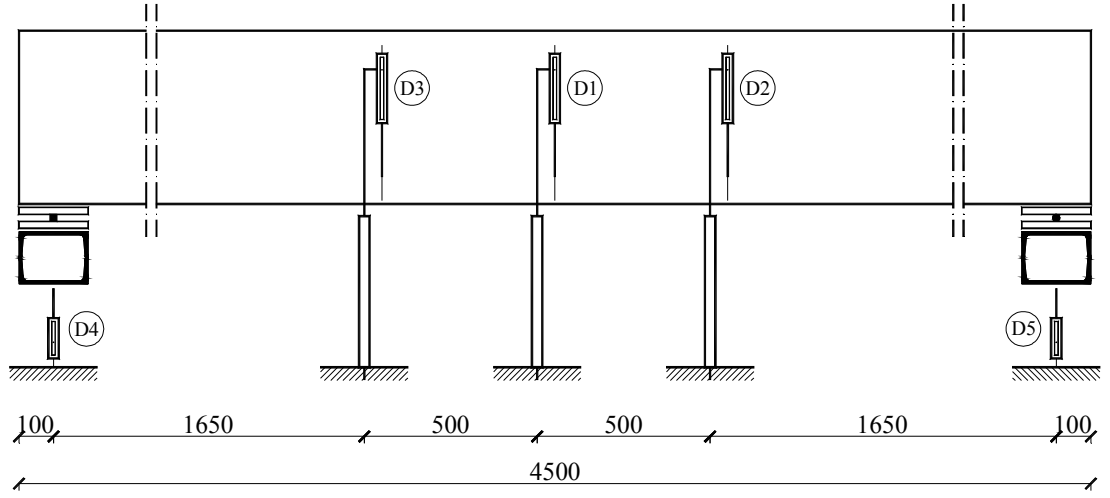
Şekil 4.11. Yükleme noktalarının yeri

4.5.3. Ölçüm düzeni

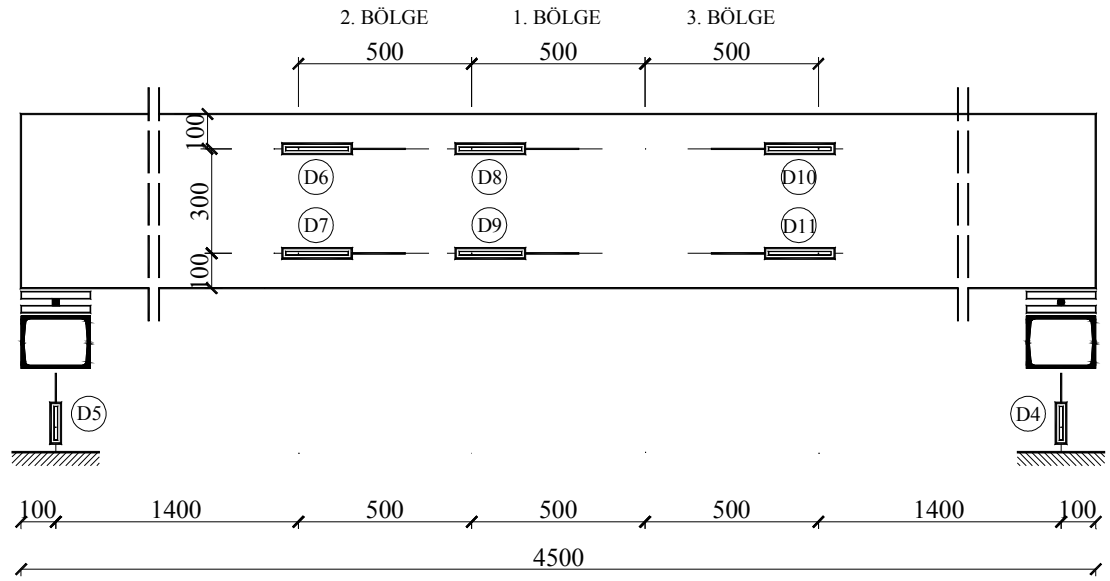
Deneyler sırasında çeşitli yön ve doğrultudaki deplasman ölçümleri için, 0,01 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, elektronik deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bu deplasman ölçerlere gelen bilgiler bir okuyucu tarayıcıdan geçtikten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında 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 ve D5 numaralı olanlardır. 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. (Bkz. Şekil 4.12.a-b)

Çizelge 4.3. Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'lerin ölçüm amaçları

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



a)



b)

Şekil 4.12. Ölçüm düzeneği

a) Ölçüm düzeneği ön yüzü

b) Ölçüm düzeneği arka yüzü

4.6. Deneyler

Deney elamanları Şekil 4.8.'de belirtilen deney düzeneğine titiz bir şekilde yerleştirilip ölçüm aletleri bağlandıktan sonra deney aşamasına geçilmiştir. Deney elemanlarının test sırasında gözlenen davranışları, deneyin gelişimi ve deney elemanlarına ait yük-deplasman grafikleri bu bölümde sunulmuştur. Deneyler sırasında deney elemanlarının çatlak biçimleniş ve gelişimleri, deformasyonları seçilen yük adımlarında incelenmiştir. Tüm elemanlarda yük 3 kN-6 kN arasında değişen yük adımları ile arttırılarak uygulanmıştır. Deney sonunda elemanlarda oluşan çatlak şekilleri bu bölümün sonunda verilmiştir.

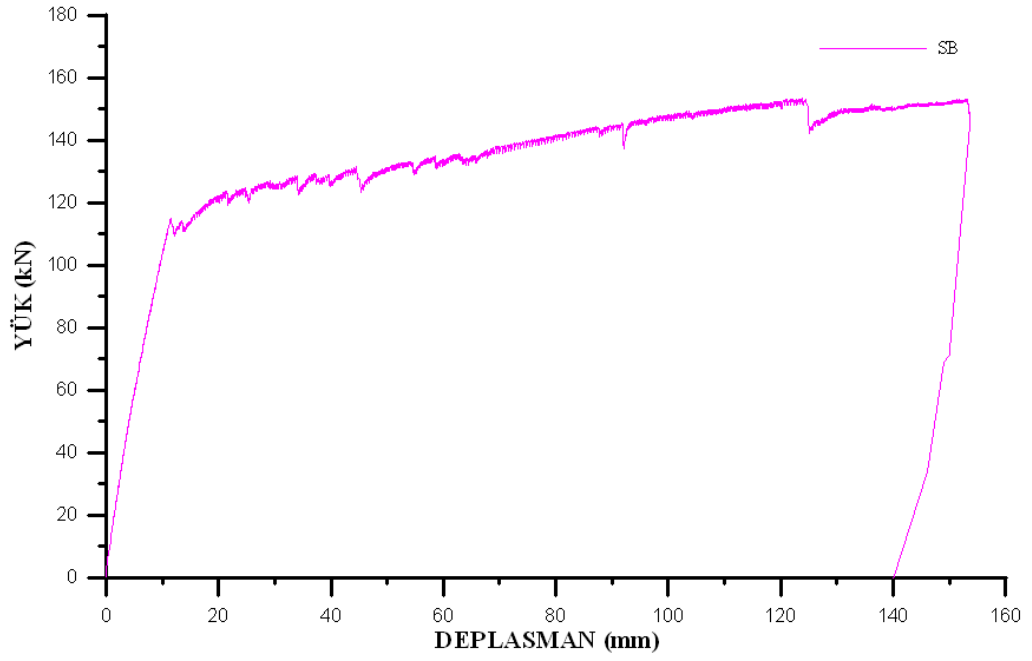
4.6.1. SB referans(yalın) kirişi

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'ye ulaşmıştır. Eleman 115 kN yük ve 13 mm deplasmanda akmaya başlamıştır. Bu aşamadaki maksimum çatlak genişlikleri 0,5 mm' ye ulaşmıştır. 120 kN yükte eleman tekrar yük alarak donatıda pekleşme başlamıştır. Deplasman değeri 30 mm' ye ulaştığında maksimum çatlak genişliği 3 mm' dir. Yük 150 kN, deplasman 128 mm değerine kadar ulaştıktan sonra sol mesnet ve her iki mesnet ortasında ezilme meydana gelmiştir. Deplasman 148 mm olduğunda basınç donatılarında burkulma 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. SB deney elemanında süneklik oranı yaklaşık olarak 17 civarında olmuştur. Şekil 4.13'te bu elemana ait yük deplasman grafiği verilmiştir.



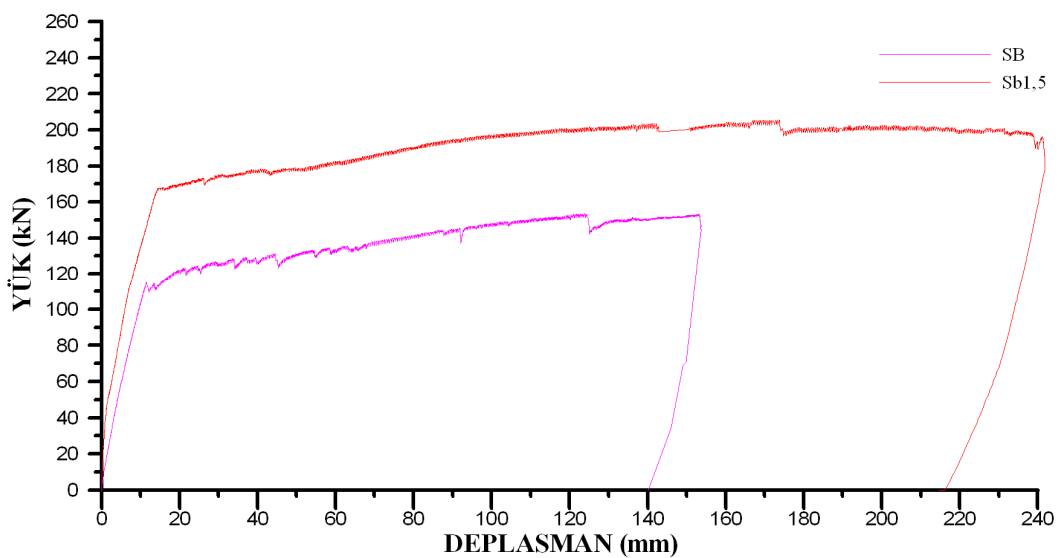
Resim 4.1. SB deney elemanı



Şekil 4.13. SB deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.2. Sb1,5 güçlendirilmiş kiriş

Sb1,5 deney elemanı, yalın kirişin alt yüzüne 1,5mm kalınlığında 4000mm uzunluğunda levhanın yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deneye başladıktan sonra, 60 kN yük ve 3 mm deplasmanda ilk çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Yük 166 kN ve deplasman 16 mm olduğunda akma başlayarak maksimum çatlak genişliği 1mm olarak ölçülmüştür. Yük 170 kN ve deplasman 27 mm'ye ulaştığında ölçüm bölgesi içerisinde çatlaklar levha yüzeyine paralel olarak gelişmiş ve aderans çözülmesi başlamıştır. 177 kN yük ve 47 mm deplasman değerinde maksimum çatlak genişlikleri 3mm'ye kadar genişlemiş ve orta bölgedeki aderans çözülmesi 1m'lik kısma yayılmıştır. 191 kN yükte kiriş ortasında basınç bölgesinde ezilme başlamıştır. 200 kN yük ve 136 mm deplasman değerinde, sol mesnette de ezilme meydana gelmiş ve bunun yanında her iki mesnet ortasında da ezilmeler görülmeye başlanmıştır. Deneye 200 kN yük ve 240 mm deplasmana kadar devam edilmiş ve deney sona erdirilmiştir. Deney sonucunda, çelik levha uçlarında sıyrılma görülmemiştir. Aderans çözülmesi ise, levha ucuna kadar uzayamamıştır. Deney sonunda levha boyu 4060 mm, levhanın orta kısmında eni 195 mm olarak ölçülmüştür.



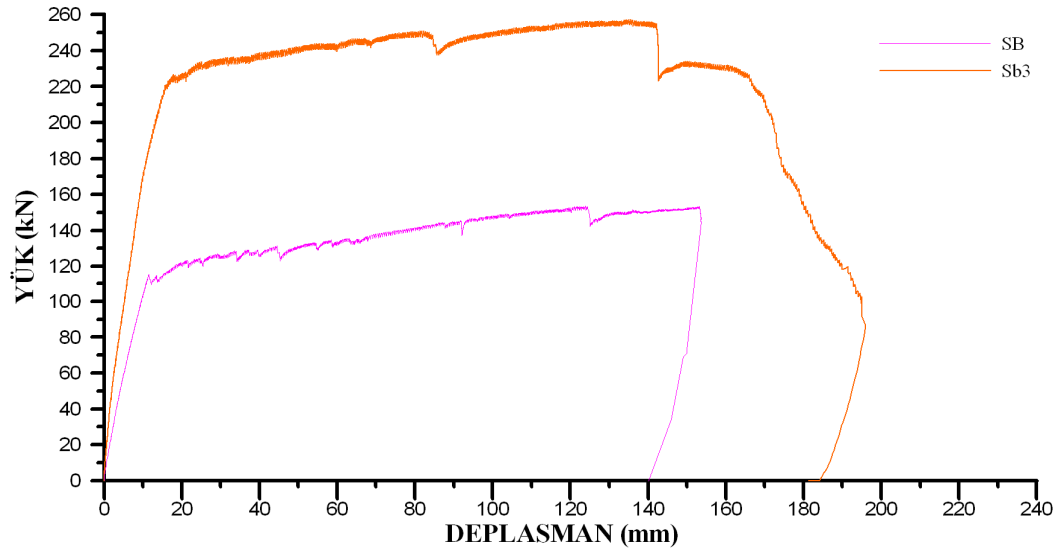
Şekil 4.14. Sb1,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.2. Sb1,5 deney elamanı

4.6.3. Sb3 güçlendirilmiş kiriş

Sb3 deney elemanı, 3 mm kalınlığında elik levhanın kiriş alt yüzüne yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deneye başladıktan sonra, 65 kN yük ve 3,1 mm deplasmanda ilk çatlaklar görölmeye başlanmıştır. 225 kN yük ve 19,5 mm deplasman değeri ne ulaşıldığında, donatıda akma başlamıştır. Bu yük durumunda basınç bölgesi yüksekliği 150 mm olarak ölçölmüştür. 235 kN yük ve 36 mm deplasmanda kiriş orta bölgesinde elik levha ile beton yüzey arasında aderans özölmeleri başlamış ve maksimum çatlak genişliği 3 mm' ye ulaşmıştır. 240 kN yük, 60 mm deplasman değeri nde sol mesnette betonda ezilme meydana gelmeye başlayarak deplasman 136 mm' ye ulaştığında basınç donatısında burkulma oluşmuştur. 215 kN yük ve 168 mm deplasmanda yükte ani değışmeler ve betondaki ezilme hızla artmaya başlamıştır. Deney sonucunda, göçme betonun ezilmesi ile meydana gelmiştir. Güçlendirme levhasında uç kısımlarda sıyrılma oluşmamıştır. Levha boyundaki uzama 60 mm ve orta kısımda endeki daralma 5 mm olarak ölçölmüştür.



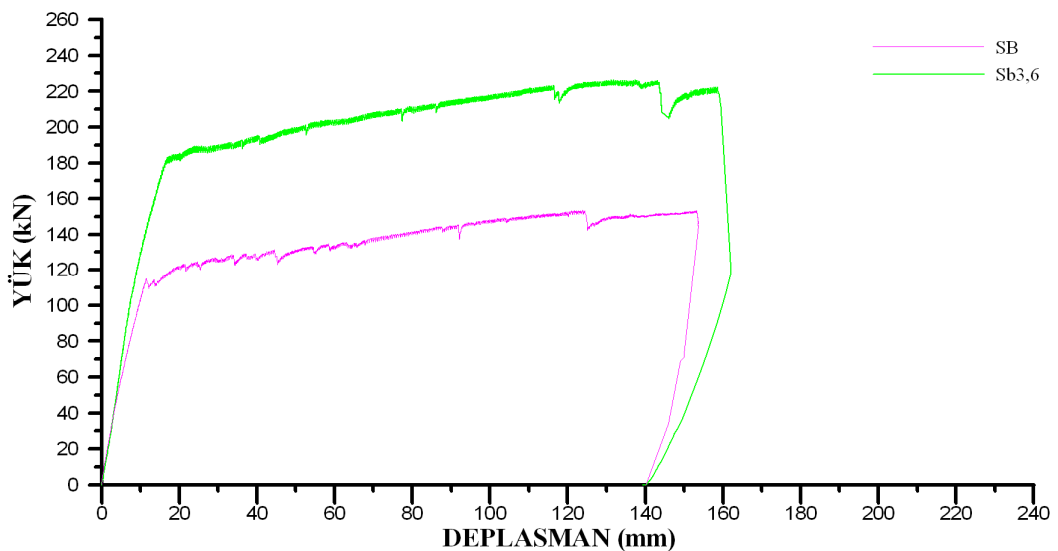
Şekil 4.15. Sb3 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.3. Sb3 deney elemanı

4.6.4. Sb3,6 güçlendirilmiş kiriş

Bu deney elemanı levha alanı 720 mm^2 olan 3,6 mm kalınlığındaki çelik levhanın kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılması ile hazırlanmıştır. Deney elemanı imalat sırasında hafif sayılabilecek şekilde hasar görmüştür. Bu kirişte 4-5 adet kılcal çatlak mevcuttur. Güçlendirme levhası kirişe hafif hasar oluştuktan sonra yapıştırılmıştır. Deneye başlandıktan sonra 130 kN yük ve 11 mm deplasman değerinde 0,1 mm' den küçük yeni çatlaklar belirmeye başlamıştır. Yük 183 kN' a ulaştığında donatıda akma başlamıştır. 185 kN yük ve 20 mm deplasman değerinde çelik levha ve beton yüzey arasında aderans çözümleri oluşmuştur. 190 kN yük değerinde ölçülen maksimum çatlak genişliği 2 mm dir. Bu çatlaklar kiriş alt yüzüne geldiğinde körelmekte ve çekme yüzüne paralel aderans çatlaklarına dönüşmektedir. 20 kN yük ve 59 mm deplasmanda kiriş orta bölgesinde ezilme meydana gelmiştir. 215 kN yük değerine ulaşıldığında aderans çözümlerinin orta 2 m'lik kısma yayıldığı belirlenmiştir. 220 kN yük ve 150 mm deplasman değerinde aderans çözümleri sağ uç kısma kadar uzanmış ve çelik levha sağ uçtan sıyrılmıştır. Deney sonucunda çelik levha boyunda 50 mm uzama ve levha ortasındaki daralması ise 3 mm olarak ölçülmüştür.



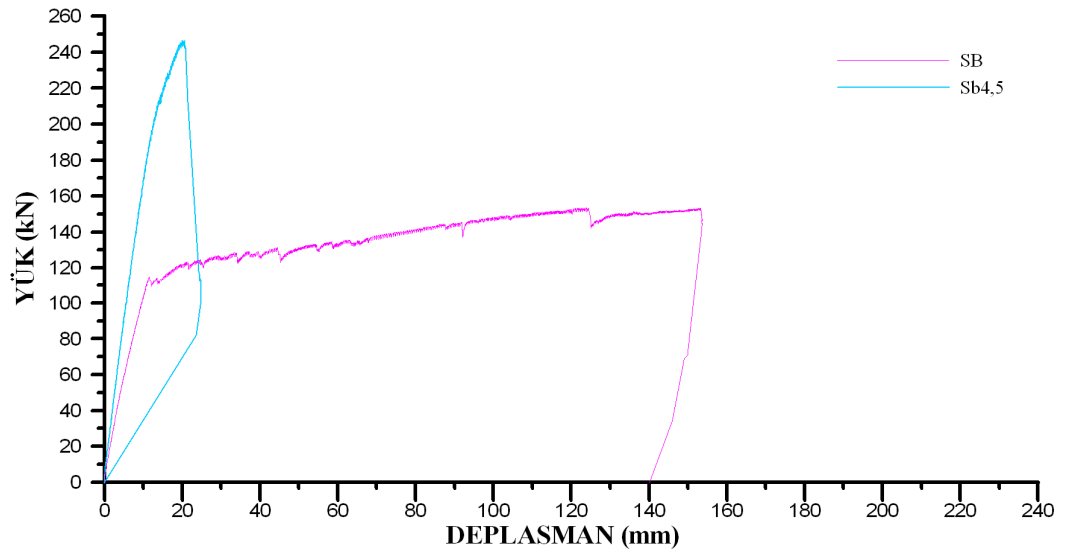
Şekil 4.16. Sb3,6 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.4. Sb3,6 deney elamanı

4.6.5. Sb4,5 güçlendirilmiş kiriş

Deney elemanına 3 mm kalınlığında ve 4000 mm uzunluğundaki çelik levha epoksi ile kiriş alt yüzüne yapıştırıldıktan sonra 1,5 mm kalınlığında ve 2400 mm uzunluğundaki çelik levha epoksi ile 3mm kalınlığındaki levhaya yapıştırılarak uçlarından kaynaklanmıştır. Orta kısımda toplam levha kalınlığı 4,5 mm olmuştur. Deneye başlandıktan sonra, 10 kN yük değerinde ilk çatlaklar görülmeye başlanmıştır. 135 kN yük ve 8,1 mm deplasman değerinde beliren tüm çatlaklar 0,05 mm' den küçüktür. 240 kN yük değerinde maksimum çatlak genişliği 0,5 mm' ye ulaşmıştır. Bu yük değerinden sonra, levhanın sağ ucunda 45^0 'lık kesme çatlağı görülmüştür. Çatlak paspayı boyunca uzayarak levha sağ uçtan sıyrılmış ve yükte ani düşüş gözlenmiştir. Ayrılma yaklaşık olarak 50 mm kalınlığındaki paspayının sıyrılmasından olmuştur. Levhanın sol ucunda da 45^0 'lık kesme çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Levhada hiçbir şekilde aderans çözülmesi oluşmamış ve betonda da ezilme görülmemiştir. Elemanda istenmeyen göçme mekanizması meydana gelmiştir.



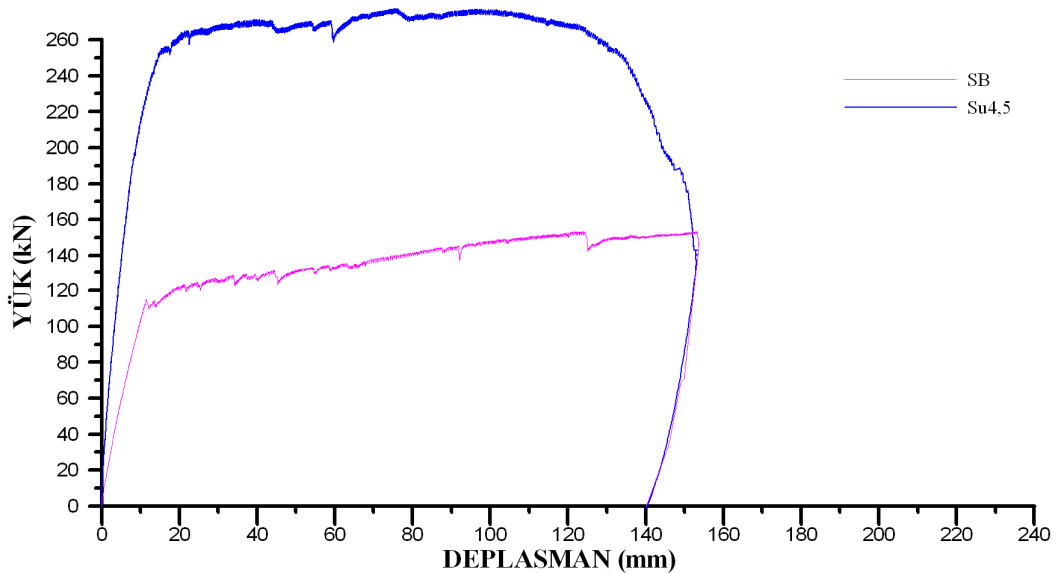
Şekil 4.17. Sb4,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.5. Sb4,5 deney elemanı

4.6.6. Su4,5 güçlendirilmiş kiriş

Su4,5 elemanı, Sb4,5 elemanı ile aynı şekilde güçlendirildikten sonra levha uçlarında 80 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığında U levhalar 80 mm ara ile yan ve alt yüze epoksi ile yapıştırılmıştır. Orta kısımlara 30 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığındaki levhalar 120 mm ara ile yalnızca yan yüzlerinden yapıştırılmıştır. Deney başladıktan sonra 190 kN yük ve 8,4 mm deplasmanda ilk çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Yük 265 kN ve deplasman 26 mm' ye geldiğinde maksimum çatlak genişliği 1 mm' ye ulaşmıştır. 265 kN yükte, deplasman 35 mm' ye ulaştığı zaman sol mesnette betonda ezilme başlamıştır. Deneyin bu aşamasında beliren çatlakların tamamının ölçüm bölgesi içerisinde ve basınç bloğu yüksekliğinin de yaklaşık olarak 130 mm olduğu gözlenmiştir. 270 kN yükte, deplasman 66 mm iken basınç donatılarında hafif burkulmalar belirmeye başlamıştır. Yük 25,5 kN ve deplasman 130 mm iken yükte hızlı azalmalar görülmeye başlanmış ve kırılma meydana gelmiştir. Göçme betondaki ezilmenin orta bölgede kırılmaya dönüşüp alt yüzeye ilerlemesi ile oluşmuştur. Levha ve beton arasındaki aderans çözümleri sınırlı kalmıştır. İki levha arasında da ayrılmalar meydana gelmiş, ancak, bunlar levha uçlarına kadar ilerlememiştir. Levha ve kaynaklarda hiçbir sorun görülmemiştir. Deney sonunda levha boyu 4040 mm, orta kısımda eni 198 mm olarak ölçülmüştür.



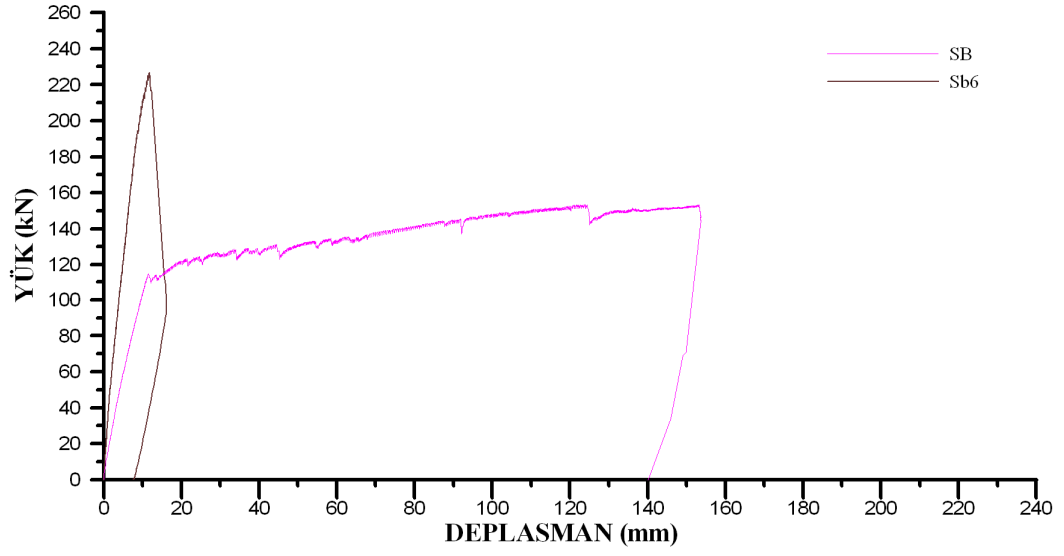
Şekil 4.18. Su4,5 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.6. Su4,5 deney elamanı

4.6.7. Sb6 güçlendirilmiş kiriş

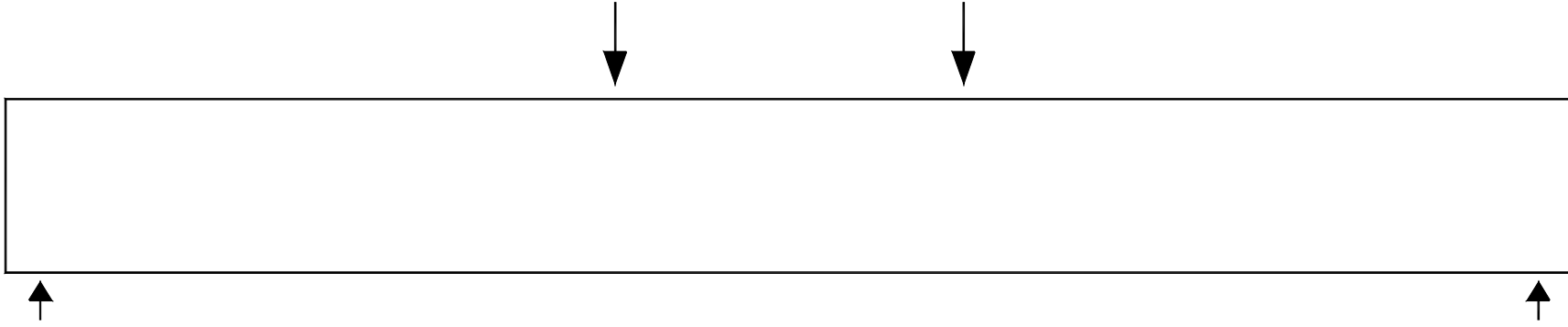
Sb6 deney elemanı, 6 mm kalınlığında çelik levhanın kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Bu elemanda başka herhangi bir önlem alınmamıştır. Deneye başladıktan sonra, 12 kN yük değerinde ilk çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Yük 228 kN' a geldiğinde sol uçta belirgin kesme çatlakları oluşmuş ve daha sonra levha sol ucundan 1500mm'lik kısımda paspayını da sıyrarak ayrılmıştır. Bu aşamadan sonra deneye son verilmiştir. Çelik levha ve beton arasındaki epoksi yapıştırıcıda aderans çözümleri görülmemiştir. Göçme, beton tabaksının kopması ile gerçekleşmiştir. Levha boyunda herhangi bir uzama ve daralma olmamıştır. Sb6 elemanının deney sonrasındaki hasarlı görünümü Resim 4.6'da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.27'de elemandaki çatlak gelişimi ve sıyrılma açıkça görülmektedir



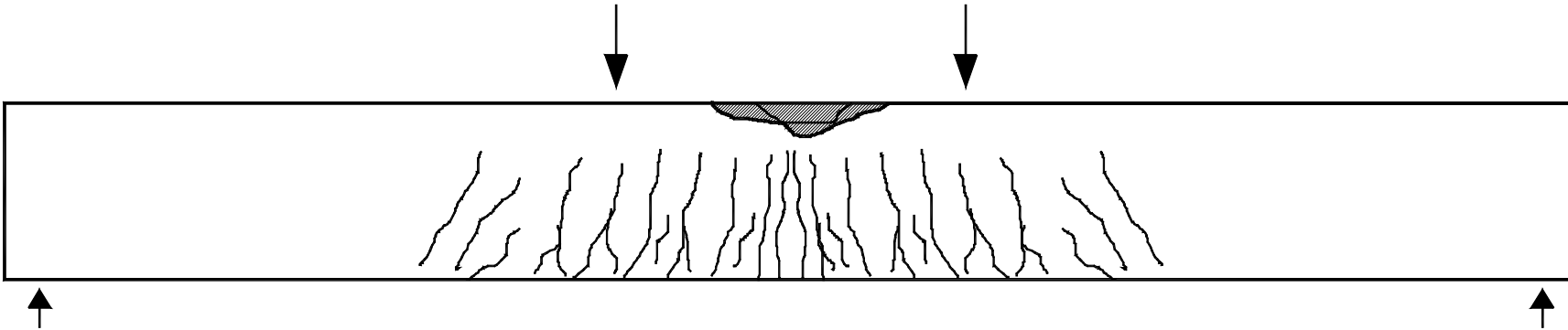
Şekil 4.19. Sb6 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



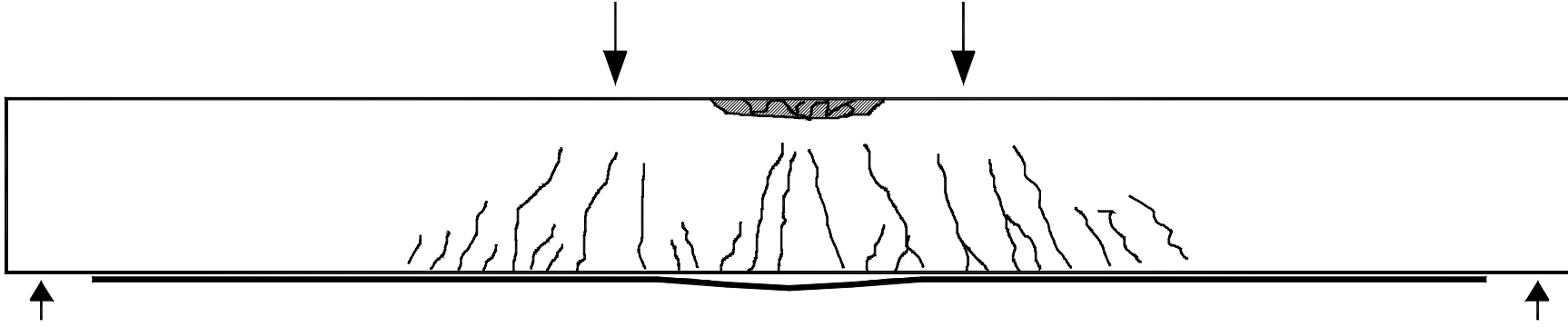
Resim 4.7. Sb6 deney elemanı



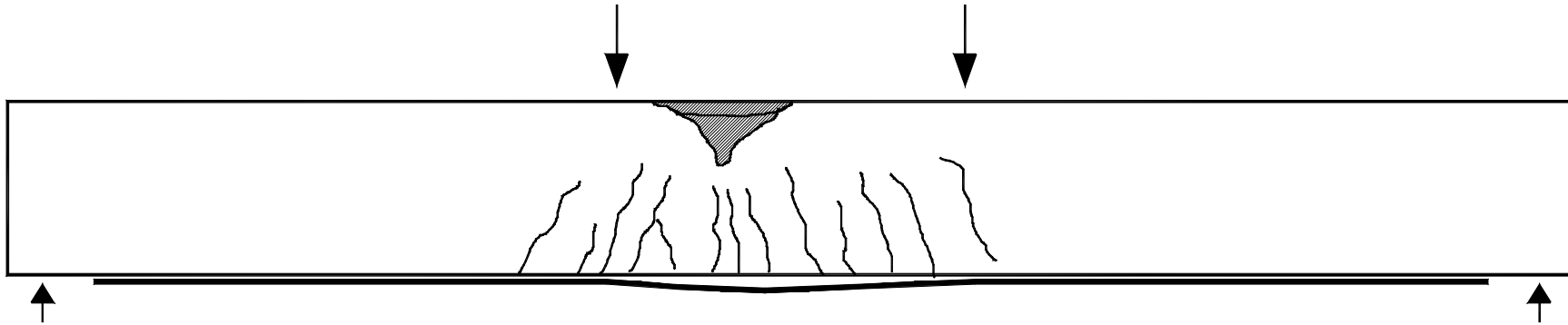
Şekil 4.20. SB deney elemanı (deney öncesi hasarsız durum)



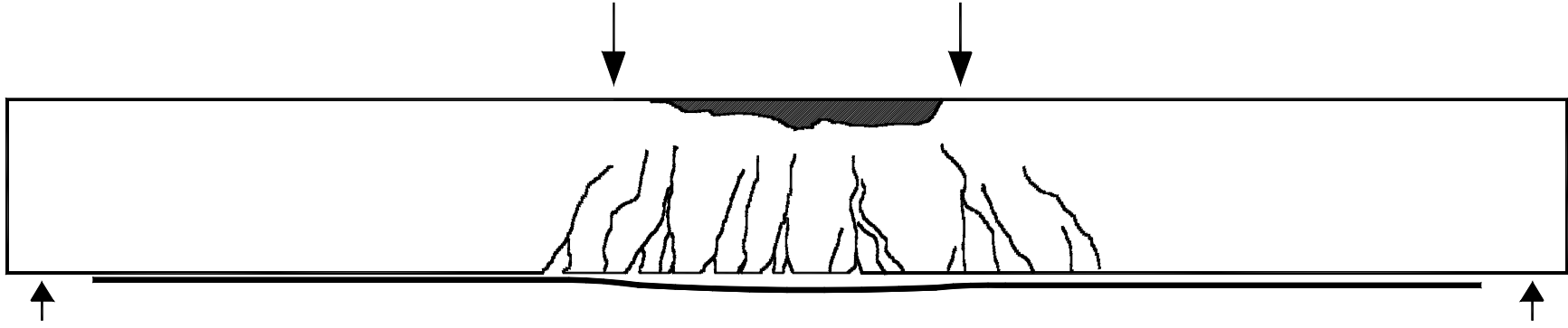
Şekil 4.21. SB deney elemanı çatlak haritası



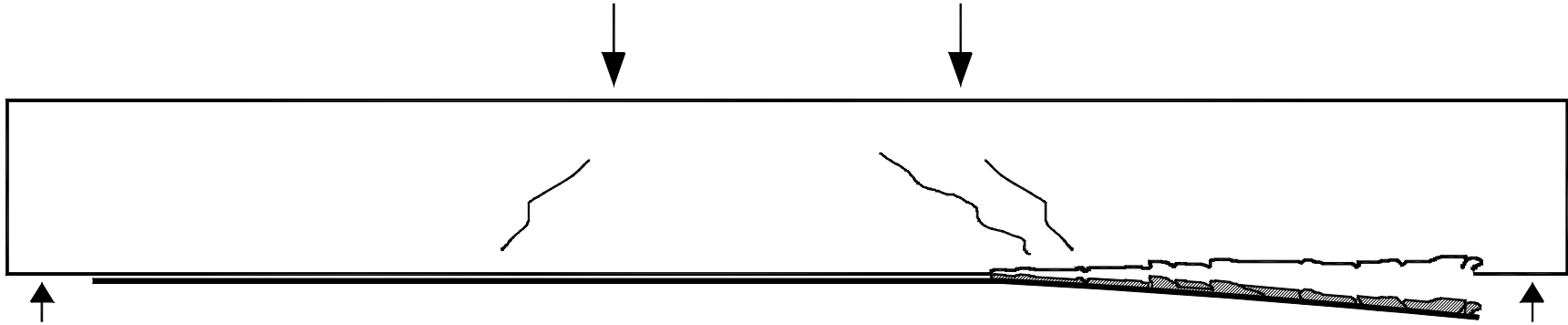
Şekil 4.22. Sb1,5 deney elemanı çatlak haritası



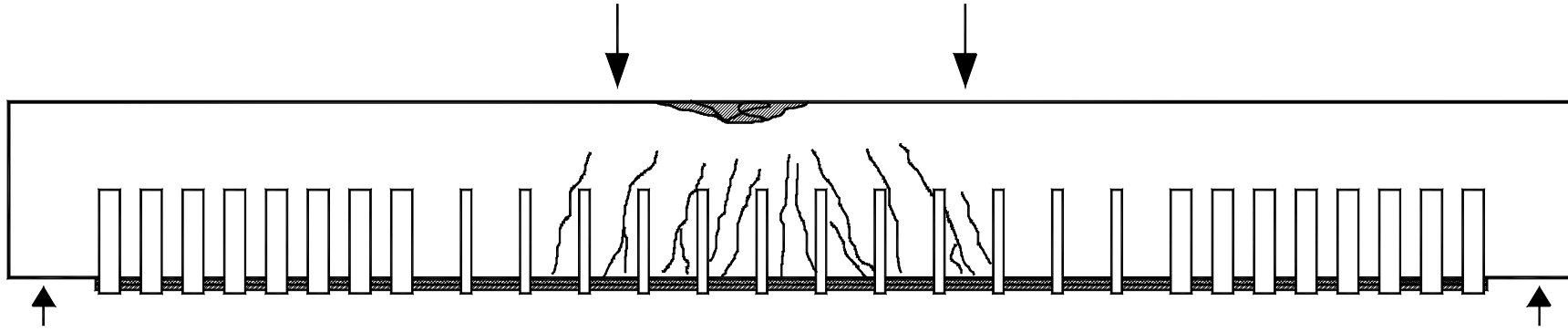
Şekil 4.23. Sb3 deney elemanı çatlak haritası



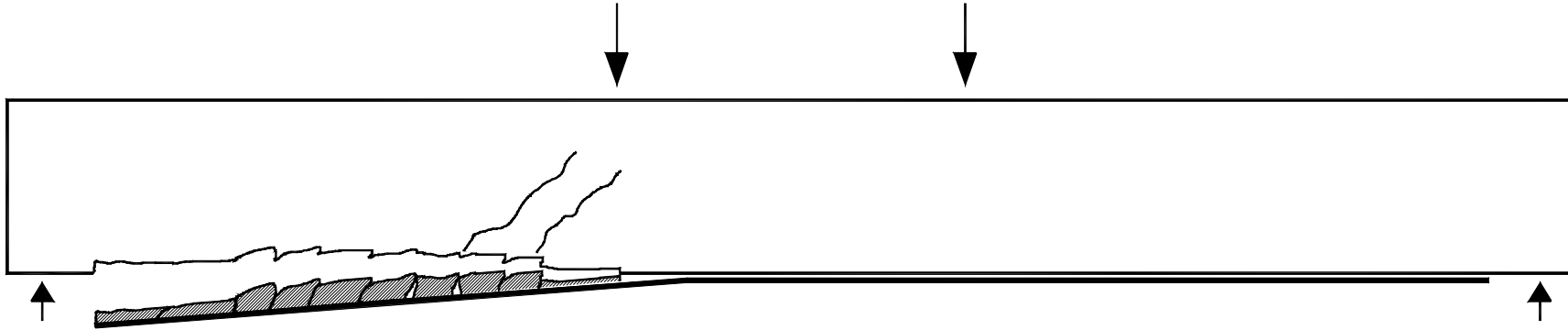
Şekil 4.24. Sb3,6 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.25. Sb4,5 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.26. Su4,5 deney elemanı çatlak haritası



Şekil 4.27. Sb6 deney elemanı çatlak haritası

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Genel

Bu bölümde, 4. Bölümde belirtilen sistem ve yöntemlerle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ele alınacaktır. Sonuçların değerlendirilmesinde elemanların taşıma güçleri, süneklik oranları, eğilme rijitlikleri ve enerji tüketme kapasiteleri ele alınmıştır. Değerlendirmede öncelikle sonuçlar kendi içinde incelenmiş ve çizelgeler halinde sunulmuştur. Bir sonraki aşamada deney sonuçları, Uysal'ın [1], Arslan'ın [2] ve bu çalışma ile birlikte aynı zamanlı yürütülen Kayar'ın¹ çalışmaları ile karşılaştırılmış ve çelik levhalar ile güçlendirme yöntemi kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

5.2. Taşıma Gücü

Güçlendirmenin ana amaçlarından olan dayanımın artırılması ile ilgili yapılan deneysel çalışma sonucunda elemanın taşıma kapasitelerinin yalın kirişin taşıma kapasitesinin iki katı civarına kadar çıkarıldığı görülmüştür. Genelde levha kalınlığı arttıkça taşıma güçleri de artmıştır.

Alt yüzünden 1,5mm, 3,0mm, 3,6mm, 4,5mm ve 6,0mm'lik çelik levhalar ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 5.1.'de birlikte gösterilmiştir. Levha kalınlığının artması teorik olarak taşıma gücünü arttırdığı deney ve hesaplardan gözlenmiş olup ancak, belirli bir sınırdan sonra sadece levha kalınlığını arttırarak taşıma gücünü arttırmanın mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Burada levha kalınlığının belli bir değerin üzerine çıkması durumunda ek önlemler alınarak istenilen taşıma güçlerine ulaşılabilceği görülmüştür.

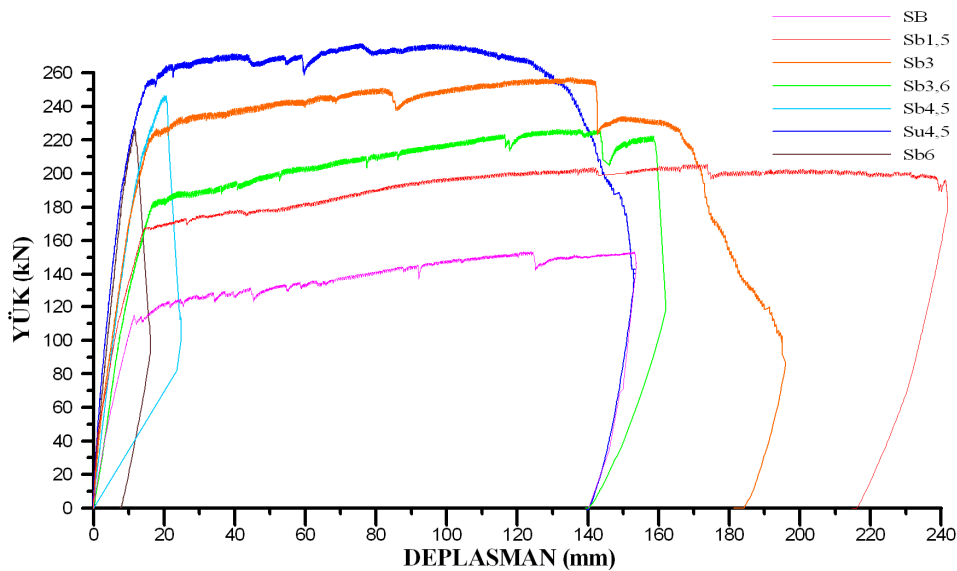
Herhangi bir ekstra önlem alınmamış kalın levhalı elemanlarda (Sb4,5, Sb6) uç bölgelerde kayma gerilmelerinden dolayı levhanın beton tabakayı da alarak

¹ Bu tez çalışması ile paralel olarak yürütülen Kayar'ın deneysel çalışması ile ilgili grafik ve çizelgeler Ek-3'te verilmiştir.

sıyırılması nedeniyle beklenen taşıma güçlerine ulaşamamıştır. Su4,5 deney elemanında ek önlem olarak çelik levhanın uçlardan sıyırılmasını önlemek ve orta bölgede aderans çözülmelerini engelleyebilmek için yan yüz çelik levhalar kullanılmıştır. Yan yüz levhaların yüksekliği kiriş orta bölgesini geçecek boyutta belirlenmiştir. Bu deney elemanında taşıma gücünde istenilen artış sağlanmıştır.

Bu çalışmada sergilenen davranış betonarmenin ana ilkeleri ile de uyuşmakta ve çelik levha ile betonarme kirişlerin kompozit bir davranış sergilediği görülmektedir. Çizelge 5.1.'de teorik olarak hesaplanan ve deneysel çalışmada elde edilen taşıma güçleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 incelendiğinde teorik taşıma güçlerine deneyler sonunda ulaşıldığı görülmektedir. Burada yalnızca Sb3,6 elemanında teorik taşıma güçlerine ulaşılmamıştır. Bunun nedeni ise Sb3,6 elemanının deney öncesinde hafif hasar görmesidir. Bu durumda bile teorik taşıma gücünün %87'ine ulaşmıştır.



Şekil 5.1. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri

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

<i>Deney Elemanı</i>	<i>h</i>	<i>d'</i>	<i>d</i>	<i>As₁</i>	<i>As₂</i>	<i>As_L</i>	<i>Py₁</i>	<i>Pu₁</i>	<i>Py₂</i>	<i>Pu₂</i>	<i>Py₁/Py₂</i>	<i>Pu₁/Pu₂</i>
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm²</i>	<i>mm²</i>	<i>mm²</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>		
<i>SB</i>	<i>500</i>	<i>30</i>	<i>470</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>0</i>	<i>115</i>	<i>152</i>	<i>112</i>	<i>151</i>	<i>1,028</i>	<i>1,008</i>
<i>Sb1,5</i>	<i>500</i>	<i>30</i>	<i>470</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>300</i>	<i>162</i>	<i>205</i>	<i>156</i>	<i>205</i>	<i>1,036</i>	<i>1,000</i>
<i>Sb3</i>	<i>500</i>	<i>30</i>	<i>470</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>600</i>	<i>210</i>	<i>258</i>	<i>199</i>	<i>256</i>	<i>1,056</i>	<i>1,008</i>
<i>Sb3,6</i>	<i>500</i>	<i>50</i>	<i>450</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>720</i>	<i>183</i>	<i>228</i>	<i>210</i>	<i>268</i>	<i>0,870</i>	<i>0,850</i>
<i>Sb4,5</i>	<i>500</i>	<i>30</i>	<i>470</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>900</i>	<i>---</i>	<i>---</i>	<i>239</i>	<i>303</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>Su4,5</i>	<i>500</i>	<i>50</i>	<i>450</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>900</i>	<i>240</i>	<i>282</i>	<i>233</i>	<i>294</i>	<i>1,030</i>	<i>0,958</i>
<i>Sb6</i>	<i>500</i>	<i>30</i>	<i>470</i>	<i>157</i>	<i>462</i>	<i>1200</i>	<i>---</i>	<i>---</i>	<i>277</i>	<i>347</i>	<i>---</i>	<i>---</i>

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

Deprem etkisinde yapıda çatlak bile oluşması istenmiyorsa, yapının elastik yük taşıma gücünün yüksek olması gerekmektedir. Bu da ancak büyük ve rijit kesitler kullanarak elde edilebilmektedir. Böyle bir tasarım ise çok yüksek maliyetlere neden olacaktır. Yapı maliyeti azaltmak ve depremden oluşan enerjinin bir kısmını plastik aşamada tüketmek istenmesi durumunda, yapı elemanlarının sünek bir davranış gösterecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Bir elemanın taşıma gücünde önemli bir kayıp olmaksızın deformasyon yapabilme ve tekrarlı yükler altında enerji tüketebilme özelliğine elemanın sünekliği denir. Şiddetli depremler sırasında, yapı elastik ötesi deformasyonlar nedeniyle hasar görebilmekte ancak, süneklik ve enerji tüketebilme özelliğiyle göçmeden ayakta durabilmektedir.

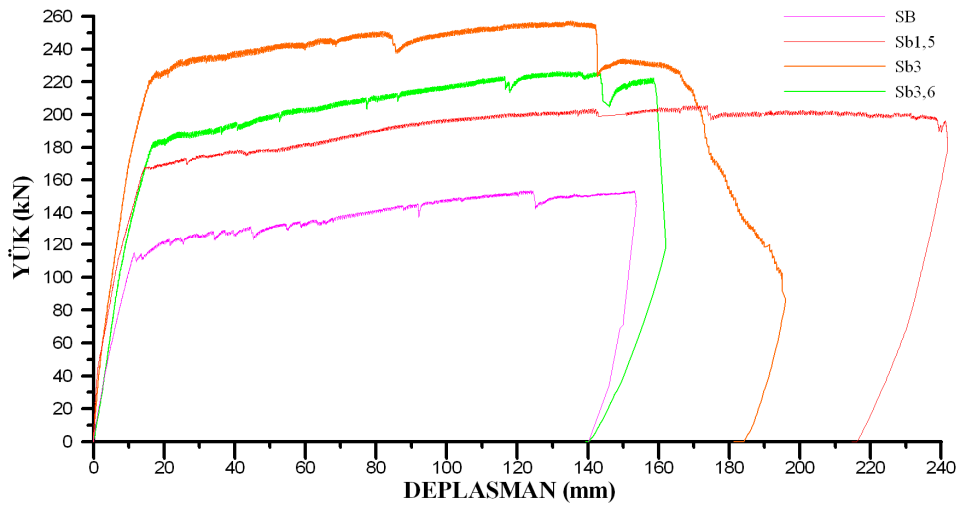
Bu çalışmada süneklik oranı, ulaşılan en büyük yük değerinin %15 dayanım kaybettiği andaki deplasman değerinin akma anındaki deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.2.'de deney elemanlarının süneklik oranları ve yalın kiriş olan SB deney elemanının süneklik oranı 1 kabul edilerek hesaplanan göreceli süneklik değerleri belirtilmiştir.

Şekil 5.2.'de yük-deplasman grafikleri incelendiğinde en sünek davranışı Sb1,5 deney elemanının gösterdiği görülmektedir. Sb3, Sb3,6 elemanları da yeterli süneklik göstermişlerdir. Sb4,5 ve Sb6 deney elemanları süneklik yönünden kötü bir davranış sergilemişlerdir. Bunun nedeni betonarmenin sünek eleman tasarımı için koyduğu üst sınırın aşılması değil, levha uçlarında kayma gerilmelerinden dolayı levhanın beton tabakayı da alarak yüzeyden sıyrılmasının önlenememesidir. Bu nedenle, Sb4,5 elemanı ile kıyaslanmak üzere Su4,5 elemanı tasarlanarak deneye tabi tutulmuş ve yeterli süneklik elde edilmiştir. Bu karşılaştırma Şekil 5.2.'de gösterilmektedir. Su4,5 elemanındaki süneklik değeri Sb3 ve Sb3,6 elemanlarının süneklik değerlerinden bile fazla olduğu görülmüştür. Bu durum iyi tasarlanmış yan yüz çelik levhalarının elemanın sünek davranması üzerindeki etkisini göstermektedir.

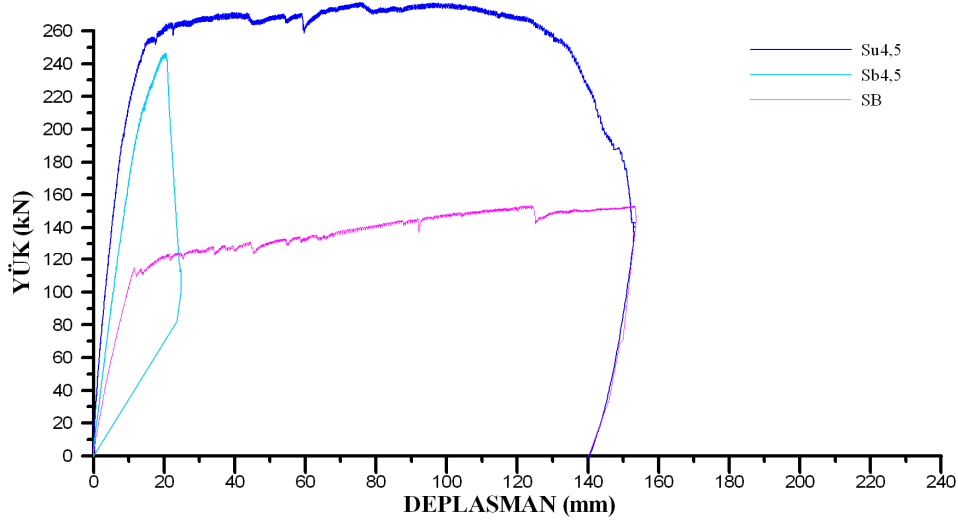
Çizelge 5.2. Deney elemanları süneklik oranları

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	---	---

Deney elemanlarından Sb4,5 ve Sb6 dışındaki tüm elemanlarda istenilen süneklik oranları sağlanmış olup en düşük süneklik oranı 9 olarak tespit edilmiştir. Bu değer betonarme elemanlar için alt sınır olan 4 değerinin üzerindedir. Deneyisel çalışmada güçlendirmede dayanım ile birlikte sünekliğin de beraber düşünüldüğü görülmektedir.



Şekil 5.2. Yalnızca alt yüzden çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş sünek davranış gösteren deney elemanları



Şekil 5.3. 4,5 mm'lik çelik levha ile güçlendirilmiş kirişlerin karşılaştırılması

Deney sonrası levha ölçümlerden elde edilen veriler Çizelge 5.3'de gösterilmektedir. SB deney elemanı yalın kiriş olduğu için çizelgede boş bırakılmıştır.

Çizelge 5.3. Çelik levhalarda oluşan uzama ve kısalma miktarları

Deney Elemanı	Uzamış Levha Boyu (mm)	Levha boyundaki uzama (mm)	Kısalmış Levha eni (mm)	Levha enindeki daralma(mm)
SB	---	---	---	---
Sb1,5	4060	60	195	5
Sb3	4060	60	195	5
Sb3,6	4050	50	197	3
Sb4,5	4000	0	200	0
Su4,5	4040	40	198	2
Sb6	4000	0	200	0

5.4. Enerji Tüketimi

Betonarme taşıyıcı sistemlerin enerji tüketebilme kabiliyetlerinin yüksek olması özellikle istenen bir ilkedir. Dış yükler etkisi ile betonarme taşıyıcı sistem elastik bölge içerisinde kalıyor ise sistem enerjiyi geri iletebilmektedir. Bu genellikle küçük dış kuvvet etkisi ile veya yapının aşırı rijit tasarlanması nedeniyle olmaktadır. Ülkemizde meydana gelen depremler incelendiğinde mevcut yapıların genellikle iyi projelendirilmediği ve hasarların özellikle enerji tüketebilme kabiliyetinin düşük olmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Bu hususlar dikkate alınarak yapı elemanlarının tasarımı yapılırken elastik bölge dışındaki davranışlarının enerjinin tüketebilmesine katkı sağlayacak bir nitelikte olmasına dikkat edilmelidir. Yapı elemanlarında bu özellikleri oluşturmaya çalışırken ekonomik bir çözümünde dışına çıkılmaması istenir. Bu nedenle ekonomik bir tasarım meydana getirebilmek için büyük dış yükler altında taşıyıcı sistem üzerindeki enerjinin başka enerjilere dönüştürülmesi istenir. Enerjinin dönüştürülebilen kısmına tüketilebilen enerji denir.

Enerji bilindiği gibi yapılan işe, iş ise kuvvet ile başlangıçtaki konuma göre kat edilen yolun çarpımına eşittir. Buradan hareketle deney elemanlarının toplam enerji kapasiteleri elemanlara ait yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır. Çizelge 5.4.' te elemanlara ait toplam enerji tüketilebilme kapasiteleri joule cinsinden ve toplam enerji oranları verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

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

Çizelge 5.4. 'ten de görüleceği gibi SB referans kirişinin toplam enerji tüketimi 1 birim olarak kabul edilecek olduğunda, diğer elemanlardan Sb1,5, Sb3 elemanları yalın kirişin yaklaşık 2 katı kadar enerji tüketebilme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Sb3,6 ve Su4,5 elemanları referans kirişe oranla yaklaşık 1,5 katı kadar enerji tüketebilme kabiliyetine sahiptir. Sb4,5 ve Sb6 elemanları güçlendirme levhalarının uç kısımlardan sıyrılması nedeniyle rijitlikte ani düşüş gözlenmiş ve elemanlarda sıyrılma göçmesi meydana gelmiştir. Göçme anındaki enerji tüketebilme kapasiteleri çok düşük değerlerde kalmıştır.

5.5. Eğilme Rijitliği

Yapı elemanlarında eğilme rijitliği moment-eğrilik ilişkisinin eğimine eşittir. Eğilme rijitliğinin hesaplanması için moment eğrilik grafiğinin çıkış kolunun eğimi dikkate alınmalıdır. Ancak, 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 elemanların yük deplasman grafiklerinde belirlenen akma anındaki yük değerinin deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.5'te elemanların rijitlik değerleri ve yalın kiriş rijitliği 1 alınarak diğer elemanların rijitlik oranları verilmiştir. Çizelge 5.5 incelendiğinde tüm elemanların yalın kirişe oranla daha rijit davrandıkları görülmektedir. Çelik levha kalınlığının artması rijitliğin artmasında etkili olmuştur. Süneklik ve enerji tüketebilme incelemelerinden de görüleceği gibi rijitliğin artması tek başına etkili bir çözüm olmamaktadır. Kalınlık arttığında elemanın rijitliği artmakta ama süneklik oranlarında azalma meydana gelmektedir.

Çizelge 5.5. Deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları

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

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

Epoksi ile yapıştırılmış çelik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin ele alındığı bu çalışma Uysal'ın [1] epoksi ile yapıştırılan delikli çelik levhalarla kiriş güçlendirilmesi çalışması ile karşılaştırılarak güçlendirme levhalarının deliksiz veya delikli olmasının güçlendirme üzerine etkisi araştırılmıştır.

Uysal'ın çalışmasında kullanılan betonarme kiriş boyuları ve malzeme özellikleri bu çalışmada ele alınan elemanlar ile aynı olduğundan elemanları dayanım, rijitlik ve süneklik açısından karşılaştırmak anlamlı olacaktır. Ek-1'de Uysal'ın çalışması ile ilgili deney elemanlarına ait yük deplasman grafikleri; dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketebilme kapasiteleri oranlarına ait çizelgeler verilmiştir.

Uysal'ın Ek-1'de verilen süneklik oranları Çizelge 5.2.'de belirtilen süneklik oranları ile karşılaştırıldığında PSb6 elemanındaki süneklik oranı 7,70 iken bu çalışmadaki aynı enkesit alanına sahip ve aynı yöntem uygulanmış Sb3,6 elemanındaki süneklik oranı ise 9,00 olarak tespit edilmiştir. Uysal'ın çalışmasında aynı enkesit alanlı PSbb6 elemanına ait süneklik oranı ise 13,1 olarak belirtilmiştir. Bu sonuçlardan şu tespiti yapabiliriz; alt yüzden bulon kullanılmadan uygulanan delikli çelik levhali elemanın süneklik oranı düz levhaliye göre daha düşük, bulon kullanılarak oluşturulan elemandaki süneklik oranı ise daha fazla olmuştur.

Güçlendirme yönteminde yan yüz kullanılarak yapılan deneyler karşılaştırıldığında Uysal'ın PSu6 elemanında süneklik oranı 9,7 , bu çalışmada Su4,5 elemanına ait süneklik oranı ise 10,36 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, Uysal'ın PSub6 elemanında süneklik oranı 13,3 olarak daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Burada Uysal'ın PSu6 ve PSub6 elemanlarındaki güçlendirme levhası enkesit alanı 720 mm^2 , Su4,5 elemanındaki güçlendirme levhası enkesit alanı ise 900 mm^2 'dir. Yapılan bu kıyaslama tam gerçekçi olamayabilir ancak, süneklik oranlarında enkesit alanına bakıldığında Uysal'ın deney elemanlarının daha sünek davranması beklenen bir durumdur. Ancak, PSu6 elemanı enkesit alanı az olmasına rağmen Su4,5 elemanından süneklik açısından daha düşük bir davranış sergilemiştir. Diğer taraftan

PSub6 elemanı Su4,5 elemanına göre daha iyi bir süneklik göstermiştir. Bunun nedeni Uysal'ın da çalışmasının sonuç kısmında belirttiği gibi, özellikle kalın delikli levha kullanılarak yapılan güçlendirmede bulonla destekleme süneklik yönünden daha iyi bir davranış sergilemesini sağlamaktadır.

Enerji tüketimi yönünden aynı enkesite sahip elemanlar karşılaştırıldığında PSb6 elemanın toplam enerji tüketebilme kapasitesi 21244 joule, Sb3,6 elemanın ise 32240 joule olarak hesaplanmıştır. PSbb6 elemanına ait toplam enerji tüketebilme kapasitesi 39293 joule olarak belirtilmiştir. Buradan hareketle bulonsuz delikli çelik levha ile yapılan güçlendirme yönteminin enerji tüketim kapasitesi düz çelik levhadan düşüktür. Bulonlu yapılan uygulamada ise düz çelik levhadan daha yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir.

Delikli çelik levha ile bulonsuz olarak uygulanan güçlendirme yöntemi aynı enkesit alana sahip düz levha uygulamasına göre daha düşük süneklik ve enerji tüketimi sergilemektedir. Bulon kullanılarak delikli çelik levha ile yapılan güçlendirme yöntemi ise düz çelik levha uygulamasına göre daha iyi bir süneklik ve enerji tüketimi göstermektedir. Yalnız Sb3,6 elemanının bulonlu veya yan yüzler ile desteklenmesi durumu incelenmediğinden delikli çelik levhanın düz çelik levhaya oranla çok daha iyi davranış verdiğini kesin bir şekilde söyleyemeyiz. Aynı şartlarda (yalnızca alt yüzden yapıştırma) durumunda kalın düz levha daha iyi sonuç vermiştir.

5.7. Arslan, M.'nin [2] Çalışması ile Karşılaştırma

Bu çalışma ile Arslan'ın çalışması, uygulanan güçlendirme yöntemi açısından aynı ancak, malzeme özellikleri ve eleman boyutları açısından farklı olması nedeniyle karşılaştırma yalnızca davranış yönünden incelenmiştir. Ek-2'de Arslan'ın çalışması ile ilgili deney elemanlarına ait yük deplasman grafikleri ve çizelgeler verilmiştir.

Arslan'ın çalışmasında öncelikle levha boyunun uzun ve kısa olması incelenmiş ve kısa levha kullanımının çok başarısız olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın devamında levha boyu uzatılmış ve ileri aşamada uç kısımlarda sıyrılma problemine karşı çeşitli ek tedbirler denenmiştir. Genel olarak Arslan'ın çalışması, yapılan bu çalışma ile paralellik göstermektedir. Ancak, Arslan'ın çalışmasında başarılı olan elemanlarda bile kısa bir akma platosundan sonra yükte ani düşüşler gözlenmiştir. Bu çalışmada yapılan deneylerde ise akma platosunun uzun olduğu ve yeterli sünekliğin sağlandığı görülmektedir. Burada Arslan'ın çalışmasında ele aldığı kirişlerin donatı oranı ve elemanın boyutları düşünüldüğünde süneklik oranı bu çalışmadaki süneklik oranları ile karşılaştırılması doğru olmayacaktır.

Arslan'ın çalışmasında levhanın kiriş boyunca uzatılması tavsiye edilmiş ancak, levhanın uç kısımlardan mutlaka tutulması gerektiği savunulmuştur. Bu yapılan çalışmada ise Sb1,5 ve Sb3 elemanlarında uç kısımlarda sıyrılma problemi olmayıp deneylerden başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Buradan hareketle betonarme kirişin kesit ve mevcut donatıları dikkate alınarak belirlenecek sınırdaki levha kalınlığı ve boyunun uygun şekilde tasarımı yapıldığında uç kısımlarda önlem alınmamasının büyük sıkıntılar doğurmayacağı görülmüştür. Levha kalınlığının artması durumunda, uç kısımlardan sıyrılmaların gerçekleşmesinin kaçınılmaz olduğu görülmüş ve bu sorun yan yüzlerden önlem alınarak çözülmüştür.

5.8. Kayar, S.'nin Çalışması ile Karşılaştırma

Kayar'ın çalışması bu çalışma ile aynı zamanlı olarak yürütülmüştür. Kayar, çalışmasında çelik levhalar ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin rehabilitasyonu incelemiştir. Çalışma kapsamında çelik levhaların alt yüzden bulonla desteklenmesi de ele alınmıştır. Kayar'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-3'te Kayar'ın çalışmasına ait deney grafikleri ve çizelgeleri sunulmuştur.

Bu çalışmada Sb1,5 elemanının süneklik oranı 18,57 olarak tespit edilmiştir. Kayar'ın alt yüzden bulonla desteklenmiş Sbb1,5 deney elemanındaki süneklik oranı ise 13,46 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.

Sb3 deney elemanında süneklik oranı 9,44, Sbb3 deney elemanında ise süneklik oranı 11,57 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 çözülmelerini geciktirdiğinden dolayı süneklikte artışa neden olmuştur. Ancak, ince levhalarda bulon kullanılması kopmanın gerçekleşmesinden dolayı aderans çözülmelerine olan katkısı tek başına yeterli olmamıştır. Buradan hareketle ince levhaların kullanılması durumunda bulon kullanılması uygun sonuçlar vermemektedir. Ancak daha kalın levha kullanılması durumunda bulon kullanılması önerilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Betonarme elemanların güçlendirilmesinde dayanım kapasitelerinin artırılmasının yanında süneklik ve enerji tüketimi kapasitelerinin de istenilen düzeyde olması gerekmektedir. Sadece dayanımın artması güçlendirme açısından yeterli değildir. Dolayısıyla, iyi bir güçlendirme denildiğinde; uygulama olarak kolay, dayanım ve süneklik olarak yeterli ve aynı zamanda ekonomik çözümler düşünülmelidir.

Çelik levhalar ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi kapsamında geçmişte yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu deneysel çalışma ile birlikte elde edilen bulgular değerlendirilerek çelik levha kullanımının betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde etkili sonuçlar verebildiği görülmüştür.

Bu çalışmada, güçlendirmede genellikle karşılaşılan uygulama problemleri dikkate alınarak kolaylıkla uygulanabilecek çözümler geliştirilmeye çalışılmıştır. Uygulamayı aynen yansıtması için deney ölçeği 1/1 olarak belirlenmiş ve elemanlar günümüzdeki güçlendirilme ihtiyacı duyulan mevcut yapıları yansıtacak biçimde tasarlanmıştır. Deney elemanlarında kullanılan güçlendirme malzemeleri kolay ve ekonomik yollardan temin edilebilecek şekilde belirlenmiştir. Güçlendirme yöntemi kolay uygulanabilen ve kısa zamanda yüklere maruz bırakılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

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 sonuçlarının, donatı oranı daha yüksek olan kirişler için düşünüldüğünde, betonarmenin davranışından da bilindiği gibi aynı sonuçları vermesi beklenmemelidir. Dolayısıyla bu bölümde açıklanan sonuçlar, elemanların sınırlı sayıda olması ve elemanların eğilme donatısı ile ilişkili olması nedeniyle bu çerçevede ele alınmalıdır.

Çelik levhalar ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi kapsamında yapılan deneysel çalışma ve geçmişte yapılan çalışmaların karşılaştırılmaları ile elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme yönteminden başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Deney elemanlarının büyük bir kısmında yeterli dayanım ve süneklik elde edilmiştir.
- Deney elemanlarında hedeflenen taşıma güçlerine ulaşılmış ve güçlendirme levhalarının kapasite üzerine etkisinin betonarme monolitik kirişler için uygulanan taşıma gücü yöntemiyle hesaplanabileceği görülmüştür.
- Sadece alt yüzden yapılan ince çelik levha uygulaması dayanım ve süneklik açısından çok iyi sonuçlar vermektedir. Deneysel çalışmada 1,5 mm'lik çelik levha kullanılması ile yalın kirişin üzerinde dayanım ve süneklik elde edilmiştir. Ancak, sadece alt yüzden yapıştırılmış ince çelik levhalarda alttan bulon ile yapılan destekleme elemanın kesitini zayıflattığından levhada kopmaya neden olmuş ve sünekliğin daha da artmasını engellemiştir. Bu nedenle ince levha kullanılarak yapılacak güçlendirmede yeterli kalınlıkta epoksi kullanarak levhanın betonarme yüzeye direk yapıştırılması önerilmektedir.
- Levha kalınlığının arttırılarak alt yüzden yapılan güçlendirmeler de dayanım ve süneklik açısından yeterli sonuçlar vermektedir. Burada levha kalınlığının artması ile karşılaşılan aderans çözümlerinin önlenmesi ve daha yüksek süneklik elde edilebilmesi açısından alt yüzden bulon uygulanması daha iyi sonuçlar vermektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda 3 mm'lik levhalar kullanıldığında bulonlarla desteklenen çelik levha süneklik açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Kalın levha kullanılması durumunda sadece alt yüzünden yapıştırma işlemi yeterli olmamaktadır. Levha uçlarında oluşan kayma gerilmelerinden dolayı levha uç kısmından beton tabakasını da alarak sıyrılıp gevrek kırılma oluşturmaktadır. Güçlendirmenin ana ilkesi olan sünek bir tasarım meydana getirmek için ek

- önlemlerin mutlaka alınması gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda bu göçme mekanizmasının meydana geldiği elemanların örneği hazırlanarak, U şeklinde çelik levha kullanılıp sünek bir davranış sağlanmıştır. Bu gösteriyor ki kalın levha kullanılmasında bile gerekli ek tedbirler alındığında elemandan istenilen dayanım ve süneklik sağlanabilmektedir.
- Betonarme kirişlerde en düşük süneklik oranını 4 olarak istenmektedir. Deneysel çalışmada, uç kısımlardan levhanın sıyrılması sonucu gevrek göçmenin olduğu elemanların dışında en düşük süneklik oranı 9 olarak hesaplanmıştır. Uçlardan sıyrılmanın olduğu elemanlarda da gerekli ek tedbirlerin alınması durumunda minimum süneklik oranı şartının sağlandığı görülmüştür.
 - Yapılan deneysel çalışmalarda elemanların tamamında istenen eğilme rijitlikleri sağlanmıştır. Kalın levha kullanılan elemanlarda (Sb4,5-Sb6), büyük eğilme rijitlikleri elde edilmiş ancak gevrek göçme oluşması sonucunda rijitliklerde ani düşüş oluşmuştur. Bu tür ani rijitlik kayıplarının önlenmesi için sıyrılmanın engellenmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda bu husus incelenerek tasarlanan elemanın (Su4,5) yeterli bir eğilme rijitliği ve sünekliği sağladığı anlaşılmıştır.
 - Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde delikli çelik levha kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin iyi bir dayanım ve süneklik sağladığı görülmüştür. Ancak, alt yüzünden bulon kullanılmadan yapıştırılan delikli çelik levhalı elemanın süneklik oranı düz levha ile güçlendirilmiş elemana göre daha düşük, bulon kullanılarak oluşturulan elemandaki süneklik oranı ise daha fazla olmaktadır. Delikli çelik levha ile yapılan güçlendirmede alt kısımdan bulon uygulanması suretiyle çok yüksek seviyede dayanım ve süneklik elde edilmiştir.
 - Çelik levhanın betonarme kirişe yapıştırılmasında kullanılan epoksi beraber çalışmayı sağlayarak kompozit bir davranışı sergilemiştir. Sadece yapışmadan kaynaklanan bir göçme meydana gelmemiştir.

Mühendislikte teorik olarak yapılan hesapların uygulamada kendisini yansıtmaması açısından uygulama detaylarına fazlası ile önem verilmeli ve yapılan güçlendirme çalışmasının istenilen seviyeye ulaşması için denetiminin yapılması gerekmektedir. Çelik levha kullanılarak yapılacak güçlendirme işlemlerinde aşağıda belirtilen hususlara önemle dikkat edilmelidir.

- Güçlendirilecek kirişin yüzeyi temizlenmeli, mevcut sıva tabakası alınmalı, kabaran dökülen kısımlar kaldırılmalı ve gerekli olması durumunda tamir harçları kullanılarak yüzey düzeltilmelidir.
- Kullanılacak yapıştırma malzemesinin (epoksi) karışımı dikkatli bir şekilde hazırlanmalı ve belirtilen sürede uygun kalınlıkta sürülmelidir. Elemanda yapışmayan kısım kalmayacak şekilde işlem uygulanmalıdır.
- 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.
- Yapıştırıcı prizini almadan destek elemanları kesinlikle alınmamalıdır.
- Çelik levha yüzeye yapıştırılmadan önce üzerinde bulunabilecek kir, pas ve özellikle yağ tabakaları iyice temizlenmeli ve kurutulmalıdır.
- Bulon uygulanması durumunda, mevcut kirişin donatı yerleşiminin metal detektörle tespiti yapılmalı ve mevcut donatılara hiçbir şekilde zarar verecek müdahalede bulunulmamalıdır. Gerekirse bulon aralıklarında şaşırtma yapılabilir.
- 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.

- Çelik levha uygulaması yapıldıktan sonra korozyona karşı koruyucu önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Güçlendirme sonrasında kirişin davranışını bozabilecek dış etkiler oluşturulmamalıdır.

KAYNAKLAR

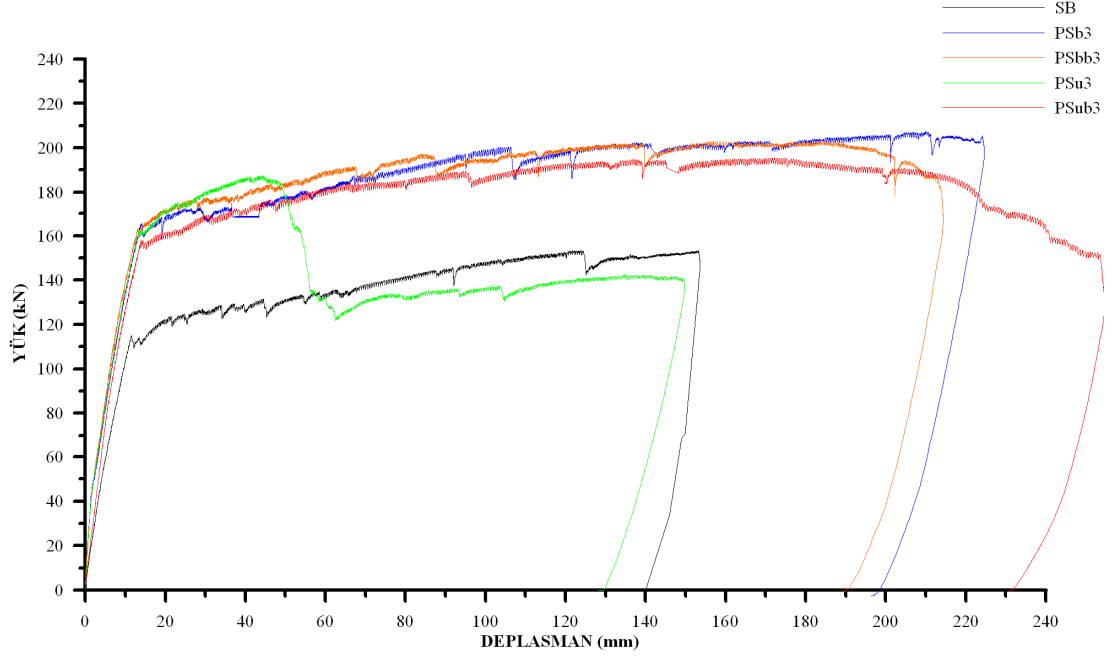
1. Uysal, A., “Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 59-74 (2006).
2. Arslan, M., “Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-69 (1991).
3. Gülenler, C., “Betonarme elemanların polimer yapıştırıcı kullanarak çelik levhalarla takviyesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 9-21 (1977).
4. Jones, R., Swamy, R.N., Charif, A., “Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates,” **Structural Engineer**, 66: 85-94 (1988).
5. 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).
6. 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).
7. Ziraba, Y.N., Baluch, M.H., Basunbul, I.A., Sharif, A.M., Azad, A.K., Al-Sulaimani, G.J., “Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates”, **ACI Structural Journal**, 91: 639-646 (1994).
8. Salam, H.M., Saba, A.M., Shahin, H.H., Abdel-Raouf, H., “Prevention of Peeling Failure in Plated Beams”, **Journal of Advanced Concrete Technology**, 2(3), 419-429 (2004).
9. Arslan G., Sevik F., Ekiz I., “Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams”, **Construction and Building Materials**, 22: 143-153 (2008).
10. 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**, A(34): 887-897 (2003).
11. 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).

12. 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).
13. 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)
14. 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).
15. 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).
16. Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J., Park, S.M., “Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams”, *Composites*, A(32): 1319-1328 (2001).
17. 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).
18. 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)
19. Altın, S., Tankut, T., Demirel, Y., “Betonarme Kirişlerin Kesme İçin Onarım/Güçlendirilmesi”, *Tübitak Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Projesi(İntag 536)*, Ankara , (1996)
20. Raoof, M., El-Rimawi, J. A., Hassanen M.A.H., ”Theoretical and experimental study on externally plated R. C. Beams”, *Engineering Structures*, 22, 85-101 (2000).
21. Ünsal, T.Ç., “Güçlendirilmiş betonarme kirislerin davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-28 (1989).
22. Çelikel, T.F., “Güçlendirilmiş betonarme kirislerin yinelenir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 19-24 (1991).
23. Özdemir, İ., “Onarılmış betonarme kirislerin tersinir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-27 (1994).

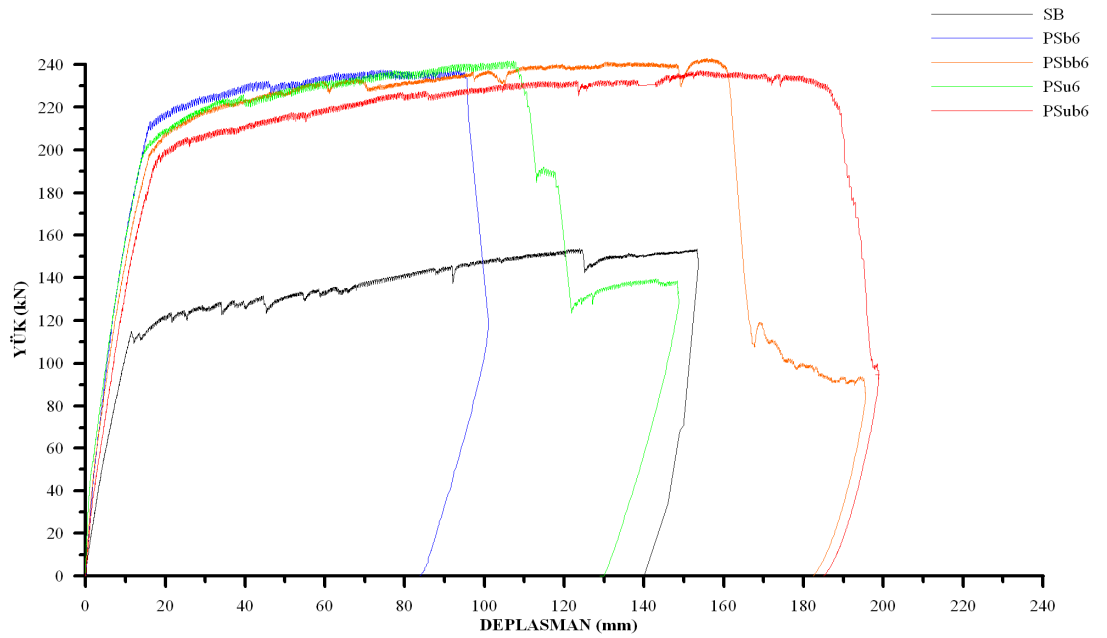
24. Aykaç, S., “Onarılmıs/Güçlendirilmiş betonarme kirislerin deprem davranışı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-54 (2001).
25. Altun, F., “An experimental study of the jacketed reinforced concrete beams under bending”, **Construction and Building Materials**, 18, 611-618 (2004).
26. 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).
27. 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).
28. Quantrill, R.J., Hollaway, L.C., Thorne, A.M., **Magazine of Concrete Research**, 48: 331-341 (1996).
29. 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).
30. Göğüş, M. H., “Açıklık Ortasına Kolon Ekleme Yöntemiyle Betonarme Kirişlerin Onarım ve Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 26-65 (2000).
31. Çelebi, M., Pezein, J., “Hysteric Behaviour of Epoxy Repaired Reinforced Concrete Beams”, **Earthquake Engineering Resarch Center Universty of California, Berkeley**, California, USA, EERC(73): 5-6 (1973).
32. Hewlett, P.C., Morgan, J.G.D., “Satatik and Cyclic Response of Reinforced Concrete Beams Repaired By Epoxy Resin Injection”, **Magazin Of Concrete Research**, 34(118): 5-17, (1982).

EKLER

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

Çizelge 1.1. Uysal'ın deney elemanlarının süneklik oranları

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

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

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

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

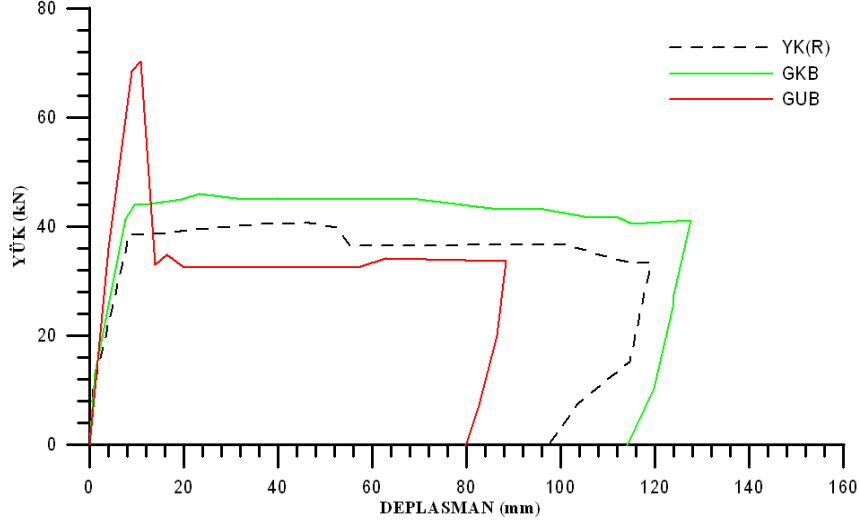
Çizelge 1.3. Uysal'ın deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

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

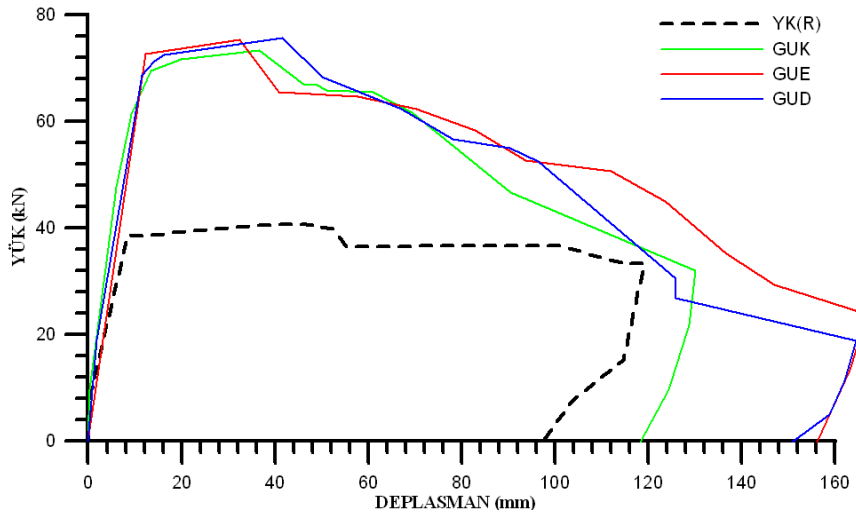
Çizelge 1.4. Uysal'ın deney elemanlarına ait eğilme rijitliği oranları

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

EK-2 Arslan, M.'nin [2] çalışmasına ait grafikler

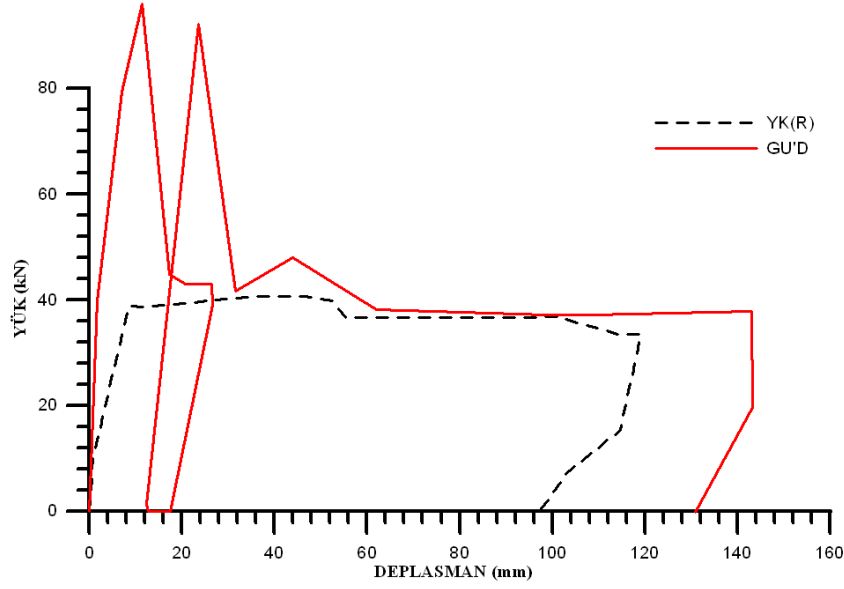


Şekil 1.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri
(levha başı tutulmamış güçlendirilmiş kirişler)



Şekil 1.2. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri
(levha başı tutulmuş güçlendirilmiş kirişler)

EK-2 (Devam) Arslan, M.'nin [2] çalışmasına ait grafikler



Şekil 1.3. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri
(levha başı tutulmuş kalın levha ile güçlendirilmiş kirişler)

Deney elemanlarının isimleri ve özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir;

YK(R) : Yalın kiriş (referans kirişi)

GKB : Levha kısa ve ince, yüksüz, başlıksız

GUB : Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıksız (güçlendirilmiş)

GUK : Levha uzun ve ince, yüksüz, kaynaklı (güçlendirilmiş)

GUE : Levha uzun ve ince, yüksüz, eğik başlıklı (güçlendirilmiş)

GUD : Levha uzun ve ince, yüksüz, dik başlıklı (güçlendirilmiş)

GU'D : Levha uzun ve kalın, yüksüz, başlıklı (güçlendirilmiş)

EK-3 Kayar, S.'nin çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

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

<i>Deney Elemanı</i>	<i>Süneklik Oranı ($\delta u / \delta y$)</i>	<i>Göreceli Süneklik</i>
<i>SB</i>	<i>16,8</i>	<i>1,00</i>
<i>Sbb1,5</i>	<i>13,5</i>	<i>0,80</i>
<i>Sbb3</i>	<i>11,6</i>	<i>0,69</i>
<i>Su6</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>Rub6</i>	<i>6,5</i>	<i>0,39</i>
<i>PRb6</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>PRub6</i>	<i>5,9</i>	<i>0,35</i>

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

<i>Deney Elemanı</i>	<i>Akma Yüğü P_y (kN)</i>	<i>Kopma Yüğü P_u (kN)</i>
<i>SB</i>	<i>115</i>	<i>152</i>
<i>Sbb1,5</i>	<i>140</i>	<i>170</i>
<i>Sbb3</i>	<i>200</i>	<i>225</i>
<i>Su6</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>Rub6</i>	<i>200</i>	<i>275</i>
<i>PRb6</i>	<i>---</i>	<i>---</i>
<i>PRub6</i>	<i>200</i>	<i>210</i>

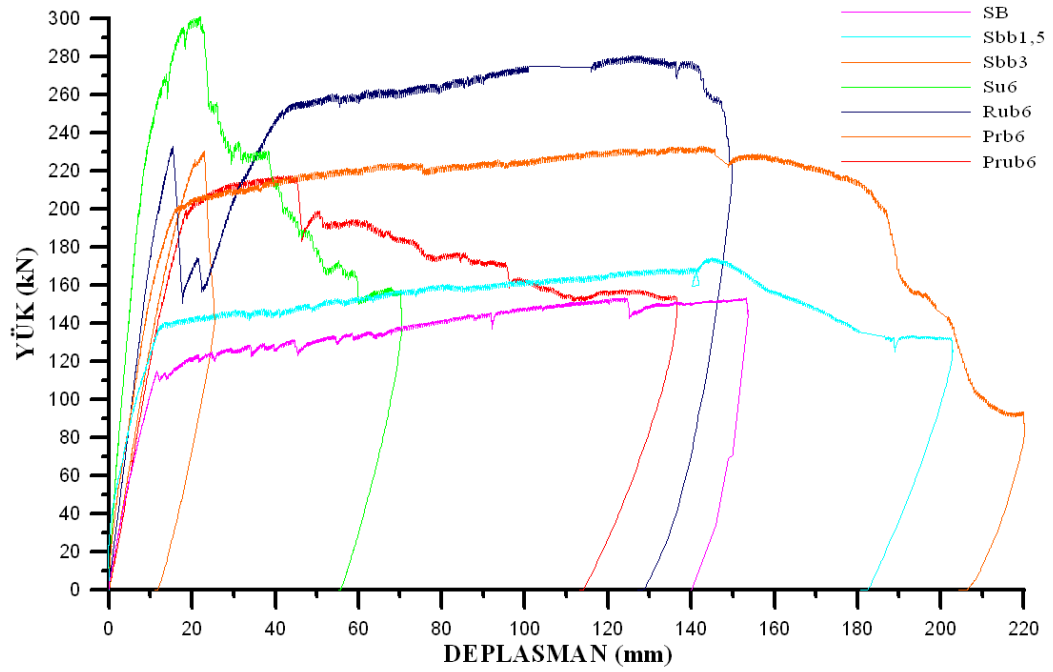
Çizelge 1.3. Kayar, S'nin deney elemanlarına ait toplam enerji tüketme kapasiteleri

<i>Deney Elemanı</i>	<i>Toplam Enerji (Joule)</i>	<i>Toplam Enerji Oranı</i>
<i>SB</i>	<i>20994</i>	<i>1,00</i>
<i>Sbb1,5</i>	<i>28248</i>	<i>1,35</i>
<i>Sbb3</i>	<i>44832</i>	<i>2,14</i>
<i>Su6</i>	<i>15097</i>	<i>0,72</i>
<i>Rub6</i>	<i>36961</i>	<i>1,76</i>
<i>PRb6</i>	<i>3796</i>	<i>0,18</i>
<i>PRub6</i>	<i>23395</i>	<i>1,11</i>

EK-3 (Devam) Kayar, S.'nin çalışmasına ait grafik ve çizelgeler

Çizelge 1.4. Kayar, S.'nin 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
Su6	37,30	4,22
Rub6	18,40	2,08
PRb6	13,17	1,49
PRub6	12,00	1,36



Şekil 1.1. Kayar, S.'nin tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAHAN, Servet
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.11.1982, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (536) 491 71 39
e-mail : servetkarahan@gmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Yılı

Lisans	Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	Ankara Dikmen Lisesi	2000

Yabancı Dil

İngilizce

İlgi Alanları

Betonarme yapılar, Çelik Yapı Tasarımı, Mevcut Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi