

**BETONARME KİRİŞLERİN
EPOKSİYLE YAPIŞTIRILAN
DELİKLİ ÇELİK LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMESİ**

Ali UYSAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2006
ANKARA**

Ali UYSAL tarafından hazırlanan BETONARME KİRİŞLERİN EPOKSİYLE YAPIŞTIRILAN DELİKLİ ÇELİK LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Sabahattin AYKAÇ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliğiyle / oy çokluğuyla İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hüsnü CAN

Üye : Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Orhan DOĞAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

Üye : Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

Tarih : 26/12/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Ali UYSAL

**BETONARME KİRİŞLERİN EPOKSIYLA YAPIŞTIRILAN
DELİKLİ ÇELİK LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ali UYSAL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2006

ÖZET

Betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesinde sıkça kullanılan tekniklerden biri de çelik levha kullanımıdır. Bu yöntemde kiriş alt yüzüne çelik bir levha yapıştırılır ve bazı durumlarda levha uçlarının sıyrılmaması için ek önlemler alınır. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmalarda, bu yöntem ile güçlendirmede, önemli süneklik sorunları olabileceği görülmüştür. Bu çalışmada, çelik levha ile güçlendirilmiş kirişlere dayanımın yanı sıra yeterli süneklik de kazandırılması için delikli saç levha kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada birisi referans, sekizi güçlendirilmiş olmak üzere dokuz deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Çalışmada, delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arası yük aktarımı üzerindeki etkisi, çelik levha alanı ve yapıştırma yöntemi parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiş ve delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin iyi bir davranış sergilediği görülmüştür.

Bilim Kodu : 911.1145
Anahtar Kelimeler : Kiriş onarımı, kiriş güçlendirmesi, epoksiyle onarım, levha yapıştırma, delikli saç levha
Sayfa Adedi : 77
Tez Yöneticisi : Dr. Sabahattin AYKAÇ

**STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS BY EPOXY GLUED STEEL PLATES**

(M. Sc. Thesis)

Ali UYSAL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE**

December 2006

ABSTRACT

The use of steel plates is one of the most popular techniques of strengthening reinforced concrete beams under flexure strength. In this method, steel plates are bonded to the bottom of the beam. It was observed that strengthening concrete beams by using steel plates has important ductility problems. The purpose of this study is to increase ductility of the reinforced beams that strengthened with steel plates. In order to achieve this purpose, perforated steel plates are used in the experimental study. Totally nine reinforced concrete beams, one of which is the simple reinforced beam-the others are strengthened with perforated steel plates with different combinations, were tested under monotonic loads. In this study, effects of using perforated steel plates on ductility, transfers of forces between surfaces, steel cross-section area and bonding method are investigated.

Results of the experiments are analyzed according to strengthening, ductility, energy consumption and rigidity. With the results of this study it is observed that strengthening reinforced concrete beams with perforated steel plates shows a good behavior.

Science Code : 911.1145
Keywords : Beam repair, beam reinforcement, epoxy repair, perforated steel plate
Number of pages : 77
Thesis supervisor : Dr. Sabahattin AYKAÇ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, bu araştırmayı planlayıp yöneten, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, deneysel çalışmalarımıla bizzat kendisi ilgilenen ve takip eden danışmanım, değerli hocam Dr. Sabahattin AYKAÇ'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen Araş. Gör. Şule BAKIRCI ER'e, İnş. Yük. Müh. İsmet ÇALIK'a ve laboratuvar çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

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

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	3
3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR	5
3.1. Karbon Lifli Kumaşlar Yapıştırılarak Yapılan Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi	5
3.2. Çelik Levha Yapıştırılması ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirmesi	7
3.3. Betonarme ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirmesi	17
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
4.1. Deney Programı	23
4.2. Deney Elemanları	36
4.3. Malzeme Özellik ve Dayanımları	37
4.4. Yapıştırma Tekniği	38
4.5. Deney Düzeni	39
4.5.1. Deney çerçevesi	39
4.5.2. Yükleme düzeni	39

	Sayfa
4.5.3. Ölçüm düzeni	41
4.6. Deneyler	44
4.6.1. SB; Yalın giriş	44
4.6.2. PSb3; Güçlendirilmiş giriş	45
4.6.3. PSb6; Güçlendirilmiş giriş	47
4.6.4. PSbb3; Güçlendirilmiş giriş	49
4.6.5. PSbb6; Güçlendirilmiş giriş	51
4.6.6. PSu3; Güçlendirilmiş giriş	52
4.6.7. PSu6; Güçlendirilmiş giriş	53
4.6.8. PSub3; Güçlendirilmiş giriş	55
4.6.9. PSub6; Güçlendirilmiş giriş	57
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	59
5.1. Genel	59
5.2. Taşıma Gücü	59
5.3. Süneklik	62
5.4. Enerji Tüketimi	65
5.5. Eğilme Rijitliği.....	68
5.6. Arslan'ın Çalışması ile Karşılaştırma	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri	24
Çizelge 4.2. Yapıştırıcı (epoksi) özellikleri	38
Çizelge 5.1. Deneyden ve hesaptan elde edilen taşıma güçleri ve oranları ..	61
Çizelge 5.2. Süneklik oranları	63
Çizelge 5.3. Çelik levhalarda oluşan deplasman miktarları	64
Çizelge 5.4. Enerji tüketimi oranları	66
Çizelge 5.5. Rijitlik oranları	69
Çizelge 5.6. Arslan'ın çalışmasındaki rijitlik oranları	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri	9
Şekil 4.1. Delikli çelik levha kesit ve görünüşü	24
Şekil 4.2. Yalın kiriş deney düzeneği	27
Şekil 4.3. PSb3 kirişi deney düzeneği	28
Şekil 4.4. PSb6 kirişi deney düzeneği	29
Şekil 4.5. PSbb3 kirişi deney düzeneği	30
Şekil 4.6. PSbb6 kirişi deney düzeneği	31
Şekil 4.7. PSu3 kirişi deney düzeneği	32
Şekil 4.8. PSu6 kiriş deney düzeneği	34
Şekil 4.9. PSub3 kirişi deney düzeneği	34
Şekil 4.10. PSub6 kirişi deney düzeneği	35
Şekil 4.11. Deney düzeneği	40
Şekil 4.12. Yükleme noktasının yerleri	41
Şekil 4.13. Ölçüm düzeneği	43
Şekil 4.14. SB elemanı yük deplasman ilişkisi	45
Şekil 4.15. PSb3 elemanı yük deplasman ilişkisi	46
Şekil 4.16. PSb6 elemanı yük deplasman ilişkisi	49
Şekil 4.17. PSbb3 elemanı yük deplasman ilişkisi	50
Şekil 4.18. PSbb6 elemanı yük deplasman ilişkisi	52
Şekil 4.19. PSu3 elemanı yük deplasman ilişkisi	53
Şekil 4.20. PSu6 elemanı yük deplasman ilişkisi	55
Şekil 4.21. PSub3 elemanı yük deplasman ilişkisi	56

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. PSub6 elemanı yük deplasman ilişkisi	58
Şekil 5.1. 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği	60
Şekil 5.2. 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği	60
Şekil 5.3. Deney elemanlarının toplam enerji-deplasman grafiği	67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. SB deney elemanı	44
Resim 4.2. PSb3 elemanında görülen deformasyonlar	47
Resim 4.3. PSb6 deney elemanı	48
Resim 4.4. PSbb3 deney elemanı.....	50
Resim 4.5. PSbb3 elemanına tespit edilen sac levha	51
Resim 4.6. PSu6 deney elemanı.....	54
Resim 4.7. PSub3 deney elemanı	56
Resim 4.8. PSub6 deney elemanı	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

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

Kısaltmalar	Açıklama
FRP	Fiber takviyeli polimer
GFRP	Cam-fiber takviyeli polimer
BS	İngiliz Standardı
LVDT	Elektronik deplasman ölçerler

1. GİRİŞ

Mevcut betonarme yapılardaki kullanım amacı değişikliklerinden doğan ek yüklemeler ve kullanımdan önce tespit edilen zayıflık belirtileri nedenleriyle, betonarme kirişler güçlendirilmeye ihtiyaç duyarlar. Hasar mevcut değilken elemanın dayanımını artırma işlemi olarak tanımlanabilecek güçlendirme için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

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

Kirişlerin onarım/güçlendirilmesi için kullanılan diğer bir yaygın yöntem de kiriş yüzlerine karbon-lif kumaşlar yapıştırılarak yapılan iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemde de genellikle hedeflenen dayanımlara ulaşılmasına rağmen yeterli bir süneklik elde edilemediği ve elemanların gevrek bir şekilde kırıldığı görülmüştür. Bilindiği gibi karbon lifli kumaşlar oldukça pahalı olup, ülkemize yurt dışından ithal edilmektedir. Bu sakıncalarına rağmen ülkemizde özellikle son dönemlerde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Güçlendirme metodu olarak kullanılan yöntemlerden biri de kirişe çelik plakalar yapıştırılması yöntemidir. Bu yöntemde çelik plakalar kiriş yüzlerine epoksi bazlı yapıştırıcılar ile yapıştırılmaktadır. Levhaların sıyrılmasını önlemek için bazen bulon, kaynak gibi ek önlemlere de başvurulmaktadır. Yöntem, dayanım bakımından olumlu sonuçlar vermektedir. Karbon liflerle

yapılan güçlendirmelere göre daha sünek davranmasına rağmen bu yöntemlerde de yeterli bir süneklik elde edilememiştir [1]. Ancak, kullanılan malzemenin ucuz, yerli üretim ve kolay uygulanabilir olması bakımından tercih elden bir yöntemdir. Bu nedenle bu çalışmada, sıkça tercih edilen bu güçlendirme yönteminin daha sünek bir hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için kirişlerin güçlendirilmesinde düz çelik levhalar yerine delikli çelik levhaların kullanılmasının daha doğru bir seçim olacağı tahmin edilmektedir. Delikli çelik levhalardaki deliklerin ovalleşerek, düz saça göre daha fazla deformasyon yapabileceği dolayısıyla daha sünek davranabileceği düşünülmektedir. Ayrıca delikli saçlarda daha iyi bir yapışma sağlanacağı ve yapıştırma kalitesinin levha iç bölgelerinde de gözlenebilmesinin üretim kalitesini artıracığı da açıktır.

Çalışmada birisi referans, sekizi güçlendirilmiş olmak üzere dokuz deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Çalışmada, delikli çelik levha kullanımının, süneklik ve yüzeyler arası yük aktarımı üzerindeki etkisi, çelik levha enkesit alanı, kalınlığı ve yapıştırma yöntemi parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından irdelenmiştir. Karbon liflerle yapılan güçlendirme uygulamalarına göre daha sünek elemanlar oluşturan bu yöntem, kullanılan malzemenin ucuz, yerli üretim ve kolay uygulanabilir olması bakımından etkili bir yöntemdir. Karbon liflerle yapılan güçlendirmeye nazaran çelik levhalarla güçlendirmenin daha sünek davranış gösterdiği bilinmekle birlikte bu çalışmada çelik plakların karbon liflerle sistematik bir karşılaştırılması yapılmamıştır.

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Betonarme kirişler zaman zaman eğilme dayanımı açısından yetersiz hale gelmektedir. Bu durum yapının kullanım amacının değişmesinden ve üzerine daha fazla yük gelmesinden veya eleman üzerine yükler tam uygulanmadan proje veya uygulama hatalarının fark edilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Elemanı güçlendirmek için geçmişte; karbon liflerle, betonarme katman ekleme yöntemiyle ve çelik levha yapıştırma yöntemiyle güçlendirme deneyleri ve uygulamaları yapılmıştır. Katman ekleme yöntemi başarılı olmuştur ancak işçilik ve uygulama zorlukları vardır. Kirişin altından çalışmak gerekmektedir, yerinde kaynak ve betonu sıkıştırmak zordur. Eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dayanımını artırmaya yönelik bir güçlendirme tekniği olarak kullanılan yöntemlerden biri, son yıllarda uluslararası düzeyde birçok araştırmaya konu olan ve uygulamada da kullanılan eleman yüzeylerine epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemidir. Geçmişteki çalışmalarda bu yöntem ile onarılmış/güçlendirilmiş kirişlerin yeterli dayanıma ulaştığı, ancak kırılmaların genellikle gevrek biçimde olduğu ve yeterli bir süneklik gösteremediği görülmüştür [1]. Bu çalışmaya alternatif bir yöntem de karbon liflerle yapılan güçlendirmelerdir. Ancak karbon liflerdeki kırılmaların çelik levhadan daha da gevrek davrandığı yapılan çalışmalardan bilinmektedir. Karbon liflerdeki süneklik problemlerinden dolayı bu çalışma karbon liflere iyi bir alternatiftir. Karbon liflerle yapılan çalışmalarla bu çalışma arasında eleman ölçekleri uyumlu olmadığı için sistematik bir karşılaştırma yapılmamıştır. Çalışmanın esas hedefi çelik levha yapıştırılması ile yapılan güçlendirmenin daha sünek bir hale getirilmesidir. Bunun için düz levha yerine daha fazla deformasyona izin veren delikli çelik levhalar kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin etkinliğini araştırmak için Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvarında bir dizi deney yapılmıştır.

Çalışma kapsamında;

- a. Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arasındaki yük aktarımına etkisi,
- b. Çelik levha kesit alanı ve kalınlığı,
- c. Yapıştırma yöntemi (alt ve/veya yan yüzlerden),
- d. Yan yüzlere tespit edilen levhanın uzunluğu ve aralarında oluşturulan derz aralıklarının değişimi,
- e. Epoksi ile yapıştırılan levhaların alt ve/veya yan yüzlerden çelik bulonlarla desteklenmesi, parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Araştırmada sadece eğilme etkisi ele alınmış, kirişlerin yeterli bir kesme dayanımına sahip oldukları varsayılmıştır.

Çalışmada elde edilen deney elemanı davranışları daha önce yapılmış olan deliksiz çelik levhalarla güçlendirilmiş örneklerin davranışlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca levha kalınlıkları, levha biçimleri ve yapıştırma yöntemlerine göre deney sonuçları kendi aralarında da karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar araştırmacıların/uygulamacıların kullanımına sunulmuştur.

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

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

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

Bu konularda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

3.1. Karbon Lifli Kumaşlar Yapıştırılarak Yapılan Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi

Li, John ve Maricherla [2] 2006 yılı içerisinde yaptıkları çalışmada kirişlerde daha büyük ara yüz kesme kuvveti elde etmek için yeni bir hibrit sargılama yöntemi geliştirmişlerdir. Oluşturulan bu hibrit kompoze tüp, ortası beton, betonun etrafı ince bir fiber güçlendirilmiş polimer (FRP) tabaka ve etrafında hazırlanılan ve deney gruplarına göre çeşitlilik gösteren çelik levhadan oluşmaktadır.

Uzunluğu 559 mm, yüksekliği ve genişliği 101 mm olan değişken sayıda delikli çelik yüzlerden oluşan 15 adet kare kesitli kiriş numuneleri hazırlanmış delikli çelik levhaların, beton kirişlerin yapısal davranışını nasıl etkilediğini anlamak için 5 gruba ayrılmıştır. Yalnızca alt yüzü delikli, hem alt hem de üst yüzü delikli, hem alt hem de iki yan yüzü delikli, tüm yüzü delikli ve tüm yan yüzeyleri deliksiz bütün halinde çelik katmanlarla sarılmış olan bütün test gruplarının içleri betonla doldurulup “4 noktalı eğilme testi” uygulanmıştır [2].

Testler sonucunda aynı eksenli basınç kuvvetine maruz kaldığında delikli kesitli tüplerle kaplı beton numunelerin deliksiz olanlara oranla daha yüksek süneklığe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin delikli tüplerle sarılı kirişlerdeki basınç bölgelerinde betonun 3 boyutlu basınç gerilimi yaratması olduğu belirtilmiştir. Delikli sistemler, FRP tabakasının yük taşıma kapasitesinden tam olarak faydalanılırken deliksiz olan örneklerde bu gözlemlenmemiştir. Delikli sistem test örnekleri tipik bir sünek kırılma gösterirken, deliksiz test örnekleri aşırı kuvvetlendirilmesinden ve basınç alanına betonun tek boyutlu basınç gerilimi uygulamasından dolayı gevrek kırılma göstermiştir [2].

Wang [3], 2002 yılında T kesitli betonarme kirişlerin donatı azaltılması sonrası sismik performansı üzerine analitik ve deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, beton diyagonal çatlaklarının açısının tahmin edilmesi için geleneksel betonarme kesit analizi ve değişken açılı kafes kiriş modelini kullanan sismik değerlendirme modeli; boylamasına donatı azalması sonrası kirişlerin sismik performansını ölçmeye yarayan basit bir model olarak oluşturulmuştur. Değerlendirme modelinin tahmin edilmesi ve mevcut yapı çerçevelerinin buna nasıl karşılık verdiğinin incelenmesi için bir ön hazırlık test programı uygulanmıştır.

Analitik ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki; ACI 318–71 gibi eski kodlara göre tasarlanan donatıları kesilmiş betonarme kirişlerin zayıf yönleri bulunmaktadır ve bir şekilde iyileştirmeye gereksinim duyarlar. Fiber güçlendirilmiş plastik (Fiber Reinforced Plastic, FRP) plakalarının varlığı, bu dezavantajları başarılı bir şekilde düzeltmekte ve deprem esnasında maruz kalması beklenen performanstan daha yüksek değerler elde edilmektedir [3].

M.S.Muhammed Ali ve arkadaşları [4], betonarme kirişlerde kullanılan fiber takviyeli polimer (FRP) plakalar ile çelik plakaların karşılaştırılmasını yapmışlardır. Kiriş ve döşeme yüzeylerinin dayanımlarını ve rijitliklerini arttırmak için çelik plakalar bağlanmakta, ancak bu plakalar tasarım

kuvvetine ulaşmadan önce orijinal kirişten kopabilmektedir. Sıyırılma hareketinden dolayı ortaya çıkan aderans kuvvet azalması plakanın sonuna yakın bölgede gerilmelerin toplanmasından kaynaklanmaktadır.

Basit mesnetli kirişlerin mesnedinde ya da mütemadi kiriş momentinin sıfıra yaklaştığı noktalarda plakaların maruz kaldığı aderans kuvvet kaybını belirlemek için çekme ve basınç yüzlerine yapıştırılan plakalar, kenar plakaları, 'U' şeklinde plakalar ve açılı yapıştırılmış plakalar kullanılmıştır. Bu çelik plakaları kullanarak yapılan testler kesme kuvveti sıyırılmasının kritik diyagonal çatlak oluşturduğunda meydana geldiğini ve bu kritik diyagonal çatlağın etriye miktarından bağımsız oluştuğunu göstermiştir. Alt sınır yaklaşımı için etriyesiz betonarme kirişlerin kesme kuvveti; kesme kuvveti olarak kabul edilmiştir. Kirişlerin çekme yüzlerine ya da kenarlarına bağlanan farklı plaka elemanları üzerinde yapılan testler, çelik plakalı kirişler ve FRP plakalı kirişler için eğilme sıyırılma mekanizmasının aynı olduğunu göstermiştir. Çelik plakalı kirişlerin sıyırılma direncinden FRP plakaların eğilme sıyırılma direncinin hesaplanması için kesin olmayan bir bağlantı kurulmuştur [4].

3.2. Çelik Levha Yapıştırılması ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirilmesi

Mehmet Arslan [1], eğilme altındaki betonarme kirişlerin taşıma güçlerinin, epoksi ile çelik levha yapıştırarak onarım ve güçlendirilmesini amaçlayan deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dokuz tane orta ölçekli (150x250x2800 mm) betonarme kiriş monotonik yük altında denenmiştir. Bu kirişlerden altı tanesi epoksi ile yapıştırılmış çelik levhalarla güçlendirilmiş, iki tanesi hasara uğratıldıktan sonra aynı yöntemle onarılmış, dokuzuncusu ise yalın kiriş olarak denenmiş ve karşılaştırma elemanı olarak kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı; bu yöntemin katman ekleme yöntemine kıyasla etkinliğini, güçlendirmede kullanılan levha kalınlığı ve uzunluğunun davranış ve dayanımına olan etkilerini, levha uçlarının başta, kaynaklanmış ve uç

başlığı ile yerinde tutulmuş hallerinin durumunu, uygulama türünün (yüksüz güçlendirme, yüksüz onarım ve yük altında onarım) etkisini incelemektir.

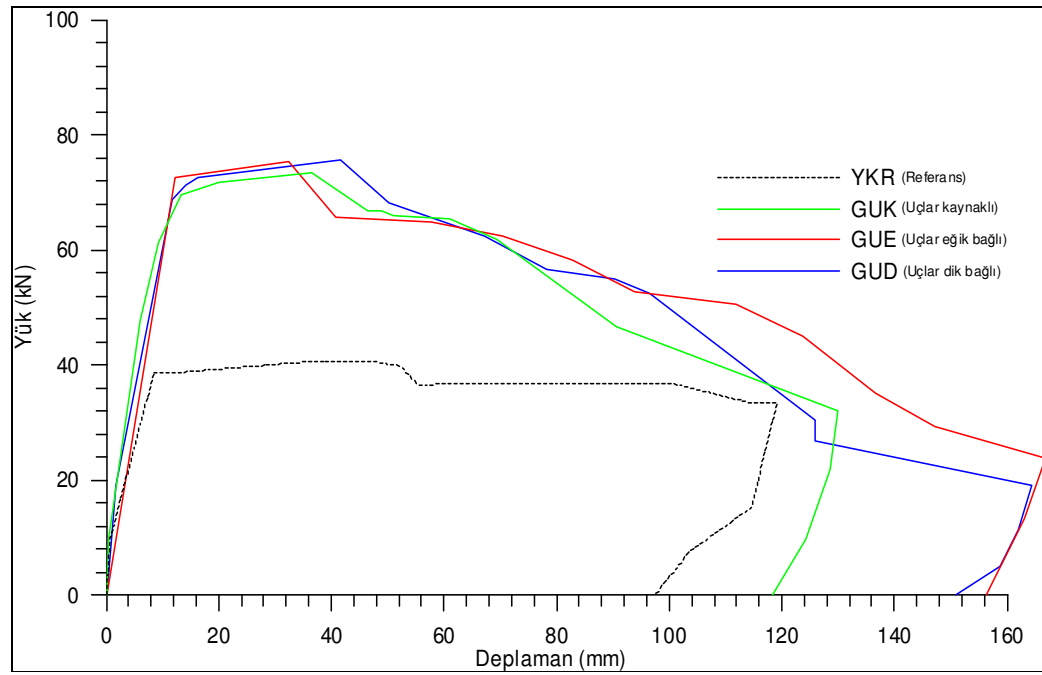
Çalışmada, simetrik yerleştirilmiş eşit iki tekil yük altında denenen kirişler 150x250 mm dikdörtgen kesitli olup, sonradan 2x150 mm kesitli ya da 4x150 mm kesitli çelik levhalarla güçlendirilmiş ve yüksüz olarak ya da yük altında onarılmıştır. Denenen dokuz kirişin tümünde 2 ϕ 14 ($A_s=308 \text{ mm}^2$)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

- a) Güçlendirme levhası uygulaması (yalın kirişe göre),
 - b) Güçlendirme levha uzunluğu (uzun ya da kısa levha ile güçlendirme),
 - c) Güçlendirme levhası ucunun durumu (boşta, kaynaklı, ya da dik ve eğik başlıklı),
 - d) Güçlendirme levhası kalınlığı (ince ya da kalın levha kullanılması),
 - e) Yüksüz onarım (kiriş yükleri askıya alınarak yapıştırma işleminin yapılması),
 - f) Yüklü onarım (kiriş, yük altında iken yapıştırma işleminin yapılması),
- değişkenlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş ve yalın kiriş (referans kirişi) ile ve de birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [1].

Çalışmada kullanılan elemanların isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Şekil 3.1.'de Bölüm 5.'te, yapılan çalışma ile karşılaştırılacak elemanların grafikleri sunulmuştur.

YK (R) : Yalın kiriş (referans kirişi)
 GKB : Levha kısa ve ince, yüksüz, başlıksız

GUB	: Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıksız (güçlendirilmiş)
GUK	: Levha uzun ve ince, yüksüz, kaynaklı (güçlendirilmiş)
GUE	: Levha uzun ve ince, yüksüz, eğik başlıklı (güçlendirilmiş)
GUD	: Levha uzun ve ince, yüksüz, dik başlıklı (güçlendirilmiş)
GU'D	: Levha uzun ve kalın, yüksüz, başlıklı (güçlendirilmiş)
OD	: Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıklı (onarılmış)
O'UD	: Levha uzun ve ince, yüklü, başlıklı (onarılmış)



Şekil 3.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri [1]

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemi ile betonarme kirişin onarım ve güçlendirilmesi başarıyla yapılabilmektedir.
- Kısa levha boyu ile yapılan güçlendirmelerin yetersiz; uzun levha boyu ile yapılan güçlendirmelerin nispeten başarılı ancak tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmiştir.
- Plaka uçlarının mutlaka tutturulması gerekmektedir.

d) Güçlendirme levhalarının iki ucu eski donatıya kaynaklandığında, ya da başlıklar yardımıyla tutturulduğunda güçlendirme de ve yüksüz onarımda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak yük altında yapılan onarımlar başarılı sonuçlar vermemiştir.

e) Yapılan işlemlerde işçilik büyük önem taşımaktadır. Kötü işçilikle yapılan işlemlerin gevrek kırılmalara yol açtığı belirlenmiştir.

f) Levha kalınlığının artırılmasının istenilen dayanımı sağlayabileceği düşünülmemelidir. Levhayı aşırı kalınlaştırma, dayanımı amaçlanan düzeyde arttırmamanın yanı sıra tehlikeli davranışa yol açmaktadır.

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

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

i) Çelik levhalar korozyona karşı çok iyi korunmalıdır. Ayrıca yangın durumunda, gerek levha çeliğinin erimesi gerek epoksinin özelliğini kaybetmesi bakımından önemli risk bulunmaktadır [1].

Cengiz Gülenler'in [5] çalışması, betonarme kirişlerin yapıştırılmış çelik levhalarla onarımını, bu şekilde elde edilen kompozit malzemelerin dayanım ve davranışlarını ve Türkiye'de var olan polimer yapıştırıcıların kullanılabilirliğini incelemek üzere yapılan deneysel bir çalışmadır.

200x300 mm kesitli 4 m uzunluğunda dört adet deney elemanı eşit mesafelerle iki tekil çatlak oluşana kadar yüklenmiştir. Daha sonra iki tanesi

farklı polimer yapıştırıcı kullanarak çelik levhalarla takviye edilmiştir. Deney elemanlarının bir tanesinde “özel plastik çelik, special no.1” adlı polimer yapıştırıcı, diğerinde ise CIBA-GEIGY firmasının ürünlerinden “Ep-No” adlı yapıştırıcı kullanılmıştır.

Çalışmada yapıştırıcıların nitelikleri de deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre çelik levhaların tamamen yapıştırılması yerine kısmen yapıştırılması yeterli olmuş, güçlendirilmiş kirişlerden “special no.1” ile yapıştırılan deney modeli çelik levhanın akması ile, “Ep-No” ile yapıştırılan deney modeli ise yapıştırıcı yetersizliği nedeniyle kırılmıştır. Yük altında deformasyon durumlarına göre “special no.1” sünek, “Ep-No” ise gevrek davranış göstermektedir. Bu tür yöntemle, onarılan çatlaklı kirişler eski rijitliğine getirilebilmektedir. Ayrıca, onarılan kirişin normal betonarme kiriş gibi davrandığı ve klasik hesaplarla boyutlandırma yapılabileceği görülmüştür [5,1]. Ancak bu çalışmada onarım levhasının kiriş mesnetlerinin içine kadar uzatılmış olması gerçek uygulamaya uygun değildir ve sonuçlar tartışmaya açıktır [1].

J.Alfaite ve J.Appleton [6], hasar görmüş betonarme kirişlerin epoksi ile çelik levha yapıştırılarak onarılmasının sonuçlarını araştırmışlardır. Çalışmada onarım öncesi kirişin hasar derecesi, dış donatı olan çelik levhanın sadece epoksi ile yapıştırılması veya çelik levhanın epoksi ile yapıştırılmasından sonra metal çubuklar ile kirişe tespit edilmesi ve çatlak onarımının genel davranışa etkileri parametreleri ele alınmıştır.

Onaltı adet deney modeli kullanılmış, deney modelleri, mesnetlere ve birbirlerine eşit mesafede iki eşit tekil yük uygulanarak denenmiştir [6,1].

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, onarılmış kirişin taşıma gücünün normal kirişin taşıma gücüne ulaşmış olduğu tespit edilmiştir. Çatlakların kontrol altında tutulması ve kirişin kullanılabilirliği açısından onarılan kirişin daha iyi bir davranış gösterdiği görülmüştür. Düşük

dayanıma sahip çelik levha kullanılması durumunda, çelik levha yapıştırılarak onarılan kirişin taşıma gücünün, normal kirişlerde kullanılan yöntemle hesaplanabileceği belirlenmiştir. Kiriş modellerinin ikisinde farklı kırılma mekanizması oluşmuş, çelik levha bu modellerde betondan sıyrılmıştır. Bundan dolayı epoksiyle yapıştırılan çelik levhanın uçlarından, metal çubuklar ile kirişe tespit edilmesi uygundur. Ancak bu durumda, kullanılacak metalin boyutları ve yerleşim düzeni problemi oluşmaktadır. Bu sorun çözülürse bu uygulama emniyetli bulunmaktadır [6,1].

R.A.Barnes ve G.C.Mays [7], çalışmalarında kesme kuvveti bakımından yetersiz olan betonarme kirişlerin, bağ yapılı çelik elemanların değişik şekillerde düzenlenmesiyle güçlendirilmesini incelemişlerdir. Buradaki amaç, bütün güçlendirilmiş test örnekleri için esnek kopma noktası elde etmektir. Test edilen kirişlerdeki sonuçlar, kontrol test örneğinkilerle karşılaştırılmıştır. Güçlendirme için kullanılan çelik plakların tiplerinin ve düzeninin, test örneklerinin davranışı, mukavemeti, rijitliği, sünekliği ve kopma noktası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre bütün test örneklerinde ilk çatlama, her zaman kirişteki maksimum eğilme momentinin olduğu bölgede esnek çatlak olarak meydana gelmekte ve bütün dıştan bağlı çelik eleman tipleri kirişin mukavemetini, rijitliğini ve sünekliğini arttırmaktadır. Esnek kopma noktasına kadar kuvvetlendirilen test örneklerinin, kontrol test örneğiyle aynı davranışı göstermekte olduğu belirlenmiştir. Çelik elemanın tipi ve kiriş üzerindeki düzeni süneklik davranışını yönlendiren ve kopma noktası modülünü belirleyen etkili parametrelerden biri olarak gözlemlenmiştir. Çelik şeritler arasındaki boşluk azaldıkça, yer değiştirme-süneklik oranı artmış, kesme açıklığı üzerindeki bağ alanındaki artışı, belirgin olarak kesme çatlaklarının çoğalmasını azaltmıştır. "L" tipi çelik şeritlerle güçlendirilen test örnekleri tüm örnekler arasında en düşük süneklik oranına sahip örnekler olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

M. Raoof ve arkadaşları [8], teorik parametrik çalışmalar kullanarak beton küpünün kuvveti, gömülü ana çelik çubukların boyutunun ve tasarım parametrelerinin nihai plaka ayrılma momenti büyüklüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dıştan çelik plakalarla güçlendirilmiş betonarme kiriş ve döşemeler BS 8110 İngiliz standardı nihai sınır durumlarını temel alan süneklik hesabı için tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; beklenmedik plaka ayrılması kopması, beton kaplama tabakasındaki eğilme çatlaklarının arasındaki boşluklarla kontrol edilebilmektedir. Pratikte nihai plaka ayrılma yükü için tek bir çözüm bulunmadığı ve alt-üst sınır yaklaşımları yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu duruma göre; yüksek beton sınıfından yapılmış kirişlerin, dıştan bağlanan plakalarla güçlendirmede daha uygun olduğu gözlemlenmiş, plaka genişliğinin kiriş genişliği ile aynı olması gereken durumlarda, kiriş genişliği arttıkça nihai plaka ayrılma momentinin de arttığı belirlenmiştir. Gömülü çekme donatısının alanının değiştirmeden, birkaç donatının birden fazla tabakada düzenlenmesi nihai plaka ayrılma momentini arttırmakta, kirişe oranla dış plakanın genişliğinin artırılması ya da plaka kalınlığının genişliğinin sabit tutularak artırılması nihai ayrılma momentini azaltmaktadır. Plaka alanının değişmediği durumlarda, kritik olan değişken ise plaka genişliğinin plaka kalınlığına oranı olmaktadır. Ayrıca elde edilen bulgular göstermiştir ki; önceden tahmin edilemeyen kırılmalı plaka ayrılması karşısında önlem alınmazsa nihai plaka ayrılma momenti plakalandırılmamış betonarme kirişin nihai kopma momentinden bile düşük olabilmektedir [8].

Charles K. Kankam [9], uç plakayla civatalanmış betonarme kirişlerin yapısal davranışını incelemiştir. Çalışmasında betonda basınç gerilmeleri oluşturacak uç civatalama ile düzenlenmiş betonarme kirişlerin yapısal potansiyelinin ölçümü hedeflenmiştir. Kirişlerin esneklik kuvveti, çatlak oluşumu, gelişimi ve sehim karakteristik özellikleri incelenmiştir.

Deney sisteminde betonun düşük çekme kapasitesinden dolayı oluşacak çatlakları önlemek ya da kontrol etmek ve çatlak genişliklerini azaltmak için,

ön yükleme yapılmış beton yapılarda gerilmiş çelik kablolar ya da tendonlar kullanılarak betonda iç basınç gerilmeleri oluşturulmuştur. Başlangıçtaki kesme gerilimi kritik orta açıklıktaki ve destek noktalarındaki çekme gerilmelerini önleyerek ya da azaltarak çatlak oluşumunu önlemekte ve bu sayede yapının eğilme, kesme ve bükülme kapasitelerini arttırmaktadır. Bu sayede kesitler, elastik olarak davranabilmekte ve betonun tüm kesiti boyunca basınçta tam kapasiteye ulaşılmaktadır. Bu da yapıların yükleme kapasitesinin artırılmasında daha küçük ve daha hafif elemanların kullanılmasını sağlayacak, daha yüksek çekmeye sahip çelik ve daha kuvvetli betona ulaşılmasını destekleyecektir [9].

Çalışmada 125x150 mm kesitinde ve 1800 mm uzunluğunda kirişler kullanılmıştır. Beton 28 gün sonunda yeterli kuvvete ulaştığında, kirişler düz yataklar üzerine yerleştirilmiştir. Kirişlerin orta açıklığında sabit bir momente neden olacak simetrik iki noktasal yük uygulanmıştır. Kirişlerden 4 tanesi 20 adet yükleme döngüsüne; 6 tanesi ise monoton yüklemeye maruz bırakılmıştır [9].

Bütün yükleme tiplerinde çatlaklar ve sehimler gözlenmiştir. Basınç gerilmelerine maruz bırakılmış betonarme kirişlerdeki esneklik kuvveti, sehim ve çatlak oluşum değerleri incelenmiş, ön yükleme yapılmamış benzer kiriş kesitlerine oranla, ön yükleme yapılmış kiriş kesitlerinin yük taşıma kapasitelerinde % 240'a varan artışların olduğu gözlemlenmiştir. Ön yüklemenin bir sonucu olarak, çatlama yükleri de aynı zamanda yaklaşık % 280 oranında artmıştır. Bu tekniğin yapısal elemanların yeniden düzenlenmesi ve kısa açıklıklı prefabrik yapı elemanlarında da uygulanabilir bir teknik olduğu belirtilmiştir [9].

Sinan Altın ve arkadaşları [10], çelik plakaların dış bağlarını kullanarak mevcut betonarme kirişlerin kesme kuvveti kapasitesinin güçlendirilmesi konusunu araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada 11 adet betonarme T kesitli kiriş, tek düze yükleme altında test edilmiştir. Epoksi kullanılarak 3 ana

tip çelik eleman değişik düzenlerde kiriş gövdelerine kesme açıklığı boyunca yapıştırılmıştır. Kesme kuvveti bakımından yetersiz olan betonarme kirişler bağ yapılı çelik elemanların değişik şekillerde düzenlenmesiyle güçlendirilmiştir. Buradaki amaç, bütün güçlendirilmiş test örnekleri için esnek kopma noktası elde etmektir. Test edilen kirişlerdeki sonuçlar, kontrol test örneğinkilerle karşılaştırılmış; güçlendirme için kullanılan çelik plakların tiplerinin ve düzenlerinin test örneklerinin davranışı, kuvveti, rijitliği, esnekliği ve kopma noktası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmanın sonucunda bütün test örneklerinde ilk çatlama her zaman kirişteki maksimum eğilme momentinin olduğu bölgede esnek çatlak olarak meydana gelmiş, bütün dıştan bağlı çelik eleman tipleri kiriş dayanımını, rijitliğini ve sünekliğini geliştirmekte olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlara göre esnek kopma noktasına kadar kuvvetlendirilen test örnekleri, kontrol test örneğiyle aynı davranışı göstermekte olup çelik elemanın tipi ve kiriş üzerindeki düzeni, sünek davranışını yönlendiren ve kopma noktası modülünü belirleyen etkili parametrelerden biri olmuştur. Çelik şeritler arasındaki boşluk azaldıkça, yer değiştirme-süneklik oranı artmış, kesme açıklığı üzerindeki bağ alanındaki artış, belirgin olarak kesme çatlaklarının çoğalmasını azaltmıştır. “L” tipi çelik şeritlerle güçlendirilen test örnekleri, tüm örnekler arasında en düşük süneklik oranına sahip örnekler olmuşlardır [10].

Çelik plakalarla güçlendirilen test örneklerinin kuvvet ve sünekliği, test kontrol elemanınkine yakın sonuçlar vermiştir. Çelik plakalar, kesme çatlaklarının çoğalmasını önlemiştir. Kesme açıklığı boyunca bir tane büyük çelik plaka kullanılması yerine, çelik plakaları parçalara ayırarak onları birbirine bitişik şekilde kirişin kesme açıklığına bağlamanın daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Çelik elemanın tipine ve kiriş boyunca olan düzenine göre, test örneklerinin kopma noktaları ve esneklikleri farklılık göstermektedir. Kesme açıklığı boyunca kuvvetlendirilmiş kirişler, esnek davranış göstermektedir [10].

B.B.Adhikary ve arkadaşları [11], kiriş gövdesine bağlanan çelik plakalar kullanılarak betonarme kirişlerin kesme kuvveti bakımından güçlendirilmesini deneyler ve analizlerle araştırmışlardır.

Yapılan deneylerde, iki adet test örneği plakalandırılmazken; on adet deney numunesi değişik derinlik ve kalınlıkta ince plakların epoksi ile gövdelerine bağlanması yöntemiyle güçlendirilmiştir. Bu numunelerden elde edilen deney sonuçları, plakalandırılmamış test örneklerinin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna ilave olarak bu kirişlerin davranışını incelemek için lineer olmayan bir sonlu eleman analizi yapılmıştır [11].

Yapılan deneyler ve nümerik analiz sonucunda, dıştan bağlanan sürekli çelik plakaların, betonarme kirişlerin nihai kesme kuvvetini arttırabildikleri; diğer plakalandırılmamış kirişlerle kıyaslandığında bu kirişlerin esneklik kuvveti ve rijitliğinde de artış olduğu belirlenmiştir. Kiriş boyunca çelik plaka kalınlığı ve derinliği arttıkça, çelik plaka monte edilmiş kirişin nihai kesme kuvveti de artmaktadır. Kalınlığı 4,5 mm, derinliği 100 mm olan plakanın monte edilmiş olduğu kirişte, kesme kuvveti artışının % 84 olduğu gözlemlenmiştir. Kirişlerin sünekliğini iyileştirmek ve mümkün olan maksimum kesme katkısını sağlamak için, plakaların mümkün olan maksimum derinliğe monte edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Plakalandırılmış kirişlerin kompleks kesme davranışlarının başarılı bir şekilde irdelenmesi “sonlu eleman analizi” gibi nümerik metotlarla da yapılabilmektedir [11].

Kenarları FRP ve çelik plakalarla bağlı betonarme kirişler üzerinde yapılan testler, kesme kuvveti sıyrılma mekanizmasının nitelik bakımından her iki tip plaka için de aynı olduğunu göstermiştir. Ancak, aynı kenar alanına sahip kenar plakaları için, plaka malzemesinin boyuna elastik modülü azaldığında kesme sıyrılma kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir [11].

R.K.L. Su ve Y. Zhu [12], betonarme bağ kirişlerinin güçlendirilmesi ile ilgili yeni bir metodun geliştirilmesi amacıyla üç adet birebir ölçekli betonarme bağ

kirişleri üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Bu kirişlerden iki tanesi kenar yüzlerinden dıştan elik plakalarla güçlendirilirken, bir tanesi test kontrolü amaçlı güçlendirilmemiştir.

Deneysel sonuçlardan; dış plakalarla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerin mukavemetinde, deformasyonunda ve enerji sönümlemede artış gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş bağ kirişlerinin modellenmesinde lineer olmayan sonlu eleman analizi kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan betonun ve elik çubukların malzeme özellikleri laboratuvar testlerinden elde edilmiştir. Deneysel alışmalar; cıvatalı bağlantı ve beton duvarı arasında ufak bir kayma olduğunu göstermiş ve cıvatalı bağlantıların yk-kayma davranışını anlamak için lineer model kullanılmıştır. Plakalarla güçlendirilmiş bağ kirişlerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile modelde düzenlemeler yapılmıştır. Bu sayısal parametrik çalışma göstermiştir ki; cıvatalı bağlantı ile beton duvarı arasında ufak bir kayma ($>3\text{mm}$), cıvatalı bağlantıların yük taşıma kapasitesini belirgin lde değiştirebildiği gibi, güçlendirilmiş bağ kirişlerinin yapısal performansını da etkilemektedir. Geliştirilen bu sayısal model, başka konfigürasyonlara, başka güçlendirme detaylarına sahip kirişlerin araştırılması ve incelenmesi bakımından da uygun olabilecektir [12].

3.3. Betonarme ile Kiriş Onarımı ve Güçlendirmesi

Betonarme kirişlerin eğilme taşıma güçlerinin arttırılması için Tefvik etin nsal [13] tarafından yapılan çalışmada, mevcut kirişin yeni boyuna donatı içeren beton katmanı ile güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneyler yardımıyla güçlendirme ile amaçlanan taşıma gücüne ne kadar yaklaşılacağı, güçlendirmede kullanılan ek etriyelerin güçlendirmeye etkisinin ne olacağı, ek çekme donatıları ile kirişte bulunan çekme donatılarının birbirlerine Z şeklindeki bağ demirleri ile kaynaklanmalarının güçlendirmeye etkisinin ne olacağı ve ek çekme donatılarının kolon-kiriş birleşimlerinde ne kadar uzatılması gerektiği araştırılmıştır.

Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin monotonik yük altında davranış ve dayanımını araştırmak üzere yedi adet orta ölçekli deney elemanı kullanmıştır. 2 ϕ 14 çekme, 2 ϕ 10 basınç ve ϕ 6/125 mm etriye ile donatılmış olan 3 m uzunluğunda 150x250 mm dikdörtgen kesitli yalın kirişler üretildikten sonra, çekme yüzündeki pas payı kırılarak bu bölgeye içinde 2 ϕ 14 donatı bulunan 50 mm kalınlığında yeni bir beton katmanı dökülmüştür. Yeni çekme donatısı ile eski çekme donatısı arasındaki bağ U şeklindeki yarım etriyeler ve/veya Z şeklindeki bağ demirler ile sağlanmıştır [13,1].

Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan incelemeler neticesinde güçlendirilmiş kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin birdöküm kiriş kapasitesine çok yaklaştığı tespit edilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklerinde, güçlendirmede uygulanan yapım farklılıklarından kaynaklanan büyük bir fark görülmemiş olmasına rağmen, güçlendirilmiş kirişlerin birdöküm kirişler kadar rijit davranmadıkları sonuçlarına ulaşılmıştır. Güçlendirmede uygulanan yapım farklılıklarının (etrijeli, Z-demirli, etriye ve Z-demirli) davranışı fazla etkilemediği görülmüş; güçlendirilmiş kirişlerin birbirlerine yakın bir sünek davranış göstermiş olmasına rağmen birdöküm kiriş kadar sünek davranamamış olduğu belirlenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri de birdöküm kirişin enerji tüketme kapasitesinden daha az olmuştur. Mesnette kenetlenmiş ve mesnette kenetlenmemiş deney elemanları davranış bakımından pek farklılık göstermemişlerdir. Eski beton ile güçlendirme betonunun birbirine kaynaşması tam olarak sağlanmış olup özellikle dikkat edilmesi gereken bir olay görülmemiştir [13,1].

Çelikel [14], Tefik Çetin Ünsal'ın yapmış olduğu deneysel çalışmanın devamı olarak, çalışmasında güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yinelenir yük altındaki davranış ve dayanımı araştırmıştır. Bu amaçla, boyut, donatı ve güçlendirme ilkeleri, Tefik Çetin Ünsal'ın denemiş olduğu kirişlerle tamamen aynı olan yedi adet orta ölçekli deney elemanı denenmiştir. Mevcut kiriş ile yeni oluşturulacak katmanı kaynaştırabilmek için U-biçimli yarım etriyeler

veya Z-demirleri kullanılmıştır. Kaynaştırma yöntemi, güçlendirme katman uzunluğu ve boyuna donatı ucunun kaynaklı ya da boşta olması değişkenlerinin denekler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde hasara uğramamış olduğu halde yetersizliği belirlenmiş betonarme kirişlere uygulanan güçlendirme yöntemi başarılı olmuştur. Güçlendirme sonunda amaçlanan taşıma gücünün % 95'ini aşabilen dayanımlar elde edilmiştir. Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında U-biçimli yarım etriyeler veya Z-demirlerinin kullanılması aynı derecede başarılı olmuş, yeterli aderans boyu sağlanmış ve yerel güçlendirme genel güçlendirme kadar başarılı olmuştur. Yerel güçlendirmede, yeni boyuna donatının eski boyuna donatıya kaynaklanmaması durumunda da yeterli dayanım elde edilmiş olmasına rağmen, yeni donatının eski donatıya kaynaklanması durumunda güçlendirilmiş kirişlerin süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [14,1].

İsmail Özdemir [15], katman ekleme yönteminin tersinir yükler altındaki başarısını incelemiştir. Deneysel çalışmada katman ekleme yönteminin tersinir yükler altında ne derece etkili olduğu, onarım ile amaçlanan taşıma gücüne ne kadar yaklaşılabileceği ve ek çekme donatıları ile kirişte bulunan çekme donatılarının birbirlerine Z demirleri ile kaynaklanmalarının onarıma etkisinin ne olacağının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla biri yalın, diğeri monolitik olmak üzere, konsol kiriş şeklindeki iki deney elemanı üzerinde toplam üç deney yapılmıştır.

Deney elemanlarının tümünde yeterli aderans boyu sağlanabilmesi ve elemanların deney duvarına tutturulabilmesi için konsol dibinde 150x500x1000 mm boyutlarında rijit bir beton blok oluşturulmuş ve boyuna donatılar bu bloğa ankre edilmiştir. Enkesit boyutları 150x250 mm ve uzunluğu 1,85 m olan yalın kiriş, üst yüzünde 2 ϕ 14, alt yüzünde 2 ϕ 10 ve

$\phi 8/125$ mm etriye ile donatılmış olarak üretildikten sonra hasara uğratılmıştır. Daha sonra onarım amacıyla, alt ve üst yüzündeki pas payı kırılarak üst yüze içinde $2\phi 14$, alt yüze ise içinde $2\phi 10$ donatı bulunan 50 mm kalınlığında yeni beton katmanları eklenmiştir. Yeni beton katmanları ile yalın kirişin arasında yük aktarımını sağlamak amacıyla yeni boyuna donatılar, mevcut boyuna donatılara $\phi 8/125$ mm'lik Z-demirleri ile kaynaklanarak bağlanmıştır. Çalışmada kenetleme yöntemi kullanılmadığından onarım katmanı donatılarının ankrajı yalın kirişin betonu dökümü sırasında yapılmıştır [15,1].

Yapılan çalışmalar neticesinde katman ekleme yöntemi ile onarım işleminin tersinir yükler altında da başarılı olduğu görülmüştür. İleri çevrimlerde monolitik kiriş taşıma gücüne ulaşıldığı, geri çevrimlerde aderans çözümlerine rağmen monolitik kiriş taşıma gücünün % 90'ına ulaşıldığı belirlenmiştir. Onarılmış kirişteki dayanım kaybı monolitiğe göre daha erken başlamıştır. Bir başka deyişle onarılmış kirişte yeterli, fakat monolitiğe oranla biraz daha düşük süneklik elde edilmiştir. Ek boyuna donatıların eski boyuna donatılara bağlanmasında Z-demirlerinin kullanılması, tersinir yükler altında da Tevfik Çetin Ünsal ve Tahsin Fırat Çelikel'in çalışmalarındakiler kadar başarılı olmuştur. Onarılmış kirişin enerji tüketme kapasitesinin monolitik kiriş enerji tüketme kapasitesi ile hemen hemen aynı olduğu ve yeterli olduğu gözlenmiş, birinci çevrim dışında, onarılmış kiriş rijitliği monolitik kiriş rijitliğine yakın gelişmiştir. Birinci çevrimde onarılmış kiriş rijitliğinin düşük çıkmasına yalın kirişteki ana çatlağın tam olarak beton ile doldurulamaması neden olmuştur [15,1].

Fatih Altun [16], basit eğilme altında betonarme kirişlerin mantolama öncesi ve sonrası mekanik davranışlarını belirlemek ve birbirleriyle karşılaştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır.

Test edilen bütün betonarme kirişler dikdörtgen kesitli ve beton sınıfı olarak ortalama C20'dir. Deney değişkenleri, mantolama kalınlığı, yatay donatı

miktarı ve enine donatı mesafesidir. Deneyler sırasında 9 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. 3 değişik tipte ve 3 değişik ebatta (150x150x2000 mm, 200x150x2000 mm, 200x200x2000 mm) betonarme kirişler, taşıma gücüne kadar basit eğilmeye maruz bırakılmıştır. Her bir kiriş, çekme donatısının plastik kopma noktasına ulaşınca kadar basit eğilme altında yüklenmiştir. 150x150 mm, 200x150 mm, 200x200 mm kesitindeki kirişlerin dış kısımları ile etriyelerin dışı arasında kalan bölge tıraşlanmış ve yaklaşık olarak 130x130 mm, 180x130 mm, 180x180 mm'lik kesitler elde edilmiştir. Bu test örnekleri tam plastik kopma noktasına kadar eğilme altında yüklenmiştir. Mantolama derinliği olarak 100 mm seçilmiştir. Yaklaşık 100 mm kalınlığında taze beton uygun kalıbın içine dökülmüştür. Beton dökülmeden önce Z demir çubuklar, eski ve yeni kirişlere kaynatılarak yatay ve boylamasına demir çubukların bazıları birleştirilmiştir. Kaynatılan Z çubuklar 8 mm çapında ve 400 mm aralıktadır. Mantolanmış bu betonarme kirişler basit eğilme altında tam kopma noktasına kadar yüklenmiş ve test edilmiştir. Basit eğilme altındaki mantolanmış kirişlerin sünekliği, rijitliği ve nihai esneklik kapasitesi deneysel olarak belirlenmiştir [16].

Yapılan testler göstermiştir ki; hasarlı kirişlerin yüzeylerindeki pürüzlülük 4~6 mm'dir. Gerçek uygulamalardaki miktarın da bu değerler arasında olduğuna inanılmaktadır. Mantolanmış betonarme kirişlerin tümü, başlangıçtan nihai kırılma noktasına ulaşınca dek aynı tip davranışları göstermiştir. Hasarlı kirişlerdeki boyuna donatılar ile mantolanmış kirişlerdeki donatıları kaynaklama yöntemiyle Z çubuklarla bağlamak, kirişlerin mekanik davranışlarına olumlu katkı sağlamaktadır [16].

Sabahattin Aykaç [17], 2000 yılında yaptığı çalışmada deprem yükleri haricindeki nedenlerle katman ekleme tekniği ile güçlendirilmiş/onarılmış betonarme kirişlerin depremi benzeştiren tersinir yinelenir yükler altındaki davranışını ve sonradan eklenen kiriş boyuna donatısı kenetleme yöntemlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Bu araştırmada hasar görmüş veya yetersizliği anlaşılmış kirişin bir ya da iki yüzüne içinde yeni boyuna donatı bulunan yeni bir betonarme katman eklenmiştir. Yeni katman ile mevcut kiriş arasındaki yük aktarımı ve sünekliği sağlamak amacıyla uygulama kolaylıklarından dolayı 'U' şeklindeki yarım etriyeler kullanılmıştır. Kesme açıklığı orta ($a/d \approx 5$) ve küçük ($a/d \approx 3$) olan kirişler ele alınmış ve kirişlere onarım güçlendirme veya diriltme işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan iyileştirme yöntemi bazı kirişlerde sadece üst yüze, bazı kirişlerde hem alt hem de üst yüze uygulanmıştır. Ayrıca yeni katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona mekanik veya epoksili olarak kenetlenmesi yöntemleri de araştırma kapsamında incelenmiştir [17].

Uygulanan yöntem onarım ve güçlendirme işlemlerinde oldukça başarılı olmuş, diriltme işlemlerinde ise sınırlı bir başarı elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında amaçlanan dayanımlara ulaşılmış ancak diriltme uygulanan elemanlarda tersinir yükler altındaki dayanım kaybı erkenden başlamıştır. Diriltilmiş elemanlar haricindeki elemanlarda yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır. Onarılmış elemanların enerji tüketme kapasiteleri monolitik eleman kapasitelerine çok yakın olmuştur. Diriltme uygulanmış elemanların enerji tüketme kapasitesi ise özellikle kesme açıklığı küçük olan kirişlerde monolitiğe göre belirgin olarak düşük olmuştur. Güçlendirilmiş elemanların enerji tüketme kapasiteleri ise, sürekli donatılı güçlendirme elemanının haricinde monolitik eleman kapasitesinden daha büyük olmuştur. Tüm elemanlarda monolitiğe göre daha az eğilme rijitlikleri elde edilmiştir. Yeni katman ile mevcut kiriş arasındaki sünekliği ve yük aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan 'U' şeklindeki yarım etriyeler oldukça başarılı olmuştur. Katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona 'L' profil ile mekanik olarak kenetlenmesi oldukça başarılı olmakla beraber, rijitlikte kabul edilebilir düzeyde de olsa (% 30'dan az) ani düşmelere neden olduğu görülmüştür. Katman içindeki boyuna donatının mevcut kolona epoksi kullanılarak kimyasal olarak ankrajı da oldukça başarılı olmuştur [17].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Programı

Deney kirişlerinin boyut ve sayıları, laboratuvar koşulları içerisinde gerçekleştirilebilecek ve olağan durumları yansıtabilecek şekilde seçilmiştir. Epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş deney elemanlarının davranış ve dayanımlarının belirlenmesi için biri referans kiriş (yalın kiriş) olmak üzere dokuz tane deney elemanı kullanılmıştır. Çizelge 4.1.'de topluca verilen modellerin tasarımında aşağıdaki değişkenlerin dayanım ve davranış üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

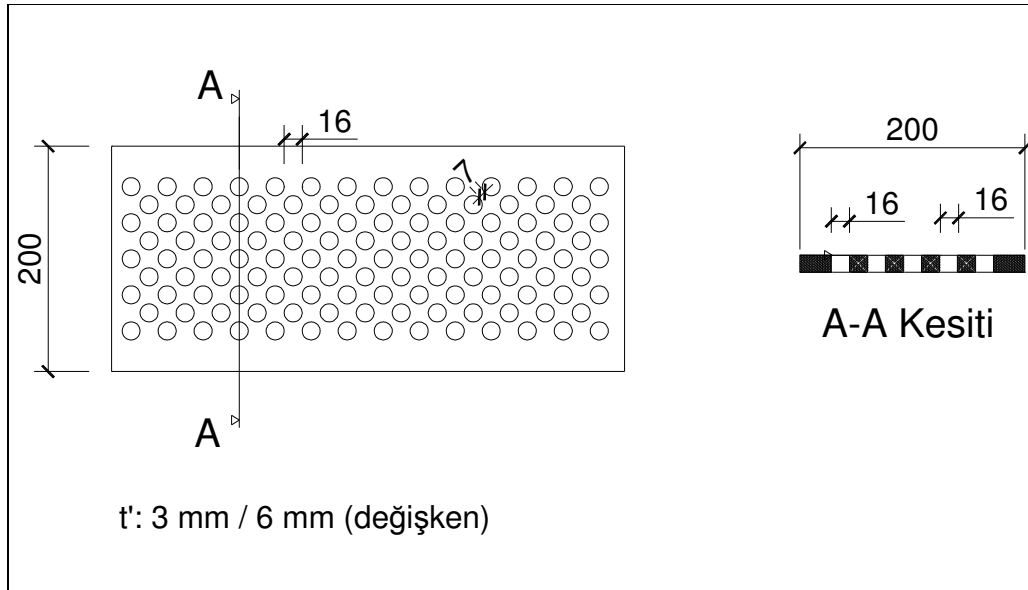
a. Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arasındaki yük aktarımına etkisi: Delikli levha kullanımının deformasyona, deliksiz orana daha fazla izin vereceği ve süneklik düzeyine olumlu katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Yapıştırma esnasında levhanın deliklerine dolan epoksinin daha iyi bir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

b. Çelik levha kalınlığı: Delikli levha enkesitindeki metalik alan ile yapışma yüzeyine iletilen kuvvetin doğru orantılı olacağı açıktır. Bu nedenle yapışma yüzeyinin değişik kuvvetler altında nasıl davranacağını belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla eleman altına yapıştırılan levha kalınlığı parametre olarak ele alınmıştır. Tüm elemanlarda kullanılan delik deseni ve boyutları aynı olup Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

c. Yapıştırma yöntemi (alt veya yan yüzlerden): Levhaların kiriş alt yüzüne veya alt ve yan yüzüne yapıştırılmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkilerini görebilmek için yapıştırma tekniği de bir parametre olarak ele alınmıştır.

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri

KIRIŞ ADI	İŞLEM TÜRÜ	LEVHA KALINLIĞI (mm)	EPOKSI İLE YAPIŞTIRILAN LEVHA YÜZEYİ	BULONLA BAĞLANTI
SB	Yalın	-----	-----	-----
PSb3	Güçlendirme	3	Alt	Yok
PSb6	Güçlendirme	6	Alt	Yok
PSbb3	Güçlendirme	3	Alt	Alt yüzde
PSbb6	Güçlendirme	6	Alt	Alt yüzde
PSu3	Güçlendirme	3	Alt ve yan	Yok
PSu6	Güçlendirme	6	Alt ve yan	Yok
PSub3	Güçlendirme	3	Alt ve yan	Yan yüzde
PSub6	Güçlendirme	6	Alt	Yan yüzde



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

d. Yan yüzlere tespit edilen levhanın uzunluğu ve aralarında oluşturulan derz aralıklarının değişimi: Bazı elemanlarda kiriş altındaki levhalar yan yüzlerden de kirişe yapıştırılmıştır. 'L' şeklinde bükülmüş olan bu levhaların yan yüzdeki yüksekliği 110 mm olup kiriş altına kıvrılan kısmı ise 30 mm'dir. Levha boyu uçlarda 500 mm, iç bölgelerde ise 600 mm'dir. Levhaların kiriş altına kıvrılan kısımları yapıştırma işleminden önce taban levhasına kaynaklanmıştır. Yan yüz levhalarının ilave çekme dayanımı oluşturmaması için kiriş altına kıvrılan 30 mm'lik kısımlar 100 mm'de bir kesilmiştir. Aynı amaçla yan yüzlerdeki levhalar boydan boya yapılmamış, boyuna yönde yaklaşık 600 mm'de (levha boyu) bir 10 mm'lik derzler oluşturulmuştur. Bazı elemanların sadece uçlarına 1 ya da 2 levha yapıştırılmıştır.

e. Epoksi ile yapıştırılan levhaların alt veya yan yüzlerden çelik bulonlarla desteklenmesi: Bazı deney elemanlarında kiriş alt yüzüne yapıştırılmış olan çelik levha alt ve yan yüzlerden bulonlu mekanik dübellere ile desteklenmiştir. Dübel çapı 16 mm olup, dübel içindeki bulon çapı 12 mm'dir. (Bulon kalitesi 8.8 olup, M12 şeklinde ifade edilmektedir)

Yukarıda belirtilen parametreler çalışmada ele alınmış ve sonuçlar bu bağlamda değerlendirilmiştir. Araştırmada sadece eğilme etkisi ele alınmış, kirişlerin yeterli bir kesme dayanımına sahip oldukları varsayılmıştır.

Elemanların isimlendirilmesinde kullanılan indisler aşağıda sunulmuştur.

P : Levhanın delikli (Perforated) olduğunu göstermektedir.

S : Levhanın çelik (Steel) olduğunu göstermektedir.

B : İsim içinde kullanılan birinci "b" harfi levhanın alt yüzden yapıştırıldığını göstermektedir.

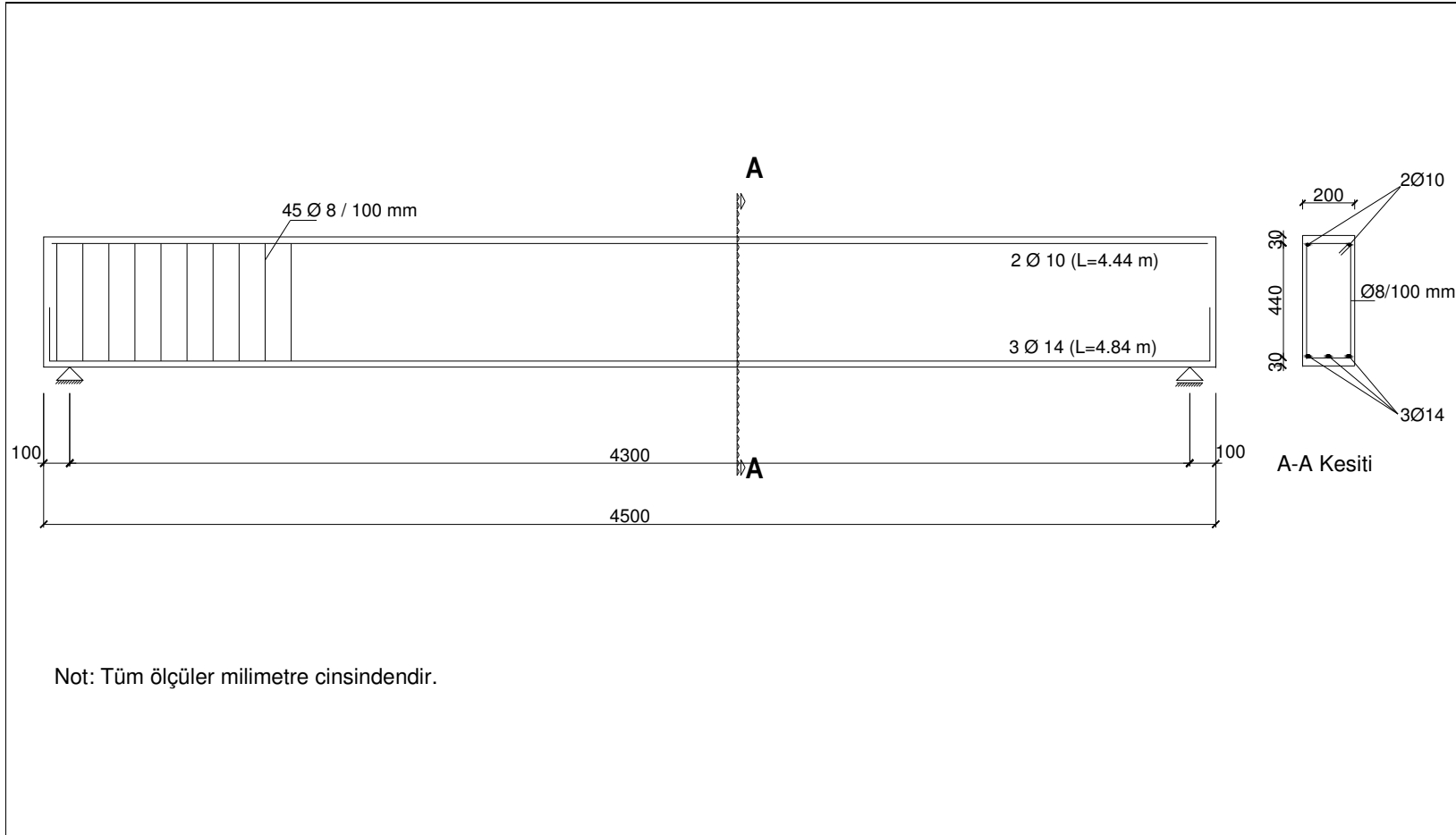
u : Levhanın alt ve yan yüzden yapıştırıldığını, yan yüzlerden ise yapıştırıldığını ya da bulon ile desteklendiğini göstermektedir.

b : İsim içinde kullanılan ikinci “b” harfi ise levhanın alt ya da yan yüzden bulonlu mekanik dübeller ile desteklendiğini göstermektedir.

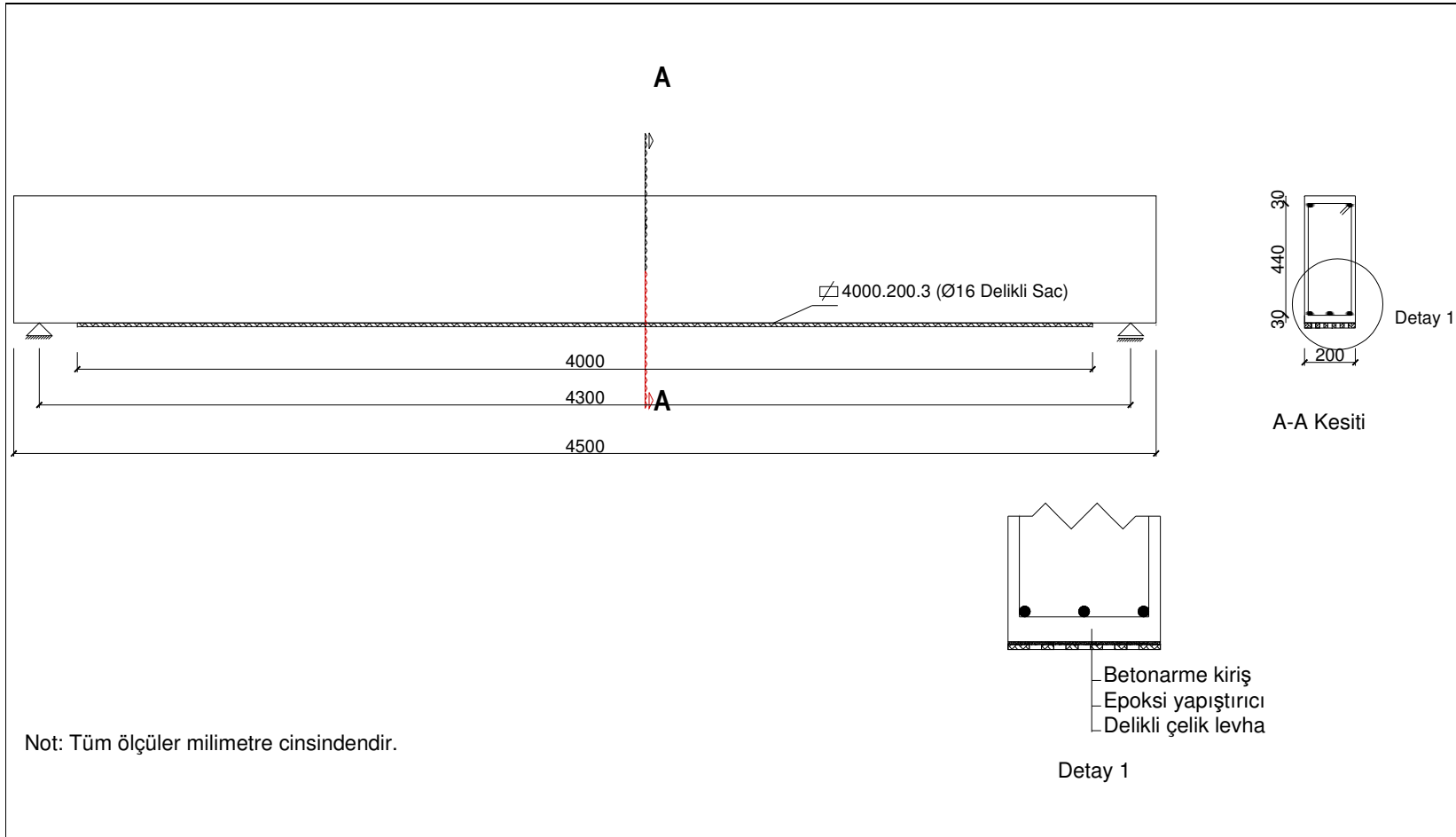
3–6 : Sondaki rakam ise levha kalınlığını mm olarak göstermektedir.

Deney elemanları;

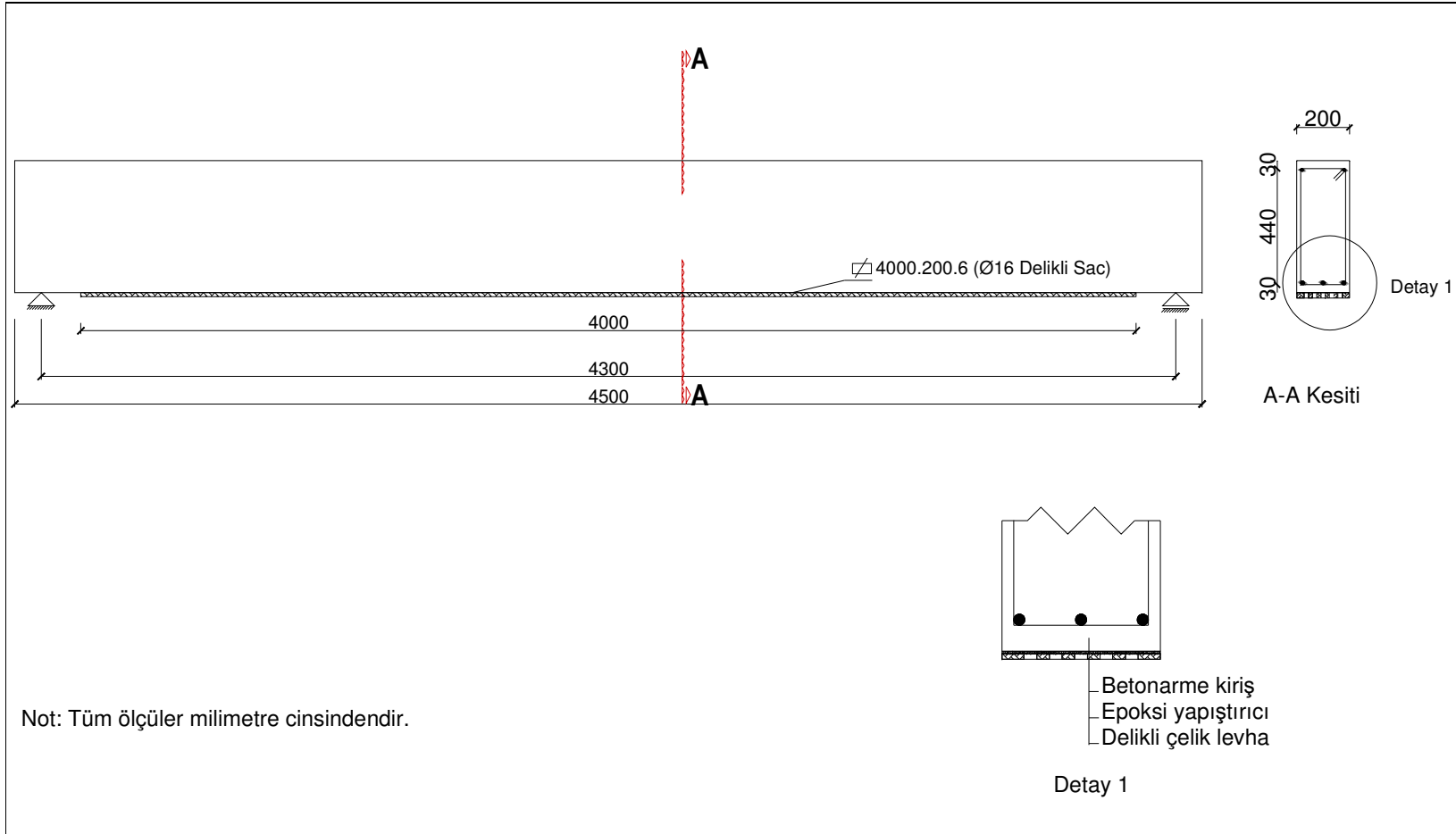
- a) SB ; Referans olarak kullanılacak kiriştir. (Yalın kiriş)
- b) PSb3 ; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=3 mm) (Perforated Steel Plate only at bottom face, plate thickness is 3 mm)
- c) PSb6 ; Sadece alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=6 mm) (Perforated Steel Plate only at bottom face, plate thickness is 6 mm)
- d) PSbb3 ; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş delikli çelik levha, (kalınlık= 3 mm), (Perforated Steel Plate only at bottom face, Supported with bolts, plate thickness is 3 mm)
- e) PSbb6 ; Alt yüzden hem epoksi ile yapıştırılmış hem de bulonlarla desteklenmiş delikli çelik levha, (kalınlık= 6 mm), (Perforated Steel Plate only at bottom face, Supported with bolts, plate thickness is 6 mm)
- f) PSu3 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha, (kalınlık=3 mm), (Perforated Steel Plate, U-Shaped, plate thickness is 3 mm)
- g) PSu6 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış delikli çelik levha (kalınlık=6 mm), (Perforated Steel Plate, U-Shaped, plate thickness is 6 mm)
- h) PSub3 ; Alt ve yan yüze epoksi ile yapıştırılmış ve yan yüzden bulonlarla desteklenmiş çelik levha, (kalınlık=3 mm) (Perforated Steel Plate, U-Shaped, supported with bolts, plate thickness is 3 mm)
- i) PSub6 ; Alt yüze epoksi ile yapıştırılmış, yan yüzden sadece bulonla desteklenmiş çelik levha, (kalınlık=6 mm) (Perforated Steel Plate, U-Shaped, supported with bolts, plate thickness is 6 mm)



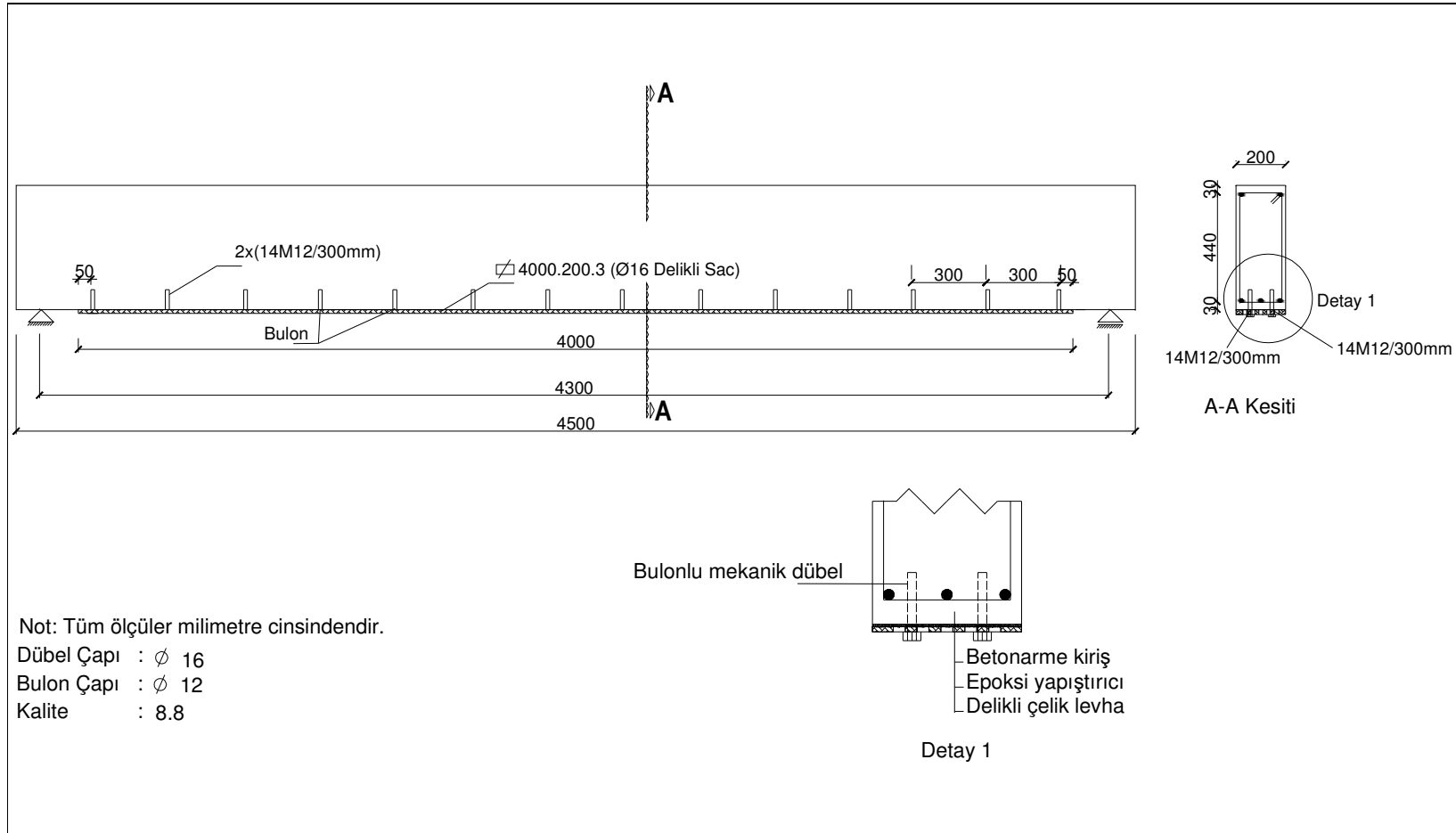
Şekil 4.2. Yalın kiriş deney düzeneği



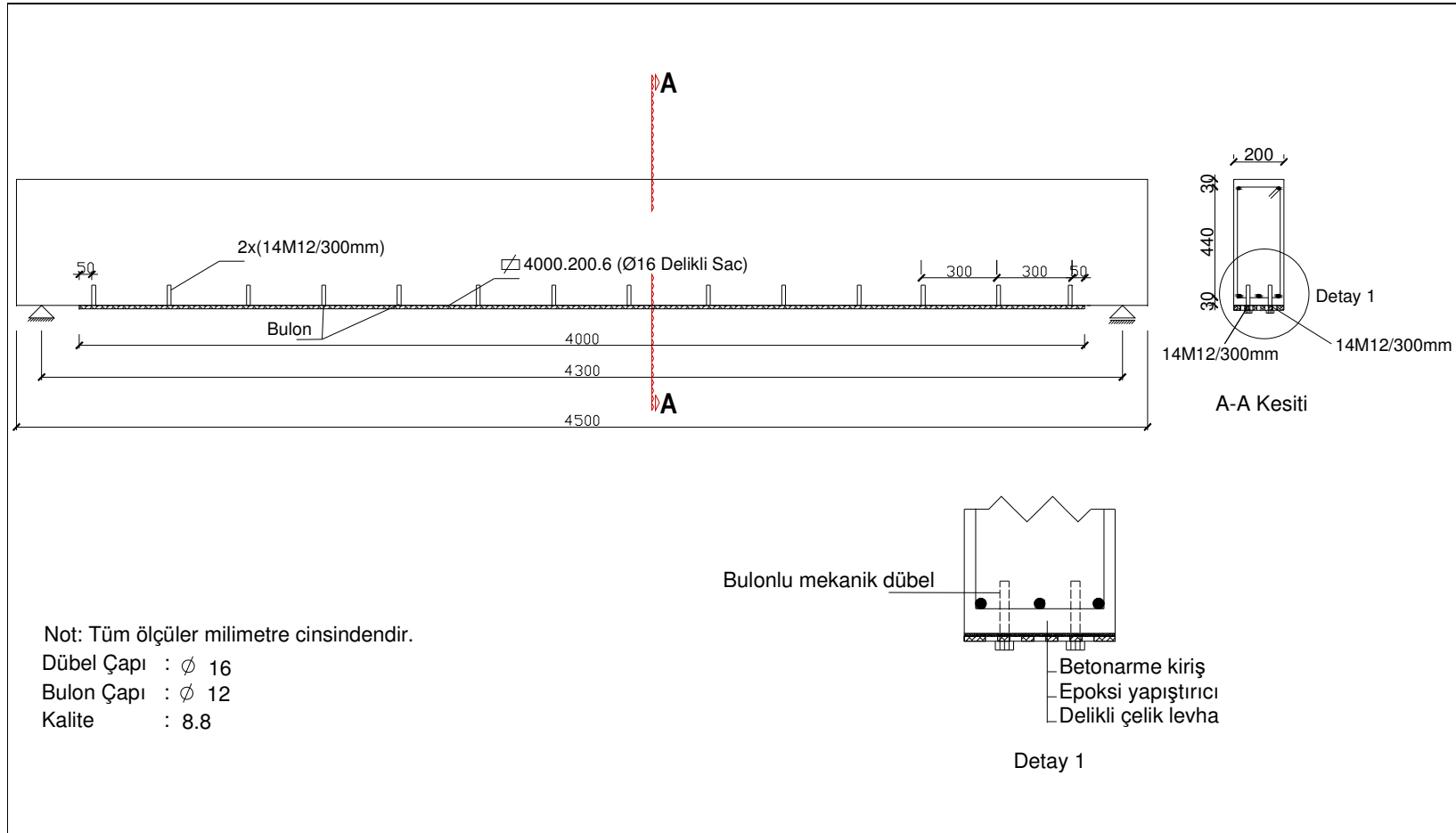
Şekil 4.3. PSb3 kirişi deney düzeneği



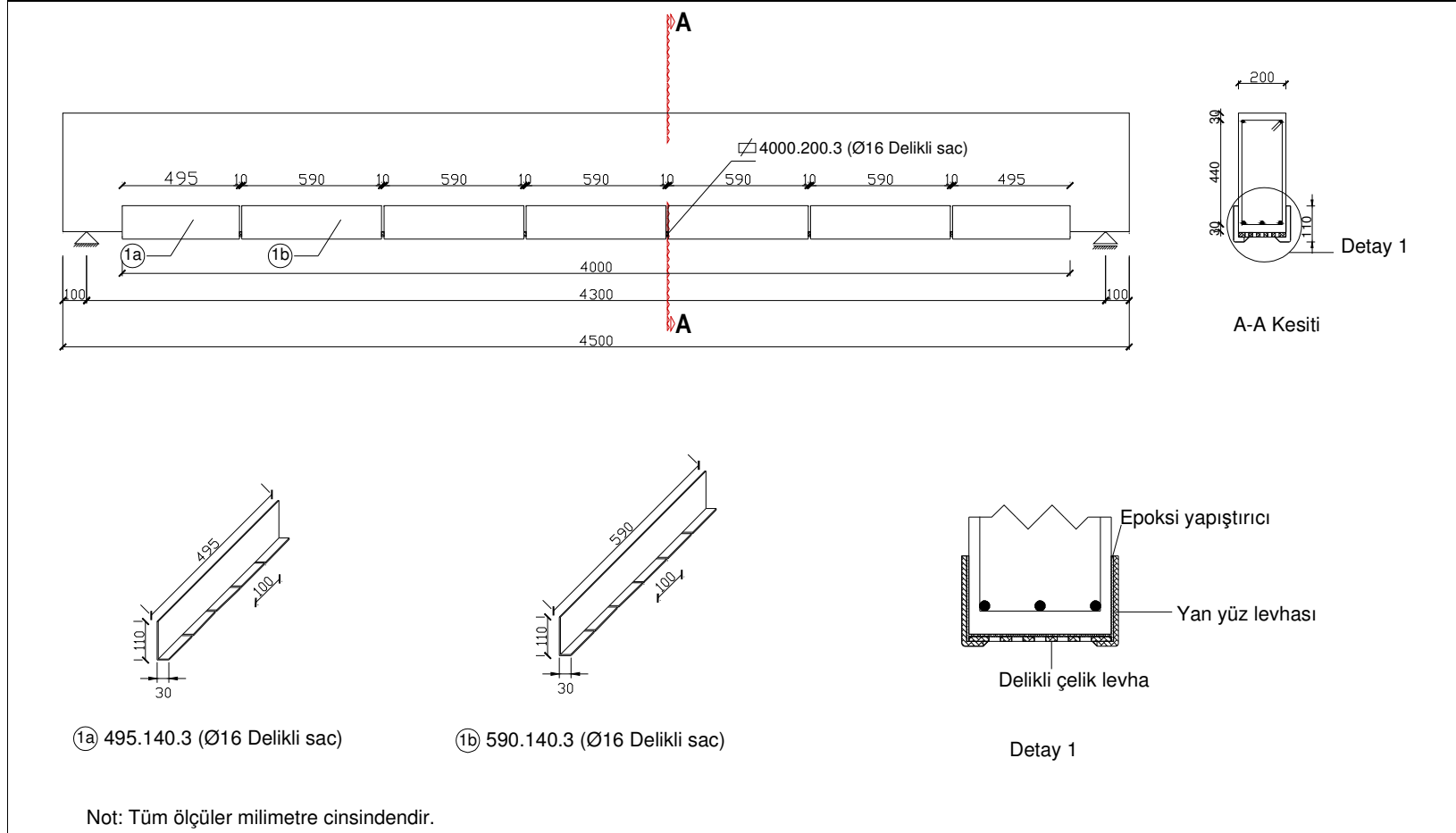
Şekil 4.4. PSb6 kirişi deney düzeneği



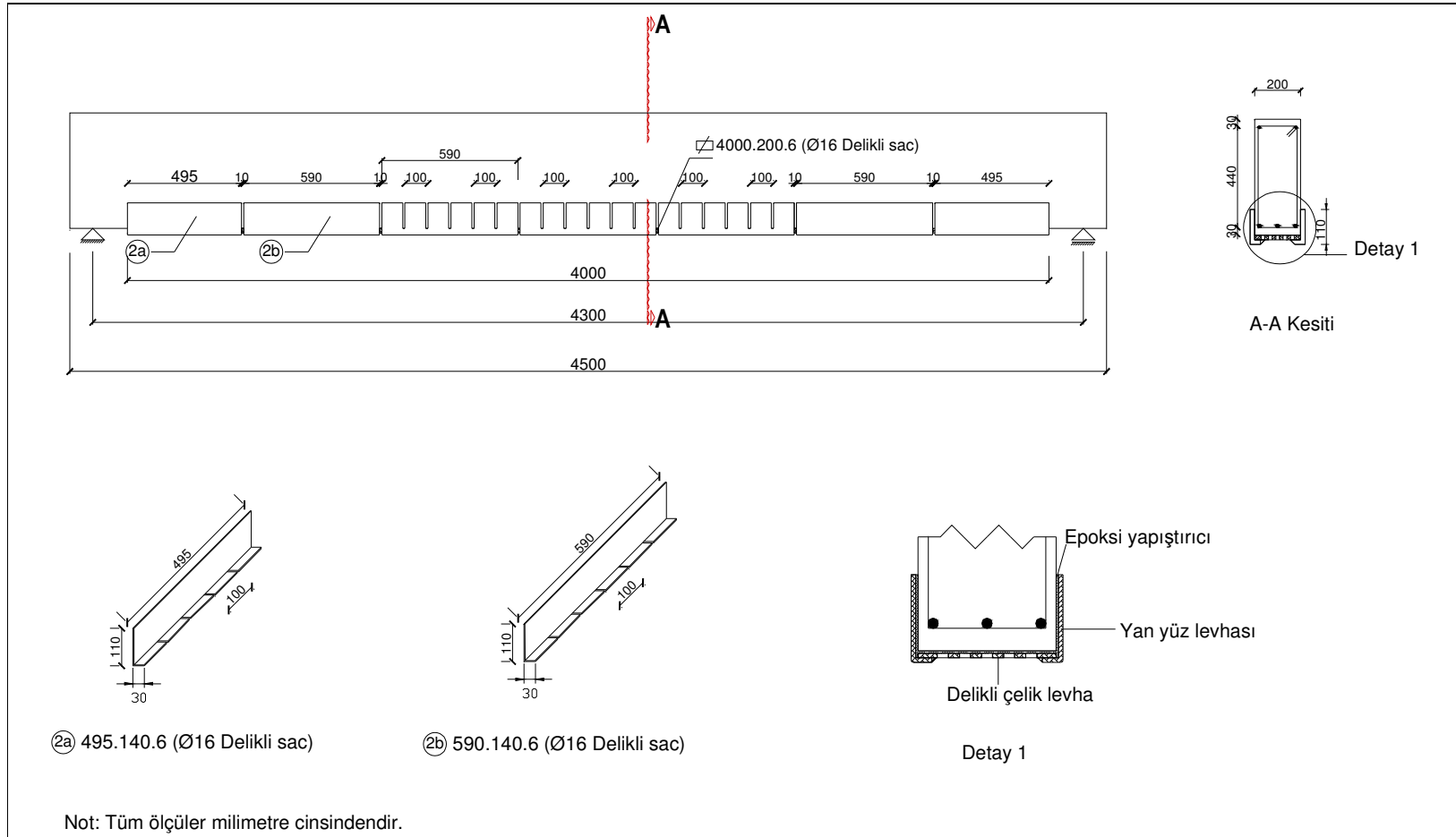
Şekil 4.5. PSbb3 kirişi deney düzeneği



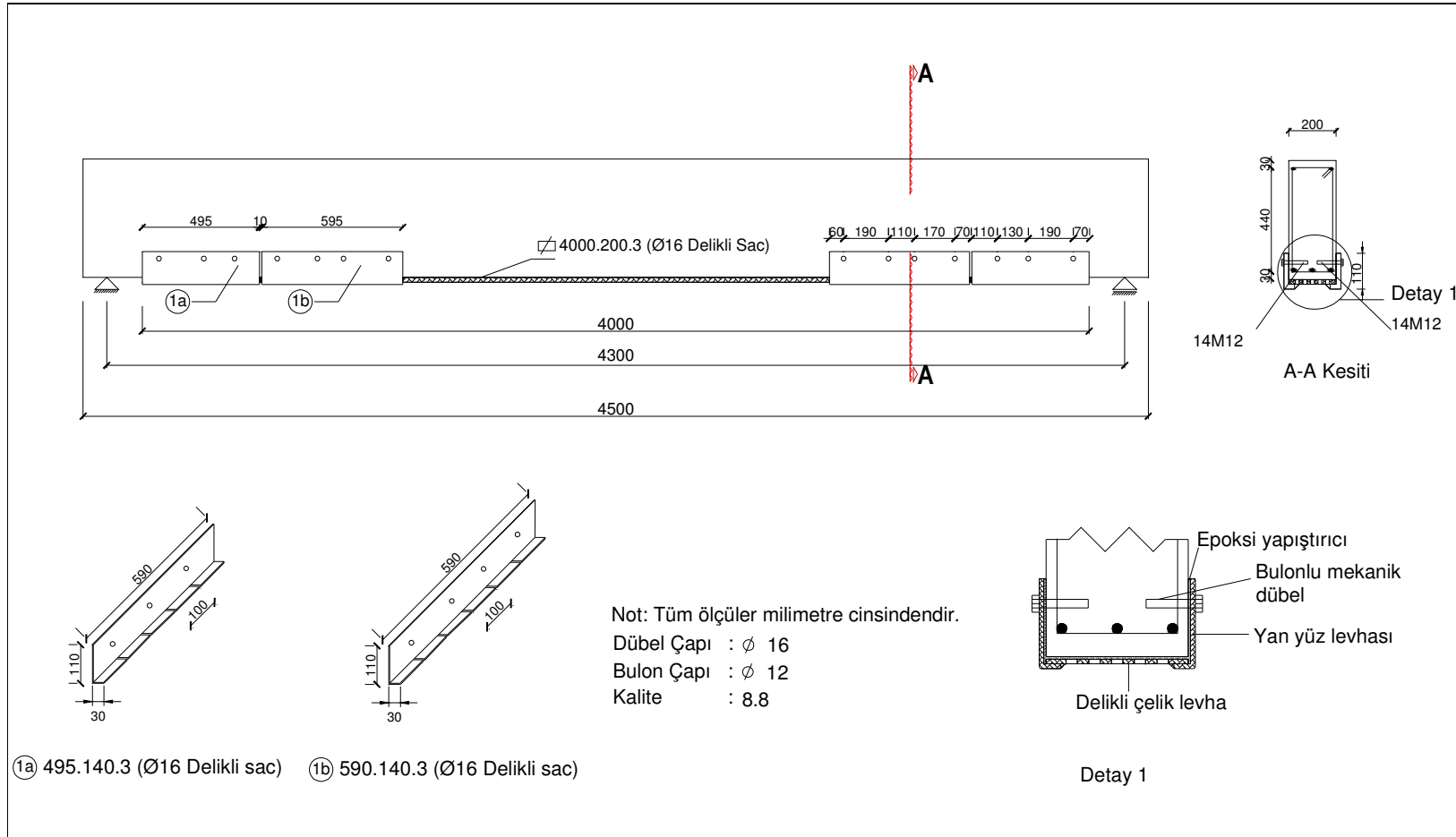
Şekil 4.6. PSbb6 kirişi deney düzeneği



Şekil 4.7. PSu3 kirişi deney düzeneği



Şekil 4.8. PSu6 kirişi deney düzeneği



Şekil 4.9. PSub3 kirişi deney düzeneği



4.2. Deney Elemanları

Deneylerden elde edilen sonuçların olabildiğince uygulamadaki kirişleri temsil edebilmesi için deney elemanı ölçeğinin 1/1 olmasına karar verilmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 200 x 500 mm boyutlarındaki bir kiriş kesiti model olarak seçilmiştir. Kiriş boyutunun ise 4,5 m alınmasına karar verilmiştir. Model kirişlerde epoksi ile yapıştırılan $t=3$ ve $t=6$ mm kalınlığında delikli çelik levhalar güçlendirme elemanı olarak kullanılmıştır.

Tüm kirişlerde nervürlü 3 ϕ 14, (BÇ-IIIa kalitesinde) çekme donatısı kullanılmıştır. Bu donatı minimum donatı miktarının iki katından biraz fazla olup, uygulamadaki olağan donatılı kirişleri yansıtmaktadır. Tüm kirişlerde nervürlü 2 ϕ 10, (BÇ-IIIa kalitesinde) basınç donatısı kullanılmıştır. Herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılmasını amaçlandığından, tüm kirişler oluşabilecek en büyük kesme zorlamalarını karşılayabilecek şekilde ϕ 8/100 mm lik etriyelerle donatılmıştır.

Kiriş alt yüzeylerine yapıştırılmak üzere 3 ya da 6 mm kalınlığında delikli çelik levhalar kullanılmıştır. Enkesitteki delik çaplarının toplamı düşüldükten sonra arta kalan metalik alanın genişliği 120 mm'dir (200 mm - 5 adet ϕ 16 delik=120mm). Buna göre 3 mm'lik levhalarda $3 \times 120 = 360 \text{ mm}^2$, 6 mm'lik levhalarda ise $6 \times 120 = 720 \text{ mm}^2$ 'lik, çekme donatısı olarak çalışacak ek alanlar elde edilmiştir. Mevcut çekme donatıları da düşünüldüğünde alınan donatı oranları 3 ve 6 mm'lik elemanlar için sırasıyla 0,009 ve 0,013'tür. Model olarak ele alınmış olan 200x500 mm'lik kiriş için izin verilen maksimum donatı oranı $0.85\rho_b = 0.85 \times 0.016 = 0.014$ olup, bu değer 6 mm'lik levha ile elde edilen donatı oranına yaklaşık eşittir. Böylelikle delikli levhaların olağan donatı oranlarında ve aşırı donatılı durumlarda nasıl davranacağını belirlenmesi hedeflenmiştir.

4.3. Malzeme Özellik 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 partiden temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan beton ve donatılardan alınan numuneler laboratuvarda 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 10 mm ve 14 mm çaplı boyuna donatı kullanılmıştır. Bu donatıların akma dayanımı (f_{yk}) 450 MPa kopma dayanımı (f_u) 620 MPa'dır.

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

Piyasa araştırması sonucunda, Sika-Deteks firmasının ürettiği "Sikadur-31" isimli epoksi yapıştırıcı uygun görülerek kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği özellikler Çizelge 4.2'de sunulmuştur. İki bileşenden oluşan epoksi yapıştırıcının reçinesi beyaz, sertleştiricisi siyah renklidir.

Çizelge 4.2. Yapıştırıcı (epoksi) özellikleri

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

4.4. Yapıştırma Tekniği

Yapıştırılacak elemanların ve yapıştırma yüzeyinin tozdan kirden ve nemden arındırılması için öncelikli olarak bazı işlemler uygulanmıştır. Çelik levha üzerindeki yağ tabakası silindikten sonra, zımpara kâğıdıyla pas ve diğer çapaklar temizlenerek iyice parlatılmıştır. Son olarak levha yüzeyleri tiner ile temizlenmiştir. Beton yüzeyler ise silme taşı ile düzeltilmiştir.

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

Yapıştırıcı spatulayla beton ve çelik levha yüzeylerine yaklaşık 5 mm. kalınlığında sürüldükten sonra, çelik ve beton yüzeylere 1 mm çaplı tel parçaları konularak sıkışma sonrası epoksi kalınlığının en az 1 mm olması sağlanmıştır. Çelik levha her tarafından aynı anda temas edecek şekilde beton üzerine konularak üzerine ağırlıklar düzgün yayılı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi esnasında levhanın deliklerinin epoksi harcı ile dolması sağlanmıştır.

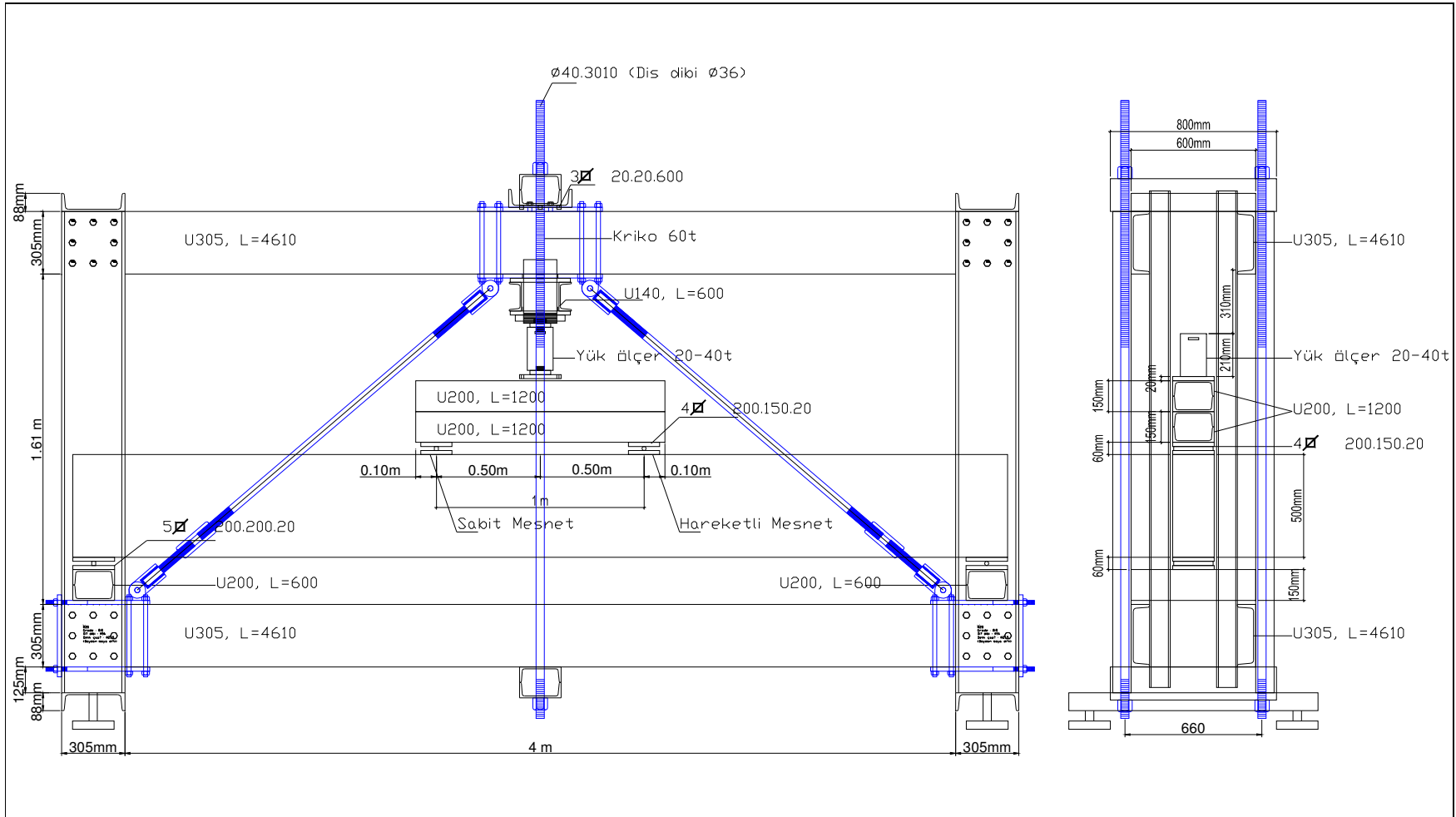
4.5. Deney Düzeni

4.5.1. Deney çerçevesi

Deneyler Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği laboratuvarında kapasitesi 200 kN olan deney çerçevesinde yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce çelik çerçeve, 400 kN yükleri taşıyabilecek şekilde çelik çaprazlarla desteklenerek güçlendirilmiştir. Çerçeve, reaksiyonları kendi içinde deney elemanına iletmektedir. Deney elemanına iki noktalı yükleme yapılmıştır. Yük aralığı düzgün yayılı yük altında oluşan moment diyagramını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Deney stabilitesini sağlamak amacıyla da kirişin boyuna eksenine etrafında olası dönmeleri engellemek için ek önlemler alınmıştır. Yük hidrolik kriko ile verilmiş, yükün büyüklüğü yük hücresi ile ölçülmüştür. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi yük hücresi çelik kirişin ortasına yerleştirilmiştir.

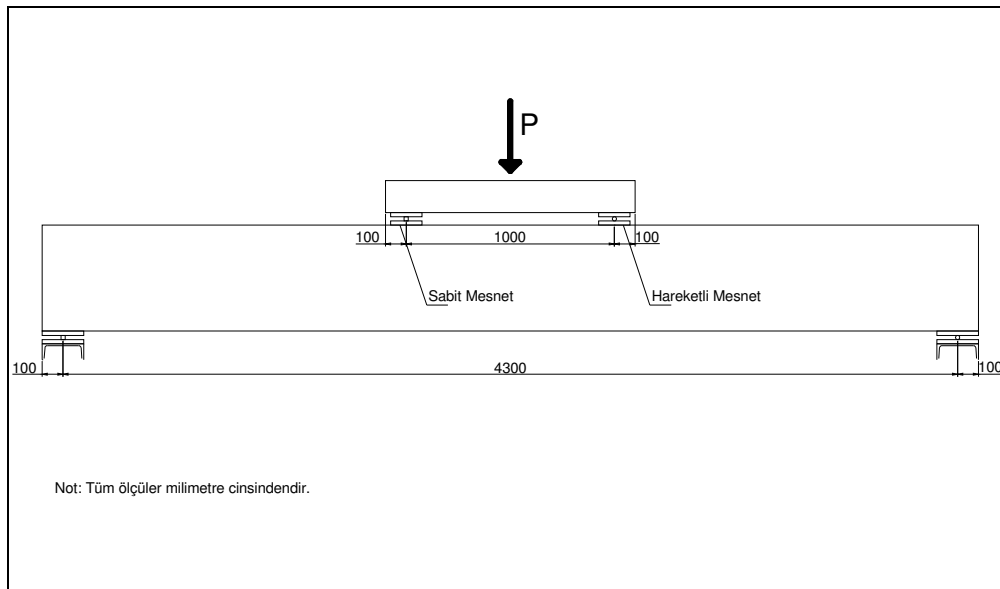
4.5.2. Yükleme düzeni

İki ucundan basit kiriş gibi mesnetlenen deney modellerinde kesme kuvvetinin olmadığı, basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanarak Şekil 4.12'de görülen yükleme sistemi tasarlanmıştır. Oluşturulan iki noktalı yükleme sisteminin yük aralıkları, düzgün yayılı yükler altında oluşacak moment diyagramını yaklaşık olarak kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu amaçla model üzerinde, model ekseninden 500 mm kenarlara



Şekil 4.11. Deney düzeneği

biri sabit diğeri hareketli olarak mesnetlenen, önemli bir sehim yapmayacak şekilde boyutlandırılmış üst üste kaynaklanmış 4 adet U 200 çelik kullanılmıştır. Yük aktarımında kutu profilin mesnetlenmesi iki çelik lama arasına konulan yuvarlak ve kare çubuklarla yapılmıştır. Kutu profil üzerine yükün uygulanabilmesi için 600 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ile yük kontrolü için 400 kN kapasiteli yük ölçer (load-cell) simetri merkezleri çakıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Yükleme noktalarının yerleri

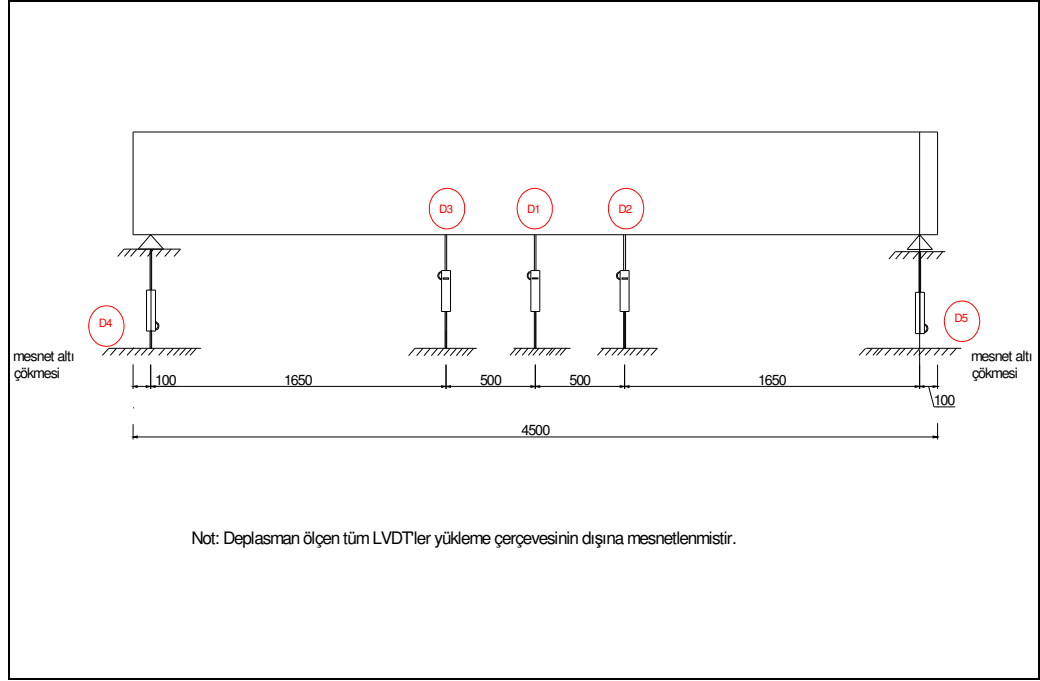
4.5.3. Ölçüm düzeni

Deneyler sırasında çeşitli yön ve doğrultudaki deplasman ölçümleri için, 0,01 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, elektronik deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bu LVDT'lere gelen bilgiler bir okuyucu tarayıcıdan geçtikten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında kirişteki deplasman ile yükün değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir. Ölçüm sisteminde toplam 11 adet LVDT kullanılmış ve her LVDT ye 'D' ile başlayan ve sonunda LVDT numarası olan bir ad verilmiştir. Ölçüm sisteminde düşey deplasmanları ölçen LVDT'ler (D1, D2, D3, D4, D5'tir). D4

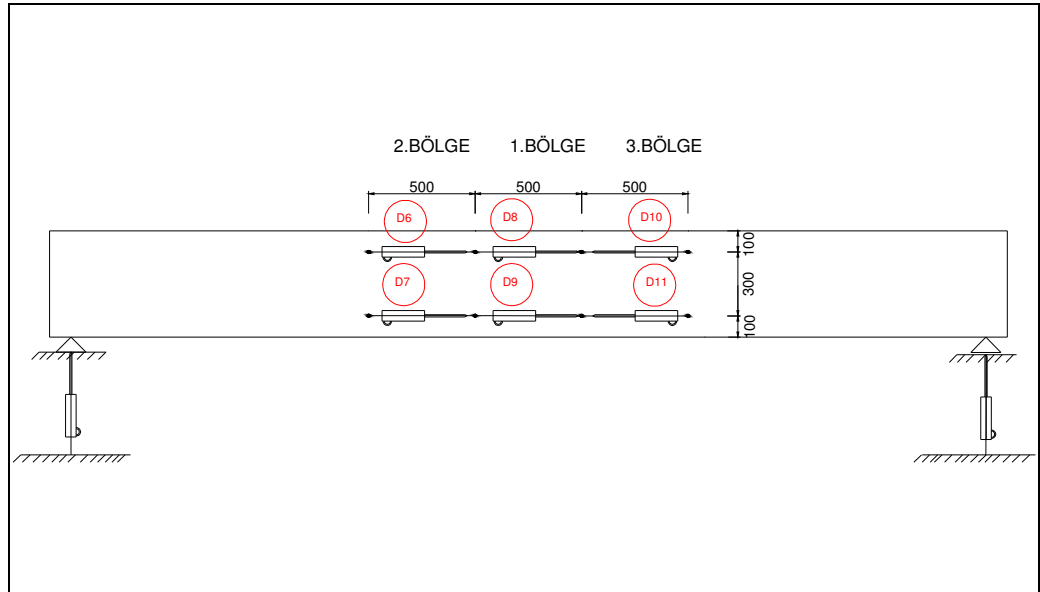
ve D5 mesnet çökmelerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Diğer LVDT'ler ise deney elemanı üzerine ankre edilmiş olan ölçüm çubuklarına bağlanmıştır. Deney elemanı üç ölçüm bölgesine ayrılmış ve eleman üzerine mesnetlenmiş olan LVDT'ler bu bölgelere yerleştirilmiştir. (Şekil4.13.a-b)

Kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'lerin ölçüm amaçları aşağıda belirtilmiştir.

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



a) Ön yüzü



b) Arka yüzü

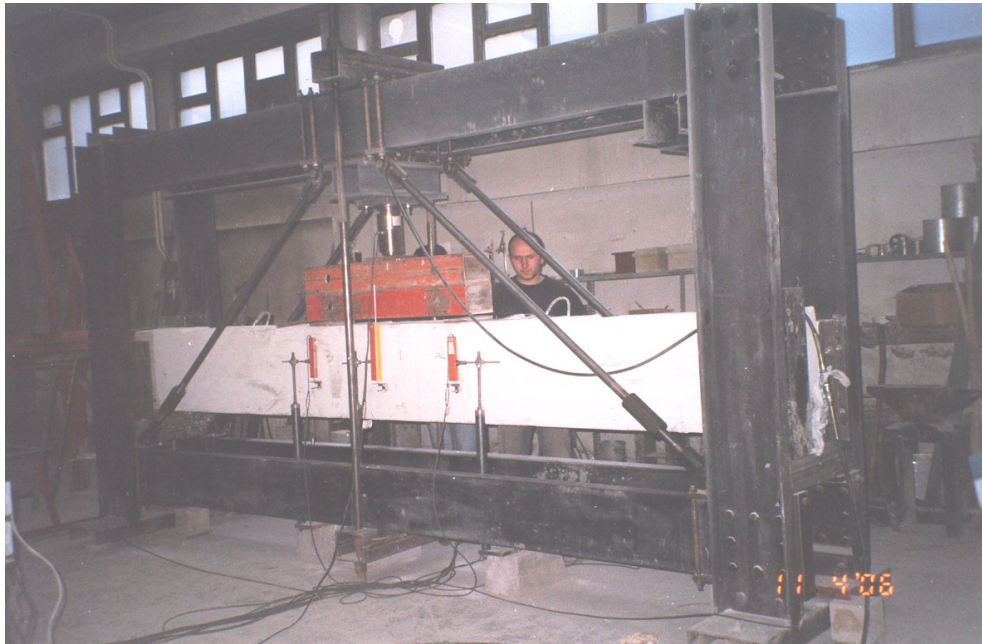
Şekil 4.13. Ölçüm düzeneği a) Ön yüzü b) Arka yüzü

4.6. Deneyler

Bölüm 4.1’de özellikleri anlatılan deney modellerinin deney çerçevesine yerleşilmesinden sonra Şekil 4.11’de gösterilen deney düzeni, yükleme ve ölçüm aletlerinin bağlanmasıyla hazır hale getirilmiştir. Eğrilik değerlerinin bulunmasını sağlayan çerçeve sisteminin boyutları ile referans olarak tüm ölçüm aletlerinden alınan sıfır okumalarından sonra yükleme programına geçilmiştir. Tüm modellerde yük 3 kN–6 kN arasında değişen yük adımları ile artırılarak uygulanmıştır. Yük artırım değerleri kirişin deney sırasındaki davranışına göre belirlenmiştir. Deneyler sırasında mesnetlerdeki çökmeler nedeniyle gerekli düzeltmeler yapılmadan yük-deplasman eğrileri de çizilmiş ve deneyin gelişimi adım adım izlenmiştir.

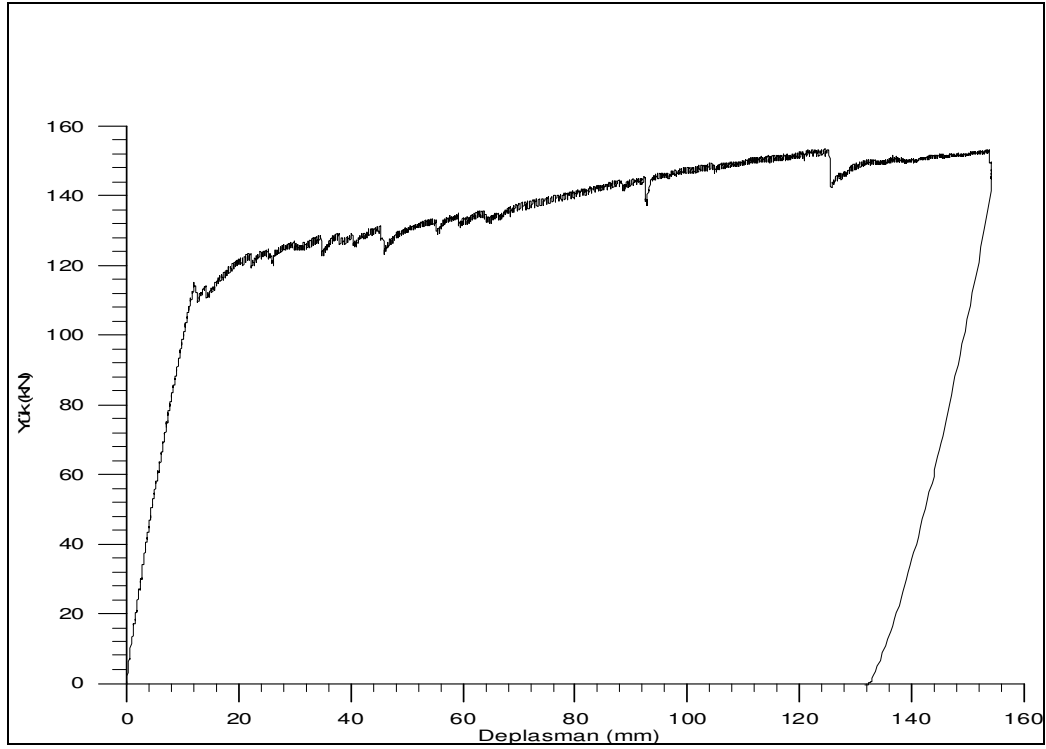
4.6.1. SB: Yalın kiriş (Referans kirişi)

Yapılan çalışma için referans elemanı olarak, yalın SB kirişi düzenlenmiştir. Bölüm 4.2.’de belirtilen özelliklerdeki kirişe herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmadan deney gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.1. SB deney elemanı

Yükleme başladıktan itibaren 30 kN yükte ilk çatlaklar görülmüştür. 75 kN yükte ana çatlaklar arka yüze ulaşmış, 123 kN yükte pekleşme gerçekleşmiştir. Yük 150 kN değerine kadar erişmiştir. Yük değeri 144 kN'a düştüğünde sol mesnette ve iki mesnet ortasında ezilme tespit edilmiştir. Deneye 145 kN yük ve 154 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Ezilmenin etriyenin dışında kaldığı belirlenmiştir.

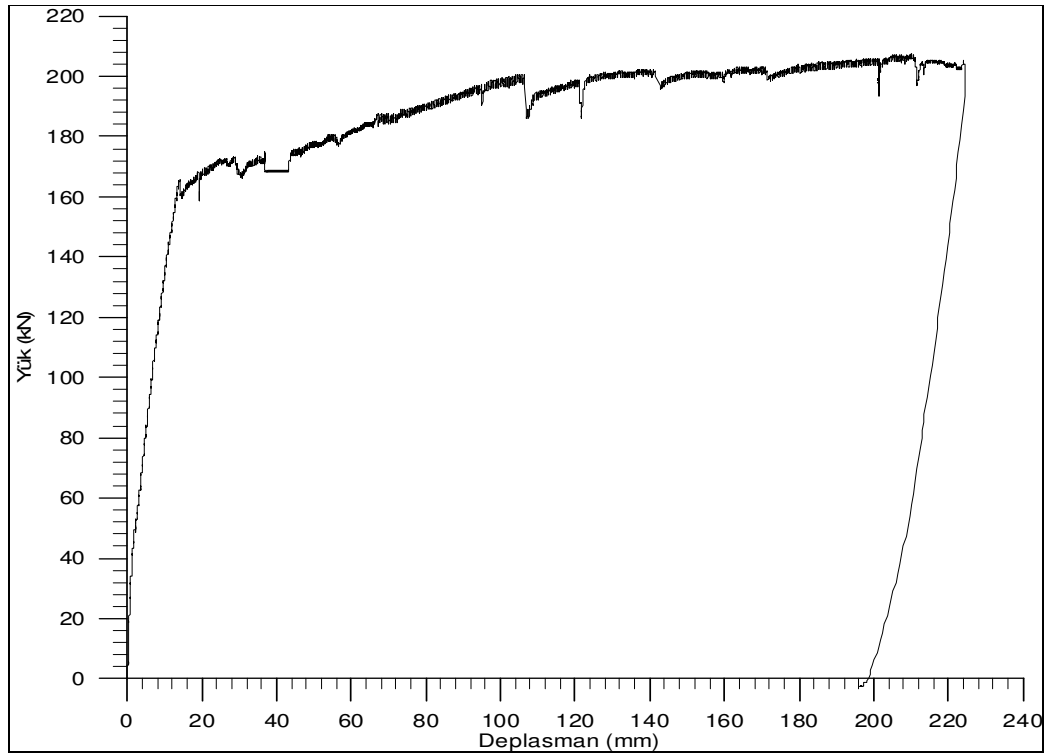


Şekil 4.14. SB elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.2. PSb3: Güçlendirilmiş kiriş

PSb3, yalın kirişin yalnızca alt yüzüne 3 mm kalınlığındaki delikli çelik levhanın epoksi ile yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş deney elemanıdır. Yüklemeye başlatıldıktan sonra deney elemanındaki ilk çatlaklar 50 kN yükte gözlemlenmiştir. 164 kN yük değeri akma sınırı olarak belirlenmiş, 171 kN yükte eleman ile levha arasında ayrılma başlamıştır. Eleman ve levha arasında ayrılma başlayana kadar aderans çatlağı görülmemiştir. 200 kN

yükte elemanın tam ortasında, basınç bölgesinde ezilme tespit edilmiştir. 204 kN yük seviyesinde ezilme dağılmış, basınç bölgesindeki eğilme donatısında bir miktar burkulma görülmüştür. Levha çok büyük oranda eleman yüzeyinden ayrılmıştır. Yapıştırma hatası olmasına rağmen levhanın mesnetten ayrılmadığı gözlemlenmiştir. Deney sonunda yapılan ölçümlerde levha boyu 4093 mm, eni ise 194 mm olarak ölçülmüştür. Deliklerde ovalleşmeler gözlemlenmiş; 16 mm lik delik çapları kiriş boyuna paralel yönde 18 mm, dik yönde ise 15 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.15. PSb3 elemanı yük-deplasman ilişkisi



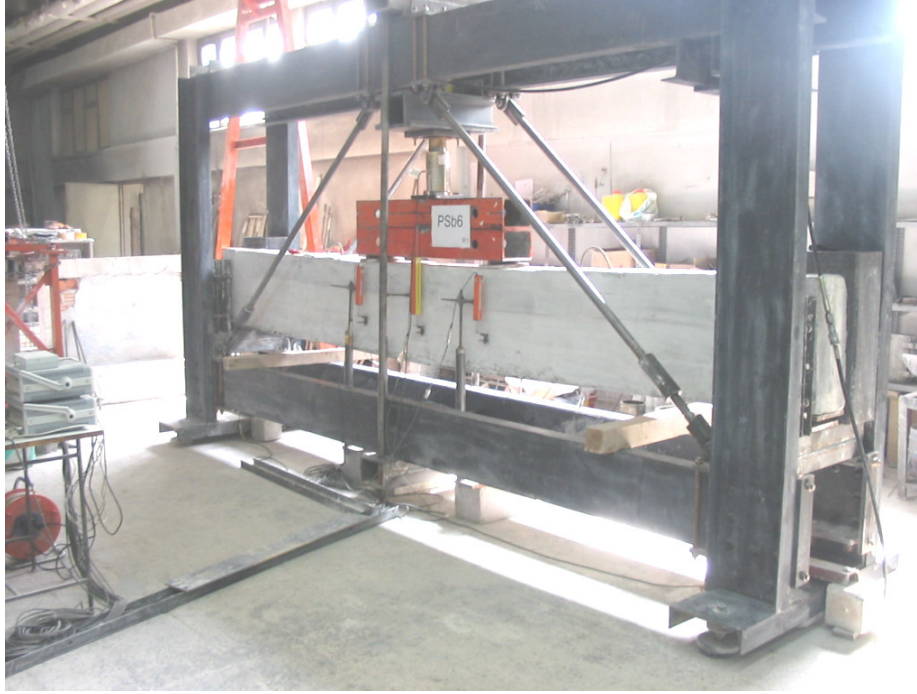
Resim 4.2. PSb3 elemanında görülen deformasyonlar

4.6.3. PSb6: Güçlendirilmiş giriş

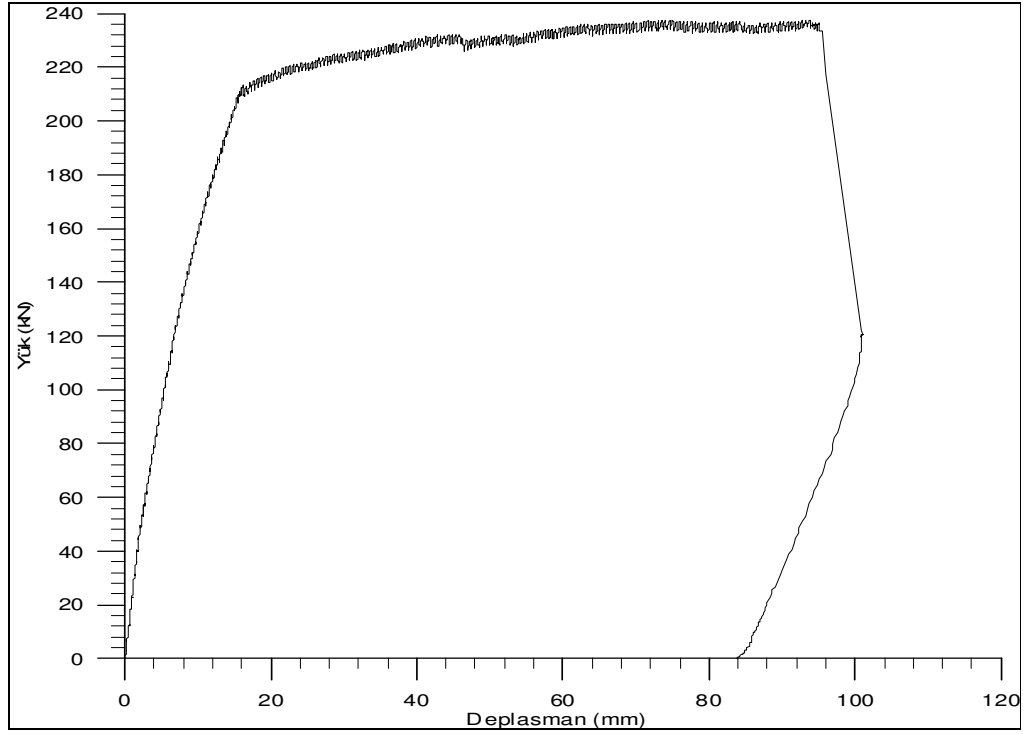
PSb6, 6 mm kalınlığındaki delikli çelik levhanın yalnızca alt yüze epoksi ile yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş deney elemandır. Bu deney elemanında beklenen sünekliğe ulaşamadığı için yapıştırma kalitesinden şüphe edilmiş, deney tekrarına gerek duyulmuştur. Yapılan tekrar deneyi PSb6-R1 adıyla aynı koşullarda düzenlenmiş ve deney adı, çalışmadaki isimlendirme kuralının bozulmaması için PSb6 olarak adlandırılmıştır (Resimde PSb6-R1, anlatımda PSb6).

Yükleme başladıktan sonra 70 kN yük değerinde ilk kılcal çatlaklar görülmüştür. 200 kN yük değerinde levha yüzeyinde aderans çözülmesi ortadaki 1 m'lik bölümde oluşmuştur. Levha aktıktan sonra maksimum 230 kN yüke ulaşılmış ve 92 mm deplasmanda levha sağ mesnetten ayrılarak aniden düşmüştür. Ayrılmalar daha çok levha yüzeyinden olmuştur. Bazı bölgelerde levha betondan 5 ile 15 mm arasında değişen derinliklerde parçalar ayrılmıştır. Levhanın ayrılması epoksiden değil beton yüzeyinden

gerçekleşmiştir. Deneyden sonra levha boyunun 4035 mm, eninin 199 mm değerde olduğu tespit edilmiştir. Ovalleşen deliklerin uzama doğrultusunda çapları 17 mm'ye çıkmış diğer yönde ise 15,5 mm olarak belirlenmiştir.



Resim 4.3. PSb6 deney elemanı



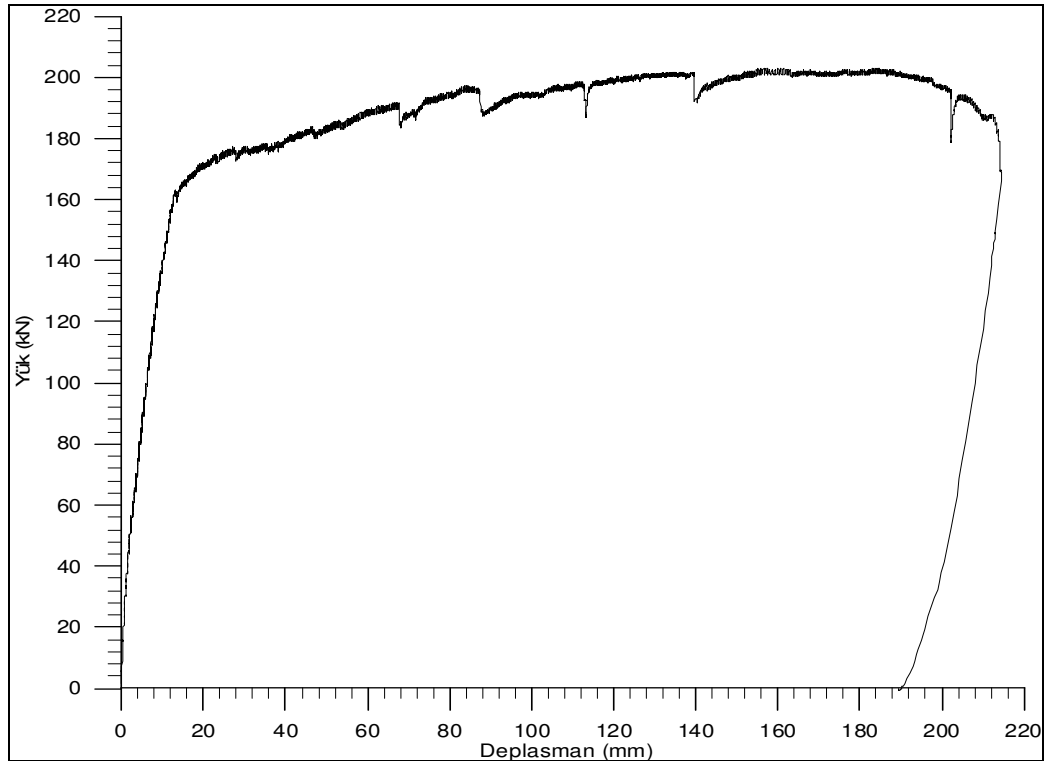
Şekil 4.16. PSb6 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.4. PSbb3: Güçlendirilmiş kiriş

PSbb3 deney elemanında, yalın kirişin altına 3 mm kalınlığında delikli sac levha, epoksi ile yapıştırılmıştır. Levha $\phi 12$ mm'lik bulonlarla 300 mm aralıklarla desteklenmiştir. Yükleme başladıktan sonra 43 kN yüklemede ilk kılcal çatlaklar görülmüştür. 160 kN yük ve 13 mm deplasmanda çekme donatısı akmış, 174 kN yükleme değerinde çatlaklar, basınç yüzünden 100 mm aşağıya kadar ulaşmıştır. 191 kN yük değerinde 3 numaralı mesnet bölgesi ezilmiştir. Yük geri alındığında levhada ayrılma olduğu ve levhanın bulonlar tarafından tutulduğu görülmüştür. Bulonlardan bir çifti çatlağa denk geldiği için yerinden çıkmıştır. 200 kN yüklemede her iki taraftaki basınç donatısına simetrik burkulma görülmüş ve deplasman 200 mm yi geçmiştir.



Resim 4.4. PSbb3 deney elemanı



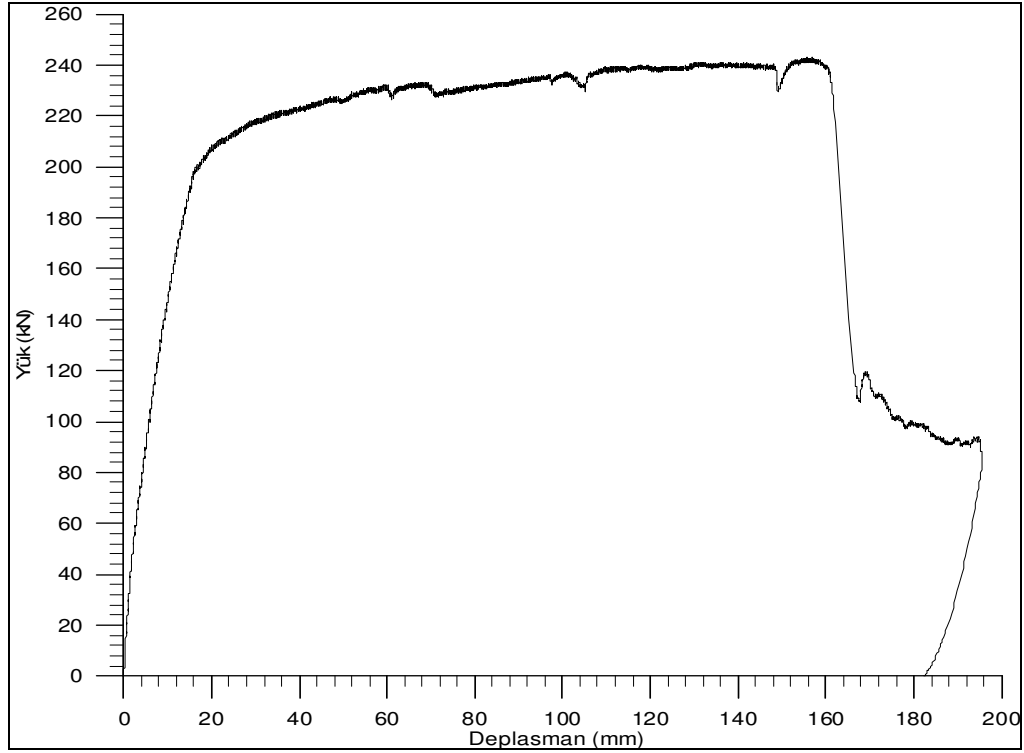
Şekil 4.17. PSbb3 elemanı yük-deplasman ilişkisi



Resim 4.5. PSbb3 elemanına tespit edilen sac levha

4.6.5. PSbb6: Güçlendirilmiş kiriş

PSbb6 deney elemanı, PSbb3 elemanı gibi hazırlanmış, ancak elemanda kullanılan levha kalınlığı 6 mm olarak kullanılmış ve yine 300 mm aralıklarla bulonlarla desteklenmiştir. Yükleme başladıktan sonra 60 kN yükleme değerinde 2,7 mm deplasman değerinde ilk çatlaklar görülmüştür. 200 kN değerinde eleman akmaya başlamıştır. Bu elemanda diğer deney elemanlarına göre daha fazla kesme çatlağı belirlenmiştir. Bu çatlaklar 300 mm aralıklı olarak oluşmuştur. 220 kN yükleme değerinde levha ile kiriş arasında orta bölgede ayrılmalar belirlenmiştir. Genel olarak çatlaklar iki yük mesneti arasına yayılmıştır. 230 kN değerinde ezilmeler belirginleşmiştir. Ezilmenin yoğunlaşması ile yükte düşme gözlemlenmiştir. 238 kN değerinde basınç bölgesindeki donatıda burkulma belirlenmiştir. Yük boşaltıldığında levha kendini bırakmamıştır. Bulonların, deformasyonu yaydığı ve basınç donatısının 3 etriye arasında "S"ler yaptığı gözlemlenmiştir. Kesme, kirişin tam ortasında olmuştur.

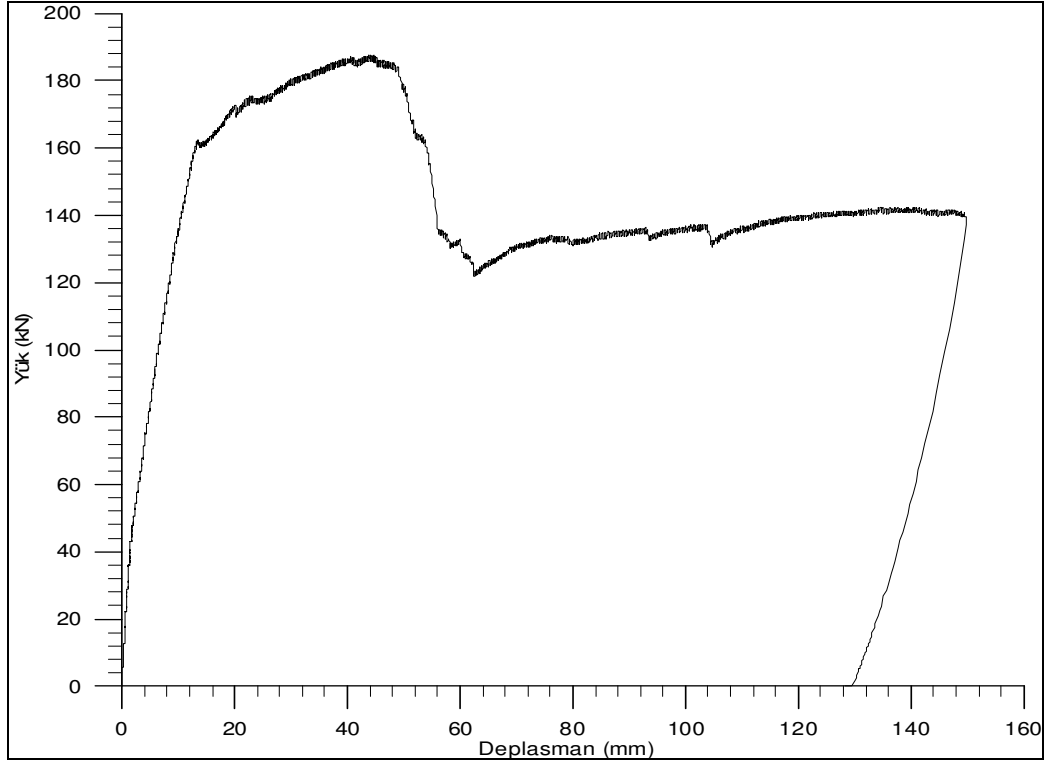


Şekil 4.18. PSbb6 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.6. PSu3: Güçlendirilmiş kiriş

Yalın kirişin alt yüzüne yapıştırılmış levhaların, kenarlarına 110 mm yükseklikte delikli çelik levhaların kaynaklanmasıyla elde edilen U şeklindeki levhaların alt ve yan yüzlerinden epoksi ile yapıştırılması ile PSu3, deney elemanı oluşturulmuştur. Kullanılan levhanın kalınlığı 3mm'dir ve tüm kiriş boyunca uygulanmıştır. 75 kN yükleme değerinde ilk kılcal çatlaklar görülmüş 130 kN yük değerinde çatlakların birçoğu yan yüz derzlerini bulmuştur. Akma 160 kN yük ve 12,9 mm deplasman değerinde gerçekleşmiştir. Yan yüz derzleri çatlak aralıklarını çok iyi kontrol etmiştir. Ancak akmadan sonra deformasyonlar en zayıf noktadaki derz civarında yoğunlaşmış ve 124 kN ve 64 mm deplasmanda orta levhanın sağ derzinin olduğu yerden alt levha kopmuştur. Derz sayısının az olduğu tespit edilmiş, 135 kN yükleme ve 90 mm deplasman değerinde beton

basınç bölgesinde ezilme gözlemlenmiştir. Orta levha, yan yüzden büyük bir beton kütle ve pas payını olduğu gibi ayırmıştır.



Şekil 4.19. PSu3 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.7. PSu6: Güçlendirilmiş kiriş

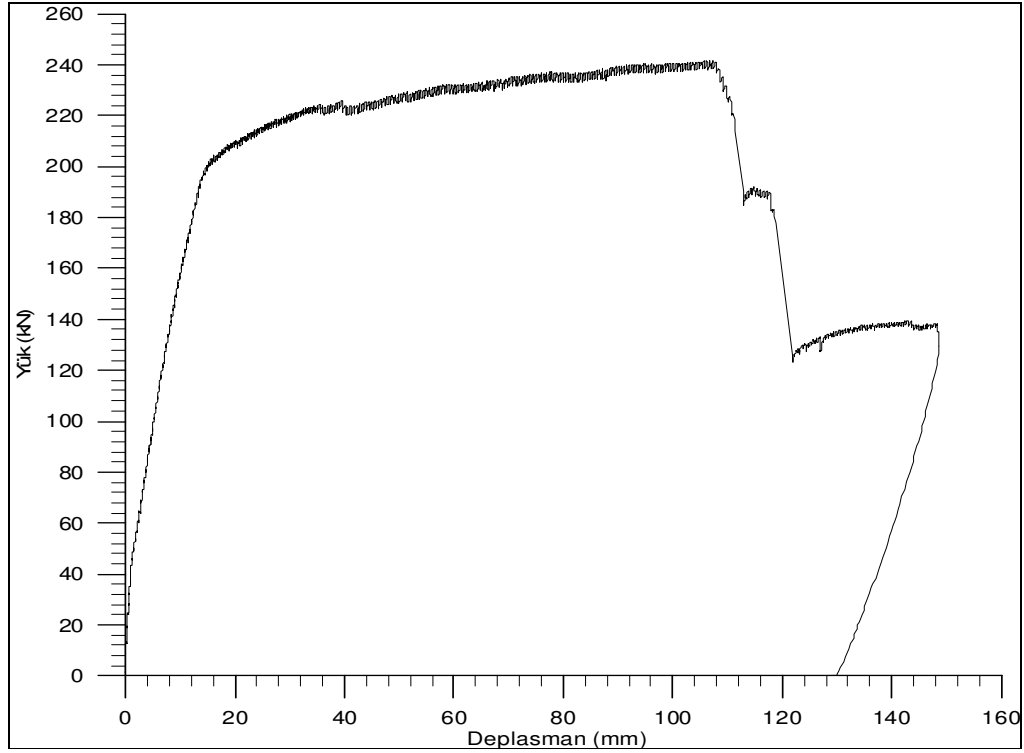
PSu6 deney elemanı PSu3 elemanı gibi hazırlanmış ancak 3 mm yerine 6 mm kalınlığında delikli levha kullanılmıştır. PSu3 elemanında derz sayısının yetersiz olmasından dolayı deformasyonlar en zayıf kesitteki derzde yoğunlaşıp kopmuştur. Bu elemanda da aynı olayın tekrarlanması istenmediğinden ortadaki 3 adet yan yüz levhasında 100 mm aralıklarla yeni derzler oluşturulmuştur. Böylelikle deformasyonların daha uzun bir bölgeye yayılması hedeflenmiştir.

Yükleme başladıktan sonra 90 kN yükleme ve 4,5 mm deplasman değerinde ilk çatlak görülmüştür. 205 kN ve 17,5 mm deplasmanda yan

yüz levhaların bazılarında ayrılmalar görülmüştür. Ortadaki 5 tane 100 mm'lik levhanın yüzeylerden ayrıldığı belirlenmiştir. 220 kN değerinde akma başlamış 13 adet 100 mm'lik yan levhanın ayrıldığı tespit edilmiştir. 230 kN ve 60 mm deplasman değerinde soldan ikinci (kesilmemiş) levhada yüzeyde hafif açılma belirtisi görülmüştür. Ortadaki 3 büyük levhanın tamamı ayrılmıştır. 230 kN yükleme ve 67 mm deplasman değerinde betonda ezilmeler görülmüştür. Yaklaşık 110 mm deplasman değerine ulaşıldığında levhada kopmalar başlamış ve yükte ani düşüşler gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren yük düşmüş ve 130 kN değerinde 124 mm deplasmanda deliklerde kopmalar görülmüştür.



Resim 4.6. PSu6 deney elemanı



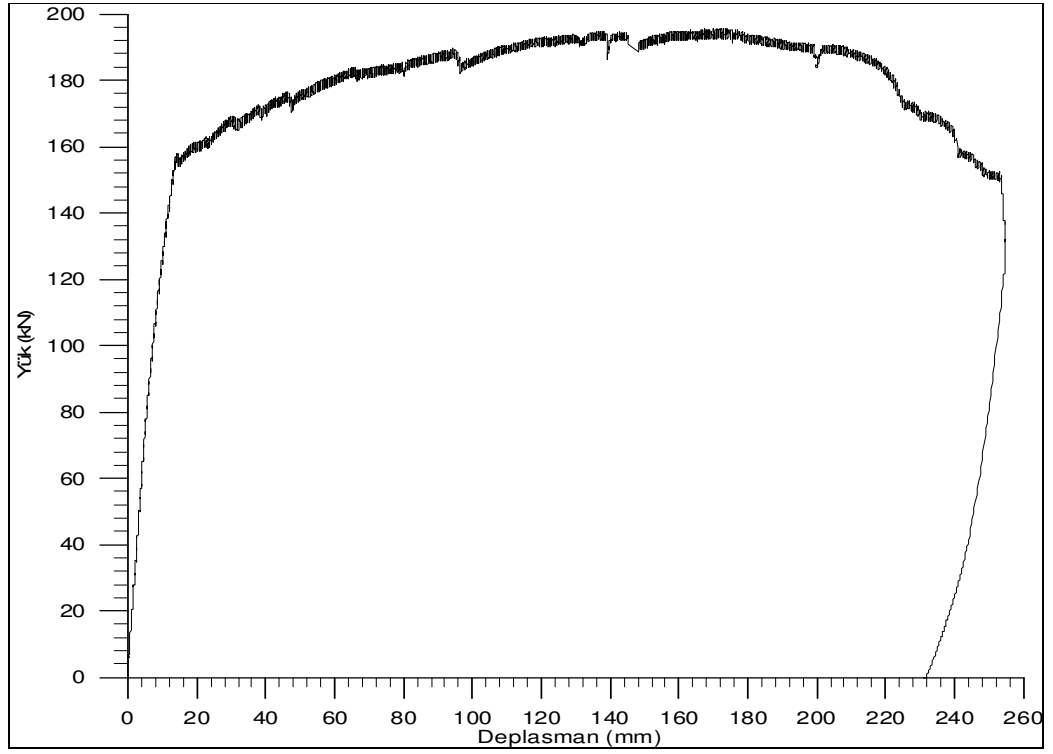
Şekil 4.20. PSu6 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.8. PSub3: Güçlendirilmiş kiriş

PSub3 deney elemanı, PSu3 elemanının $\phi 12$ mm'lik bulonlarla yan yüzlerden tespit edilmiş halidir. Farklı olarak tüm kiriş boyunca U şeklindeki kesitler uygulanmamıştır. Yalnızca levhanın uçları 500 mm ve 600 mm'lik ikişer tane U şeklinde levha ile tutturulmuştur. 40 kN'da ilk çatlak gözlenmiştir. 135 kN'da levha ile yüzey arasında sıyrılma belirtileri tespit edilmiştir. 165 kN'da levha orta bölgede alt yüzeyden tamamen ayrılmıştır. Mesnetlerin her ikisinde de ezilme aynı anda başlamıştır. 195 kN yük seviyesinde U demirlerin epoksilerinde dahi ayrılma gözlemlenmiştir. Yük düşmeye başlamış ve 150 kN yük değerinde deneye son verilmiştir.



Resim 4.7. PSub3 deney elemanı



Şekil 4.21. PSub3 elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.6.9. PSub6: Güçlendirilmiş kiriş

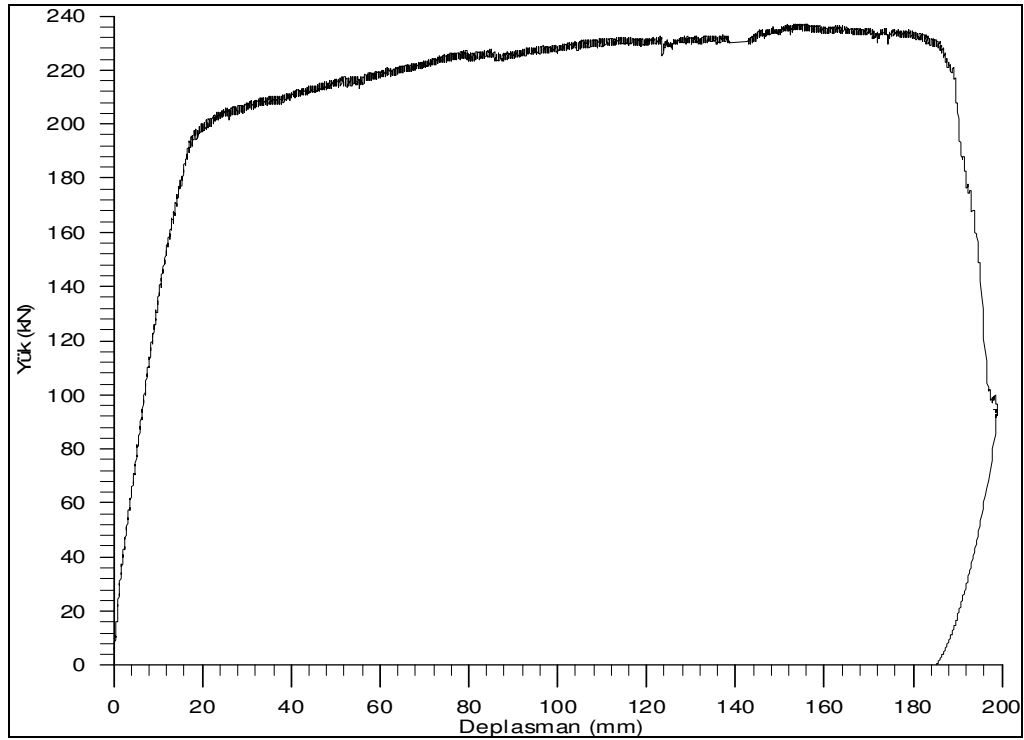
PSub6, PSub3 elemanın 6 mm kalınlığında levhalarla ve yalnızca uçlarda 600 mm'lik U şeklinde levhalarla düzenlenmiş deney elemanıdır. Yan yüzlerde epoksi yoktur. Deneyde, levha delikleri hatalı zımbalanmış olduğu için levha hatalı deliklerin olduğu yerden koparak gevrek bir şekilde kırılmıştır. Bu nedenle deney PSub6-R1 adıyla tekrarlanmıştır. Deney elemanlarında kullanılan isim bütünlüğünün bozulmaması için anlatım ve yorumlarda bu tekrar elemanı da PSub6 olarak anılmıştır.



Resim 4.8. PSub6 deney elemanı

İlk deneyde levha, uçlarından delikli ve PSub3 elemanındaki gibi 500 ve 600 mm'lik elemanlarla tutturulmuştur. Tekrar deneyinde ise levhayı uçlara kenetleyen yan yüz levhaları deliksiz ve 600 mm boyunda tasarlanmıştır. Resim 4.8'de ilk yapılan deneyin fotoğrafı sunulmuştur. Yan yüz levhalarının çekme dayanımına bir katkısı olmayacağından farklılık göstermesi davranışı değiştirmeyecektir. Gerçekleştirilen deney esnasında

100 kN yük, 7 mm deplasmanda ilk çatlaklar oluşmuştur. 180 kN yükte sol uç bulon hizalarında çatlaklar oluşmuştur. 200 kN'da levhanın sağ ucundaki bulonlardan başlayan çatlaklar belirlenmiştir. Orta bölgede levha betondan ayrılmıştır. Çatlaklar orta bölgede yoğunlaşmış durumdadır. 215 kN'da sol yük noktasında betonda ezilme belirtisi gözlemlenmiştir. 225 kN'da basınç donatısında burkulma tespit edilmiştir. Kiriş orta bölgesindeki 2 metrelik kısım tamamen aderansını yitirmiştir. Yük 235 kN değerine çıkmıştır. Deney oldukça başarılı olmuştur. Sistem mekanizmaya dönüşünceye kadar deformasyon yatay iletilmiştir. Kırılma şekli sol mesnete yakın, kesme kuvvetinin sıfır olduğu yerden olmuştur. Kırılma şekli kesme kuvveti kırılmasına çok benzer bir kırılmadır, ancak kesme kuvveti o bölgede sıfırdır. Basınç bloğunun yüksekliğinin sıfıra indiği anda o noktada bir mafsal oluşmuştur ve sistem mekanizmaya dönüştüğü için artık yükünü hızla kaybetmiştir.



Şekil 4.22. PSub6 elemanı yük-deplasman ilişkisi

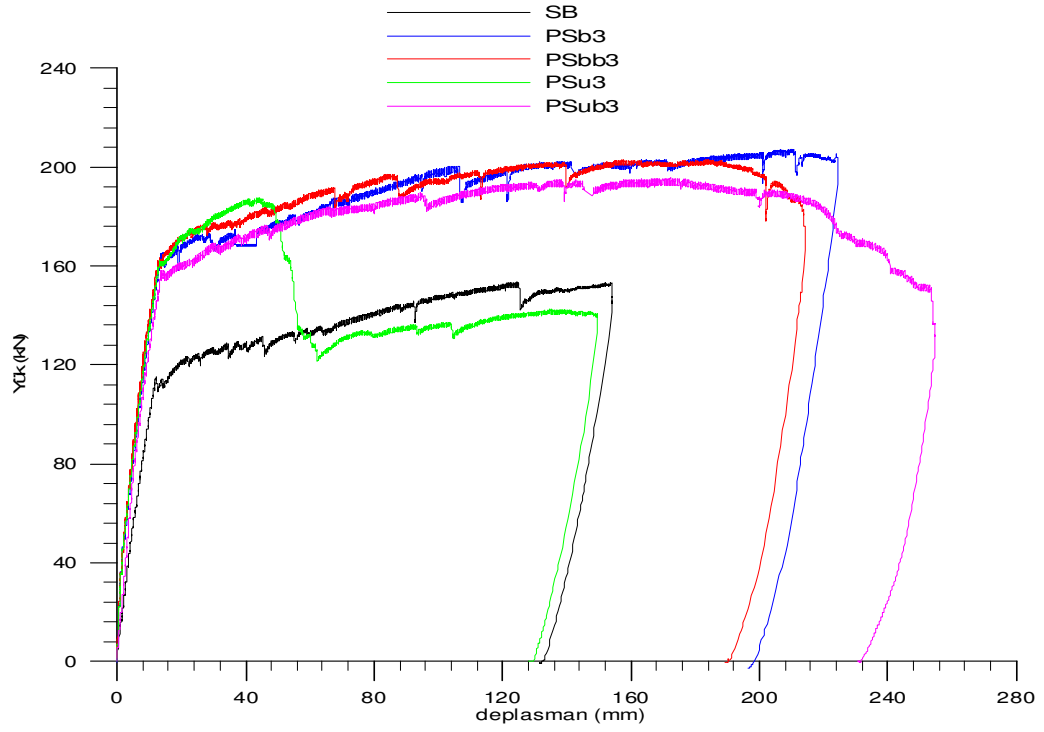
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Genel

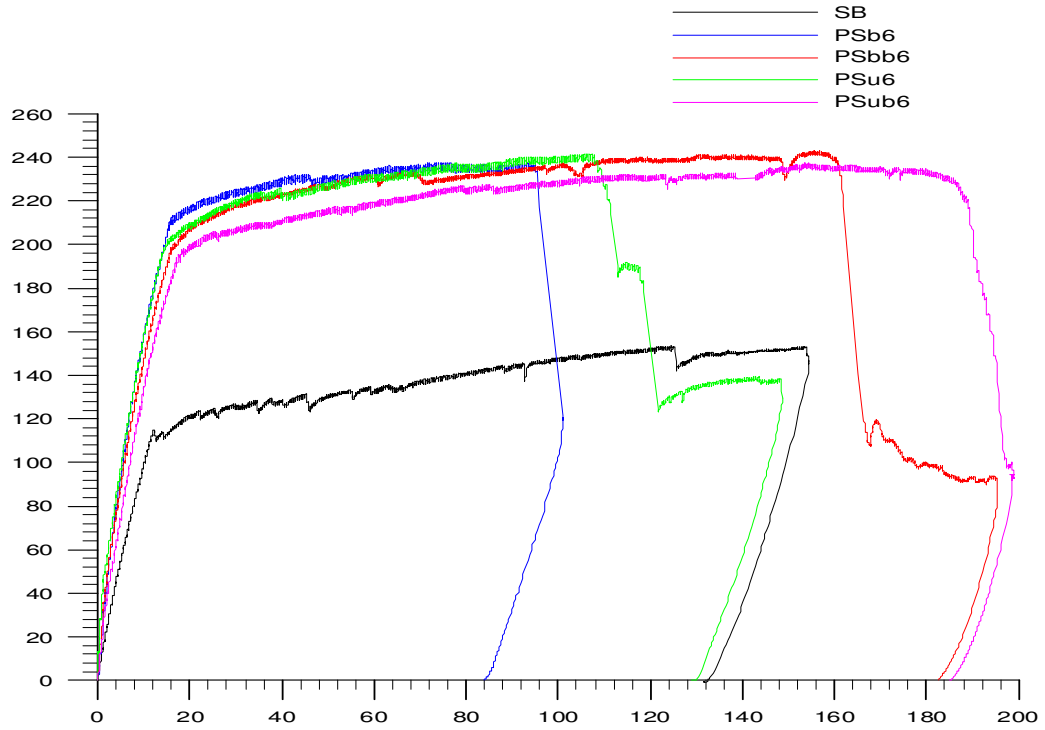
Bu bölümde, 4. bölümde anlatılan sistem ve yöntemlerle gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen bulguların; taşıma güçlerine, süneklik oranlarına, enerji tüketme yeteneklerine ve eğilme rijitliklerine göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirmede öncelikli olarak sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmış ve çizelgeler halinde sunulmuştur. İkinci aşama olarak sonuçlar Arslan'ın [1] çalışmasıyla karşılaştırılmış ve delikli ve deliksiz levhalarla güçlendirme uygulamaları değerlendirilmiştir.

5.2. Taşıma Gücü

3 mm'lik ve 6 mm'lik levhalar ile güçlendirilmiş elemanların yük-deplasman eğrileri üst üste çizilmiş ve Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir. Teorik olarak aynı kesit, donatı ve levha alanına sahip kirişlerin taşıma güçleri eşit olmasına rağmen deney sonrası ulaşılan taşıma güçlerinde küçük farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklılıklar uygulanan yöntemden kaynaklanmayıp, üretimin, öngörülen ile aynı olmamasından kaynaklanmıştır. Eşit kalınlıkta plak yapıştırılmış bütün elemanlarda donatı alanı aynı olmasına rağmen, pas paylarındaki farklılıklar elemanların taşıma güçlerindeki küçük değişikliklere neden olmuştur. Yerinde ölçülen pas payları ile hesaplanan taşıma güçlerinin, deneyden elde edilen taşıma güçleri ile büyük oranda örtüştüğü görülmüştür. Çizelge 5.1'de deneyden ve hesaptan elde edilen taşıma güçleri ve oranları verilmiştir. Bu çizelgeden de görüleceği gibi taşıma gücü oranları genellikle 1 civarındadır. Taşıma güçlerinde oluşan farkların yapıştırma yöntemi ile ilgisi olmayıp, boyuna donatı moment kollarındaki küçük farklardan kaynaklanmıştır. Bu nedenle tüm elemanlarda hedeflenen teorik taşıma güçlerine ulaşılmıştır. Alt yüzüne delikli levha yapıştırılmış betonarme kirişlerin taşıma gücü hesabının klasik yollarla hesaplanabileceği görülmüştür.



Şekil 5.1. 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği



Şekil 5.2. 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği

Çizelge 5.1. Deneyden ve hesaptan elde edilen taşıma güçleri ve oranları

Deney elemanı	Kiriş yüksekliği	d'	d	As ₁	As ₂	As _L	P _{y1}	P _{u1}	P _{y2}	P _{u2}	P _{y1} /P _{y2}	P _{u1} /P _{u2}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	Test (kN)		Hesap (kN)		Test/Hesap	Test/Hesap
Yalın (SB)	500	30	470	157	462	0	113	152	112	152	1,01	1,00
PSb3	500	30	470	157	462	360	165	204	167	204	0,99	1,00
PSb6	500	50	450	157	462	720	207	235	211	243	0,98	0,97
PSbb3	500	30	470	157	462	360	163	203	167	204	0,98	1,00
PSbb6	500	40	450	157	462	720	200	241	212	244	0,94	0,99
PSu3	500	30	470	157	462	360	162	----	167	204	0,97	-----
PSu6	500	40	460	157	462	720	202	240	214	248	0,94	0,97
PSub3	500	40	450	157	462	360	160	185	160	196	1,00	0,95
PSub6	500	50	450	157	462	720	195	235	211	243	0,93	0,97

Çizelge 5.1’de;

- d' : Basınç donatısının üst yüze mesafesi,
- d : Çekme donatısının üst yüze mesafesi,
- As_1 : Basınç donatısı alanı,
- As_2 : Çekme donatısı alanı,
- As_L : Delikli levha metalik alanı,
- P_y : Akma yükü,
- P_u : Maksimum yük olarak ifade edilmektedir.

5.3. Süneklik

Deney elemanlarının tümünün hedeflenen teorik dayanımlara ulaşmış olmasına rağmen, tartışılması gereken konu bu dayanımların ne kadar süre korunduğu yani elemanların ne kadar sünek davrandığıdır. Süneklik, dayanımda önemli bir kayıp olmaksızın deformasyon yapabilme yeteneği olduğu için süneklik oranı ulaşılan dayanımın ne kadar korunduğunun iyi bir göstergesi olacaktır. Bu oranın genellikle 4~5’den daha küçük olması istenmez. Bu çalışmada süneklik oranı ulaşılan en büyük yükün %15 dayanım kaybettiği noktadaki deplasman değerinin akma anındaki deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.2’de elemanların süneklik oranları ve SB elemanı süneklik oranı 1 kabul edilerek hesaplanan göreceli süneklik değerleri belirtilmiştir.

Çizelgede belirtilen değerler incelendiğinde sadece PSbb3, PSb3 ve PSub3 elemanının yalın kirişe oranla daha yüksek süneklik oranına sahip olduğu görülmektedir. Buna rağmen güçlendirilmiş elemanların süneklik bakımından yalın kiriş (SB) ile karşılaştırılması pek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. SB kirişinin çekme donatısı güçlendirilmiş kirişlerden daha az olduğu için bu kirişin daha sünek bir davranış göstermesi son derece olağandır. Bu nedenle güçlendirilmiş elemanlar kendi içlerinde karşılaştırılmalı ve ulaşılan süneklik oranlarının alt sınır olan 4~5 değerinden ne kadar daha büyük olduğudur.

Çizelge 5.2. Süneklik oranları

	Süneklik Oranı ($\delta u/\delta y$)	Göreceli Süneklik
SB	$\geq 16,8$	$\geq 1,00$
PSb3	$\geq 20,9$	$\geq 1,24$
PSb6	7,70	0,46
PSbb3	21,5	1,28
PSbb6	13,1	0,78
PSu3	4,80	0,29
PSu6	9,70	0,58
PSub3	20,2	1,20
PSub6	13,3	0,79

Genel olarak bakıldığında tüm elemanlarda süneklik oranlarının alt sınırı olan 4-5 değerinden çok daha büyük olduğu görülmektedir. En düşük süneklik oranı PSu3 elemanında 4,8 olarak gerçekleşmiştir. Bu nedenle taban levhası yan yüzlere 500 mm uzunluğundaki levhalar ile yapıştırılmıştır. Levhalar arası boşluklar yaklaşık 10 mm civarındadır. Bu nedenle taban levhasındaki deformasyonlar 10 mm'lik bu derzlerden birinin olduğu kesitte yoğunlaşmış ve taban levhası yeterince uzayamadan aynı kesitte kopmuştur. Görülen bu aksaklıktan sonra PSu6 elemanının orta bölgesindeki yan yüz levhaları 100'er mm'lik parçalara ayrılmıştır ve süneklik oranının 9,7'ye çıktığı görülmüştür. Uçlarından yan yüzlerinde iki adet levha bulunan ve bulonla desteklenmiş PSub3 ve yan yüzlerinde bir adet levha bulunan ve bulonla desteklenmiş PSub6 elemanlarında süneklik oranları daha da yüksek olmuştur. Bu nedenle taban levhalarının sadece uçlardan yan yüzlere tutturulduğu elemanların boydan boya yan yüzlerden tutturulan ya da yan yüzlerde daha uzun bir bölgede tutturulmuş elemanlardan daha sünek davrandığı belirgin olarak gözlenmiştir.

PSu3 elemanı dışındaki tüm 3 mm'lik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerin eşdeğeri 6 mm'lik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerden daha sünek davrandığı görülmektedir. Ancak bu çekme donatısı alanı daha küçük olan elemanların daha sünek davranmasının doğal bir sonucudur.

Alt yüze yapıştırılmış olan PSb3 elemanı deney sonuna kadar oldukça sünek davranmıştır. Eş değeri PSb6 elemanı ise akma deplasmanının yaklaşık 8 katı değere ulaştığında kiriş alt yüzünden ayrılarak yere düşmüştür. Buna rağmen ulaşılan süneklik oranı oldukça yeterlidir.

Deney sonrası yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler Çizelge 5.3'de sunulmuştur. SB elemanında herhangi bir levha takviyesi olmadığından çizelgede herhangi bir değeri mevcut değildir. PSu3 ve PSu6 elemanları için ise deney sonrası sağlıklı ölçümler alınması fiziksel nedenlerle mümkün olmamıştır.

Çizelge 5.3. Çelik levhalarda oluşan deplasman miktarları

a	b	c	d	e	f	g	h
SB	-----	---	----	---	----	-----	-----
PSb3	4093	93	194	6	221	17,5~18	14,4~15
PSb6	4035	35	199	1	130	17	15,5
PSbb3	4085	85	193	7	122	17,5~18	14,5
PSbb6	4058	58	197	3	237	17,2	14,5
PSub3	4094	94	194	6	178	18	14,5
PSub6	4040	40	194	6	148	18	14
PSu3	4020	20	----	---	----	-----	-----
PSu6	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Çizelgede;

a: Deney Elemanı

b: Uzamış levha boyu (mm)

c: Levha boyundaki toplam uzama (mm)

d: Kısalmış levha eni (maksimum daralmanın olduğu yerde) (mm)

e: Levhanın enindeki maksimum daralma (mm)

f: Levha enindeki daralma bölgesinin uzunluğu (mm)

g: Delik çapının uzama yönündeki boyu (mm), (İlk çap=16 mm)

h: Delik çapının daralma yönündeki boyu (mm), (İlk çap=16 mm)

olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 5.3'e göre levhaların deliklerinin deformasyon yetenekleri karşılaştırıldığında, 3 mm'lik levhaların deliklerinin genellikle daha fazla deformasyon yapabildikleri görülmüştür. Levha uzamaları karşılaştırıldığında ise; aynı şekilde 3 mm'lik levhaların (PSu3 hariç), 6 mm'lik levhalardan yaklaşık iki kat daha fazla uzayabildikleri görülmüştür. Bu özellikleri ile 3 mm'lik levhalar 6 mm'liklere göre daha sünek davranış göstermektedirler. Düz levhalara göre daha sünek bir davranış elde edebilmek için kullanılan delikli saçların oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Levha üzerindeki delikler ovalleşerek levhanın daha fazla deformasyon yapmasına, dolayısıyla daha sünek davranmasına neden olmuştur.

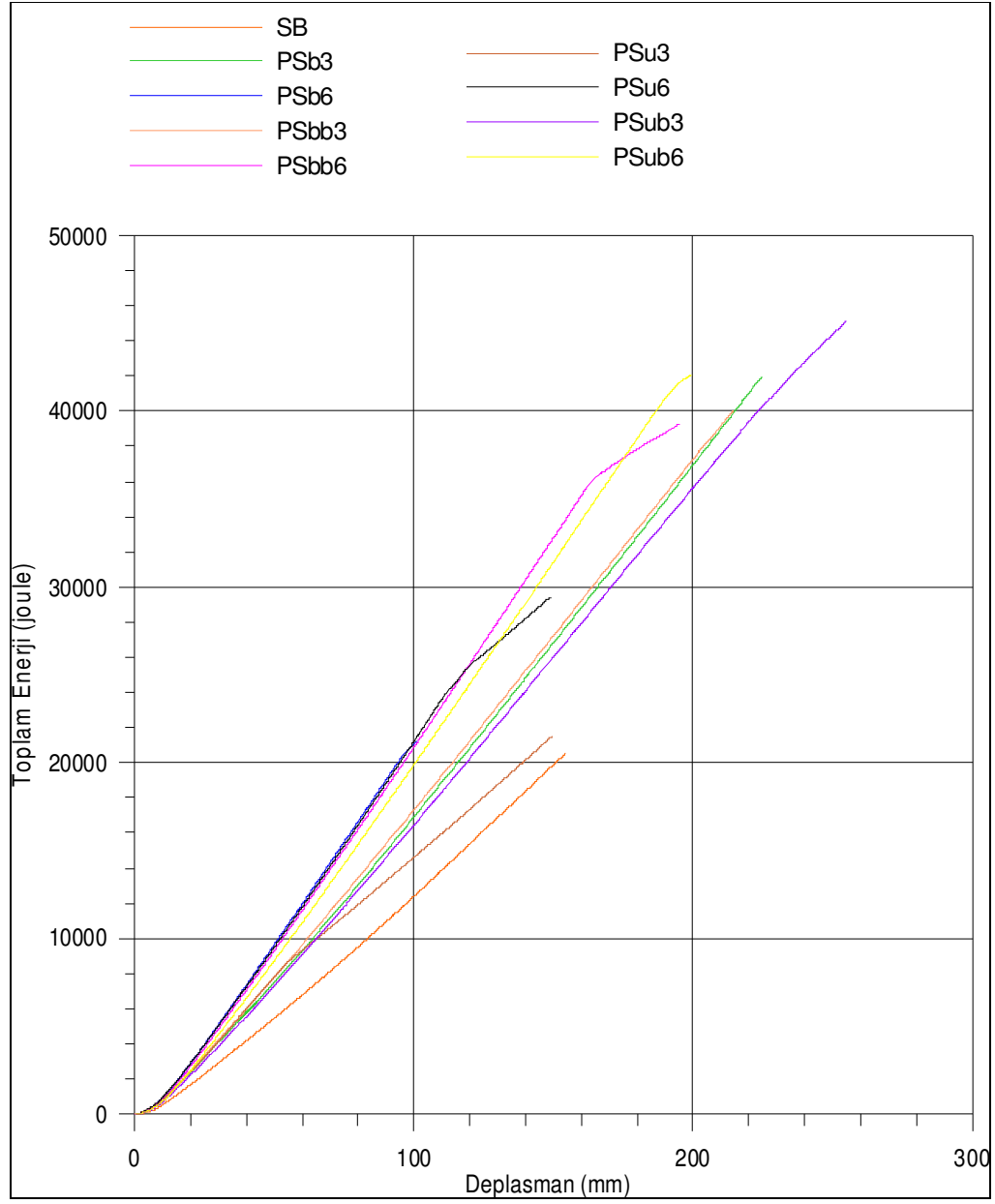
5.4. Enerji Tüketimi

Dış yükler altında betonarme taşıyıcı bir sistem elastik bölgede kalıyorsa bu sistem dış yükler tarafından kendine verilen enerjiyi geri iletebilmektedir. Böyle bir durum, ancak deprem etkisinin küçük olduğu zamanlarda veya yapının özellikle elastik bölgede kalacak şekilde tasarlanması genellikle ekonomik olmaz. Bu nedenle ekonomik bir tasarım için büyük yükler altında taşıyıcı sistemin üzerindeki enerjinin bir kısmını başka enerjilere dönüştürebilmesi istenir. Enerjinin dönüştürülebilir kısmına tüketilen enerji denir. Betonarme taşıyıcılar bazı kurallara uyularak yapıldığında elasto-

plastik bir davranış gösterirler. Böyle bir sistem üzerine gelen enerjinin bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürerek tüketir. Dönüştürülen enerji plastik bölgenin uzunluğu ile genellikle doğru orantılıdır. Bu nedenle taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketebilme kapasiteleri oldukça önemlidir. Elastik bölge geçildikten sonra herhangi bir andaki sistemin toplam enerjisi, tüketilen enerji ile geri iletilebilen enerjinin toplamına eşittir. Ancak elemanların çoğunda geri verilen enerjinin doğru bir şekilde hesaplanamayacağı anlaşıldığından kıyaslamalar tüketilen enerji yerine toplam enerji üzerinden yapılmıştır. Bilindiği gibi enerji yapılan işe, iş ise kuvvet ile ilk konuma göre kat edilen yolun çarpımına eşittir. Bu tanımdan yola çıkarak deney elemanlarının toplam enerji kapasiteleri elemanlara ait yük deplasman eğrisinin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır. Bu alan tüm elemanlarda dayanımda önemli kayıpların oluşmaya başladığı deplasman değerinin solunda kalan alandan joule cinsinden hesaplanmış ve Şekil 5.4'de topluca sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Toplam enerji oranları

	Toplam Enerji (Joule)	Toplam Enerji Oranı
SB	20.536	1,00
PSb3	41.968	2,04
PSb6	21.244	1,03
PSbb3	39.997	1,95
PSbb6	39.293	1,91
PSu3	21.529	1,05
PSu6	29.408	1,43
PSub3	45.089	2,20
PSub6	42.022	2,05



Şekil 5.2. Deney elemanlarının toplam enerji-deplasman grafiği

Buna göre SB referans kirişinin toplam enerji tüketimi 1 birim olarak kabul edilip diğer elemanların enerji tüketme kapasiteleri oransal olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde PSub3-PSub6-PSb3-PSbb3-PSbb6 elemanlarının SB elemanının yaklaşık iki katı enerji tüketme kapasitesine ulaştıkları görülmüştür. PSu6 elemanında ilk grup kadar yüksek olmasa da SB elemanına nazaran daha fazla enerji tüketebildiği belirlenmiştir. PSu3 ve PSb6 elemanlarının enerji tüketme kapasitelerinin ise SB elemanına çok yakın olduğu görülmüştür.

Yapılan güçlendirmelerde 3 mm'lik ve 6 mm'lik çelik levhalarla takviye edilmiş elemanların kendi aralarındaki (PSb3-PSb6; PSbb3-PSbb6; PSu3-PSu6; PSub3-PSub6) enerji tüketim oranları kıyaslandığında, PSu3 elemanındaki sistematik hata göz ardı edildiğinde, 3 mm'lik levhalarla takviye edilen elemanların 6 mm'lik levhalarla takviye edilenlere nazaran daha sünek davrandığı gibi daha fazla enerji tükettiği de tespit edilmiştir.

PSu3 ve PSbb6 elemanlarının grafiklerindeki ani eğim değişiklikleri Bölüm 5.3'te belirtilen P- δ grafiklerindeki ani yük kayıplarından kaynaklanmaktadır.

5.5. Eğilme Rijitliği

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

bir karşılaştırma yapılacağı düşünüldüğünde yapılan kabul bir sakınca yaratmayacaktır.

Çizelge 5.5. Rijitlik oranları

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

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

Çizelgede belirtilen değerler incelendiğinde tüm elemanların yalın kirişe oranla daha rijit davrandıkları görülmektedir. PSu6, PSbb3 ve PSb6 elemanları, diğer elemanlara nazaran daha rijit olarak tesbit edilmiştir. Güçlendirilmiş elemanlardan en az rijitliğe sahip olan eleman PSub6 kirişi bile yalın kirişe göre rijitlikte yaklaşık %20'lik bir fazlalık göstermektedir.

5.6. Arslan'ın[1] Çalışmasıyla Karşılaştırma

Epoksi ile yapıştırılan delikli çelik plaklarla kiriş güçlendirilmesinin araştırıldığı çalışma, Arslan'ın [1] deliksiz çelik plakalarla yapmış olduğu çalışma ile karşılaştırılarak çelik plakaların deliksiz veya delikli olmasının güçlendirme üzerine etkisi incelenmiştir.

Arslan'ın çalışmasında kullanılan modeller ile bu çalışmadaki modeller farklı ölçekli elemanlar olduğundan taşıma gücü açısından kıyaslama yapılması anlamlı olmayacaktır. Bu nedenle sadece oransal bir değer olarak süneklik oranları karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.6'da Arslan'ın çalışmasındaki modellerden bir kısmının süneklik oranları, yine aynı çalışmadaki Çizelge 5'den alınarak aşağıda sunulmuştur. Elemanlar özellikleri için Bölüm 3'e ya da orijinal kaynağa bakılmalıdır.

Çizelge 5.6 Arslan'ın çalışmasındaki rijitlik oranları

	Süneklik Oranı ($\delta u/\delta y$)
GUB	0
GUK	2,54
GUE	2,40
GUD	2,60
GUD'	0

Bu çizelgede,

GUB: Levha uzun ve ince, yüksüz ve başlıksız

GUK: Levha uzun ve ince, yüksüz uçları boyuna donatıya kaynaklı

GUE: Levha uzun ve ince, yüksüz uçları yan yüzlere eğik başlıklarla yapıştırılmış

GUD: Levha uzun ve ince, yüksüz uçları yan yüzlere dik başlıklarla yapıştırılmış

GUD': Levha uzun ve kalın, yüksüz ve başlıklı elemanlardır.

Çizelge 5.2’de sunulan bu çalışmanın elemanlarının süneklik oranları Çizelge 5.6’da sunulan Arslan’ın çalışmasındaki süneklik oranları ile karşılaştırıldığında; delikli çelik plakalarla yapılan güçlendirmelerin süneklik bakımından en kötü elemanının (PSu3) süneklik oranı bile, Arslan’ın çalışmasındaki en büyük süneklik oranına sahip elemanına (GUD) göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Daha da ilginç delikli çelik levhalar ile yapılan güçlendirmelerde, uçlarında ve altında hiçbir önlem alınmamış elemanların bile, Arslan’ın çalışmasında uçları en iyi şekilde bağlanmış elemanlarda çok daha sünek davrandığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre delikli çelik levhaların, amaçlanan süneklik düzeyini oldukça başarılı bir şekilde yükselttiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin, düz çelik levhalar yapıştırılarak güçlendirilmesi sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda bu yöntem ile güçlendirilmiş kirişlerde yeterli dayanıma ulaşılmasına rağmen kirişlerin süneklik kapasitesinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Ayrıca bu teknikte yapıştırma kalitesinin denetimi de oldukça zor olmaktadır. Çelik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerin süneklik kapasitesini arttırmak için delikli çelik levha kullanımının uygun olacağı düşünülmüş ve bu kapsamda deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 1/1 ölçekli toplam 9 deney elemanı test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Bu sonuçların laboratuvar şartlarındaki sınırlı sayıda deneyden elde edildiği ve delikli levhalar ile yapılan güçlendirme yönteminin ilk uygulamaları olduğu unutulmamalıdır.

1) Delikli çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında, dayanım ve rijitliğin yanı sıra yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır.

2) Güçlendirmede delikli çelik levha kullanılmasıyla delikler ovalleşerek daha fazla deformasyona izin vermiş buna bağlı olarak da süneklik kapasitelerinde düz levhalara göre belirgin ve yeterli artışlar gerçekleşmiştir. Bu anlamda çalışmanın planlama aşamasındaki, delikli levhaların daha sünek olabileceği öngörüsü gerçekleşmiştir.

3) Yapıştırma aşamasında delikli çelik levhanın deliklerinden epoksi yapıştırıcının dağılımı ve kalınlığı gözlenebilmiş ve bu sayede yapışma kalitesi kontrol edilebilmiştir. Ayrıca epoksinin delik iç yüzeylerine mekanik olarak yaslanması ile epoksi ile saç yüzey arasındaki yük aktarımının daha etkili olduğu görülmüştür. Benzeri çalışmalarda bölgesel de olsa epoksinin özellikle parlak yüzeyli düz levha yüzeylerinden ayrılabilceği görülmüştür. Delikli levhalarda bu sorun daha az yaşanmıştır.

4) Delikli levha enkesitindeki metalik alan ile yapışma yüzeyine iletilen kuvvet doğru orantılı olduğundan, levha kalınlığının süneklik kapasitesini belirgin şekilde etkilediği görülmüştür. Deneylerde kalın levhalı elemanlar, ince levhalı elemanlardan daha az bir süneklik göstermiştir. Buna rağmen kalın levhalı elemanlarda levha ile birlikte sağlanan çekme donatısı oranının TS500'de izin verilen maksimum donatı oranına ($0.85p_b$) yaklaşık eşit olduğu ve bu durumda bile elde edile en küçük süneklik oranının 8 civarında olduğu görülmüştür. Betonarme sünek kirişlerde, kabul edilebilir en küçük süneklik oranının 4–5 civarında olduğu göz önüne alındığında maksimum donatı oranına yakın kirişlerde ulaşılan bu süneklik oranlarının oldukça yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

5) Tüm elemanlarda hedeflenen teorik taşıma güçlerine ulaşılmıştır. Alt yüzüne delikli çelik levha yapıştırılmış betonarme kirişlerin taşıma gücü hesaplarının betonarmede monolitik kirişler için uygulanan taşıma gücü yöntemi ile hesaplanabileceği görülmüştür.

6) Tüm elemanlarda yeterli bir eğilme rijitliği elde edilmiştir. Beklendiği gibi kalın levhalı elemanlarda daha büyük rijitlikler elde edilmiştir.

7) Tüm elemanlarda yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmış olmasına rağmen, süneklik kapasitesini garanti altına almak için levhaların alt veya yan yüzlerden bulonlarla desteklenmesinin oldukça faydalı olduğu ve bunun süneklik kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Özellikle kalın levhalı elemanlarda bulonlarla desteklenmiş elemanların, bulonsuz elemanlara göre çok daha fazla sünek davrandıkları görülmüştür. Bulon uygulamalarında dübel çapı (bulon yuvası) ile levhadaki delik çapı eşit olmalı ve dübel en fazla levha yüzeyine kadar çakılmalıdır. Bulonlar 8,8 kalitesindeki çelikten olmalı ve bulonlara eksenel yöndeki akma dayanımının yarısı kadar artgerme kuvveti verilmelidir. Bu amaçla uygun tork anahtarları kullanılabilir.

8) Alt yüze yapıştırılan levhanın yan yüz levhaları ile desteklenmesinin de süneklik kapasitesini arttırmada etkili olabileceği görülmüştür. Ancak kullanılan yan yüz levha sayısı ile derz sayı ve aralığının çok önemli olduğu ve davranışı olumlu veya olumsuz yönlerde etkileyebileceği gözlenmiştir. Beklenenin tersine kiriş yan yüzünde boydan boya yan yüz levhası kullanılması süneklik kapasitesini önemli ölçüde düşürmüştür. Bu elemanlarda levhada oluşan uzama deformasyonları derz civarlarında yoğunlaşmış ve buna bağlı olarak levhalar erkenden koparak kirişler gevrek bir şekilde kırılmıştır. Süneklik kapasitesini arttırmak için yan yüz levhalarında oluşturulan derz sayısının artırılması da ancak bir ölçüde başarılı olmuştur. Yan yüz levhalarının kullanılması durumunda levhaların sadece uçlarda oluşturulması ve mutlaka bulonlarla desteklenmesi önerilmektedir. Bu durumda yan yüz levhalarında da epoksi kullanılmamış olsa bile iyi bir davranış elde edilebilmiştir. Yan yüz levha boylarının en az kiriş yüksekliği kadar, en fazla da serbest açıklığın $\frac{1}{4}$ ü kadar yapılması önerilmektedir. Bu elemanların her bir ucunda kullanılacak bulon sayısının, kesmeye çalışan dübel alanı (bulon + bulon yuvası alanı) ile alt yüze yapıştırılan levha alanının eşitlenerek bulunması önerilmektedir.

9) Güçlendirme işleminde kullanılacak delikli çelik levhaların hatasız zımbalanmış olması gerekmektedir. Bazı deney elemanlarında hatalı zımbalanmış elemanlar kullanıldığı için levhalar erkenden kopmuş ve kiriş gevrek bir şekilde kırılmıştır. Bu elemanlarda deney tekrarı yapılmıştır.

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

KAYNAKLAR

1. Arslan, M., "Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-69 (1991).
2. Li, G., John, M., Maricherla, D., "Experimental study of hybrid composite beams", **Construction and Building Materials**, 20, 311-319, (2006).
3. Wang, Y. C., "Analytical and experimental study on seismic performance of RC T-beams with design deficiency in steel bar curtailment ", **Engineering Structures**, 25, 215-227, (2003).
4. Ali, M.S.M., Oehlers, D.J., Park, S.M., "Comparision between FRP and steel plating of reinforced concrete beams", **Composites**, Part A, 32, 1319-1328, (2001).
5. Gülenler, C., "Betonarme elemanların polimer yapıştırıcı kullanarak çelik levhalarla takviyesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 9-21, (1977).
6. Alfaiate, J., Appleton, J., "External reinforcement with steel plates and injected epoxy on concrete beams", **CMEST**, Lisbon, 4-16, (1986).
7. Barnes, R.A., Mays, G.C., "Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates", **Construction and Building Materials**, 20, 396-411, (2006).
8. 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).
9. Kankam, C. K., "Structural behaviour of bolted end-plated reinforced concrete beams", **Materials and Design**, 24, 367-375, (2003).
10. Altın, S., Anıl, Ö., Kara, M.E., "Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates", **Engineering Structures**, 27, 781-791, (2005).
11. Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Sano, M., "Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beams wabs, experiments and analysis", **Construction and Building Materials**, 14, 237-244, (2000).
12. 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).

13. Ünsal, T.Ç., “Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 16-28, (1989).
14. Çelikel, T.F., “Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yinelenir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 19-24, (1991).
15. Özdemir, İ., “Onarılmış betonarme kirişlerin tersinir yük altında davranış ve dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 18-27, (1994).
16. Altun, F., “An experimental study of the jacketed reinforced concrete beams under bending”, **Construction and Building Materials**, 18, 611-618, (2004).
17. Aykaç, S., “Onarılmış/Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deprem davranışı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-54, (2001).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UYSAL, Ali
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.08.1969; Çankırı
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 251 55 38
 Faks :
 e-mail : aliuysal196@hotmail.com.

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Mühendislik Bölümü	1992
Lise	Jandarma Astsubay Hazırlama Okulu	1988

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

1992-2006	Jandarma Genel Komutanlığı	İnşaat Subayı
-----------	-------------------------------	---------------

Yabancı Dil

Fransızca

Hobiler

Müzik, Spor