

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi

Sabahattin AYKAÇ*
Eray ÖZBEK**

ÖZ

Betonarme kirişlerin alt yüzüne çelik levha yapıştırarak eğilmeye karşı güçlendirilmesi sıkça uygulanan bir yöntemdir. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmalarda önemli süneklik sorunlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada aynı yöntem ile güçlendirilmiş kirişlerde dayanımın yanı sıra yeterli bir süneklik kapasitesine ulaşılması için basit ve uygulanabilir bir uç bağlantısı geliştirilmiştir. Deneysel olarak yürütülen çalışmada ikisi karşılaştırma kirişi olmak üzere toplam sekiz adet 1/1 ölçekli betonarme kiriş hazırlanmış ve test edilmiştir. Üç kiriş sadece eğilmeye karşı, diğer üç kiriş ise hem eğilmeye hem de kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deneylede güçlendirme sonrası dayanım yaklaşık iki buçuk kat artmış olmasına rağmen elemanların son derece sünek davrandığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Betonarme kiriş, onarım, güçlendirme, çelik levha

ABSTRACT

Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams with Steel Plates

Bonding of steel plates to the bottom surface of reinforced concrete beams is a common technique of strengthening against bending. However, in the studies carried out up to date, significant ductility related problems have been observed. In this study, a simple and practical end connection has been developed that enables the beams strengthened by this approach to reach adequate ductility capacity in addition to the strength. In this experimental study, a total of eight beams scaled 1/1, have been prepared and tested two of which were used as reference beams. Of the remaining six specimens, three beams were strengthened solely against bending while the last three were strengthened against both shear and bending. Despite an approximate increase of two and half times in strength, the beams were observed to behave in a quite ductile manner.

Keywords: Reinforced beam, repair, strengthening, steel plate

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 06.05.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - saykac@gazi.edu.tr

** Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - erayozbek@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda, çeşitli nedenlerle kirişlerin güçlendirilmesi sıklıkla gündeme gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda başvurulacak çeşitli güçlendirme yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları, kiriş alt yüzüne içinde yeni boyuna donatı bulunan betonarme bir katman eklenmesi veya kirişlerin karbon lifli kumaşlarla güçlendirilmesidir. İlk yöntemden yeterince iyi sonuçlar alınmış olmasına rağmen uygulama sırasında çeşitli zorluklar yaşanmaktadır [1]. İkinci yöntemde ise oldukça önemli süneklik problemleri oluşabilmektedir [2-7]. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise, karbon kumaş yerine, çelik levha kullanılmasıdır. Bu konuda yapılmış öncü çalışmalardan biri [8-9] numaralı kaynaklarda verilmiştir. Konuyla ilgili diğer bazı önemli çalışmalar da vardır, [10-15]. Ancak çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerde de önemli süneklik sorunları ortaya çıktığı görülmüştür. Yapılmış olan çalışmaların birçoğunda çelik levhalar için önerilen uç bağlantılarının levhadaki yükü kiriş uçlarına aktarmada yetersiz kaldığı ve ilerleyen yük aşamalarında levha ucunun kirişten aniden ayrılarak gevrek bir şekilde kırıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin levha ucu ile ilgili bu bağlantı sorununun aşılması ve dayanımın yanı sıra yeterli bir süneklik kapasitesine ulaşılabilmesi için bir dizi deney yapılmıştır. Çalışma, esas olarak levhadaki gerilmeleri uygun bir biçimde kirişe aktaracak düzenlemeler üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bunun için yaklaşık otuz adet deney elemanı hazırlanıp test edilmiş ve levha ile kiriş arasındaki yük aktarımını sağlamaya yönelik birçok kenetleme yöntemi araştırılmıştır [12-14]. Çalışmanın sonunda hem basit, hem de kolay uygulanabilir bir uç bağlantısı geliştirilmiştir. Geliştirme sürecinde yapılmış olan deneylerin sadece sekizinden burada bahsedilmiştir. Bu deneyler hedeflenen davranışı veren uç bağlantısı ile üretilmiş elemanlara aittir.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Betonarme kirişlerin alt yüzüne çelik levha yapıştırarak eğilmeye karşı güçlendirilmesi sıkça uygulanan bir yöntemdir. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmalarda önemli süneklik sorunlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmanın amacı geçmiş yıllarda yapılmış olan deneylerin tekrarı olmayıp çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin sünek bir davranış göstermesi için gerekli önlemlerin araştırılıp ortaya konmasıdır. Bunun için yeni bir uç bağlantı detayı geliştirilmiş ve test edilmiştir. Çalışma uzun bir deney dizisinin son kısmından oluşmaktadır. İkisi referans olmak üzere toplam 8 adet 1/1 ölçekli betonarme kiriş üretilip test edilmiştir. Güçlü kiriş-zayıf kolon birleşiminden kaçınmak için kirişlerin sadece açıklık bölgesi güçlendirilmiş ve tekdüze yükler altında test edilmiştir. Güçlendirme yönteminin etkinliği araştırılırken; yetersiz dayanım türü (kesme ve/veya eğilme), kiriş üst yüzünde basınç levhası olup olmayacağı, levhanın kirişe kenetlenme türü (epoksili veya epoksisiz) ve kesmeye karşı önlem alınıp alınmadığı, parametre olarak ele alınmıştır. En iyi levha uç bağlantı detayı, bu çalışmanın ilk kısımlarında belirlenmiş olduğundan, parametre olarak ele alınmamış ve tüm elemanlarda aynı uç bağlantısı kullanılmıştır. Kiriş alt yüzüne yapıştırılan levha alanı da parametre olarak ele alınmamış tüm kirişlerde sabit tutulmuştur. Ancak levhada ve kirişte olası en büyük zorlamaların oluşması için, yönetmeliğin izin verdiği en büyük donatı oranına yakın bir levha alanı seçilmiştir, (Levha+boyuna donatı için $\rho \approx 0.02$).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

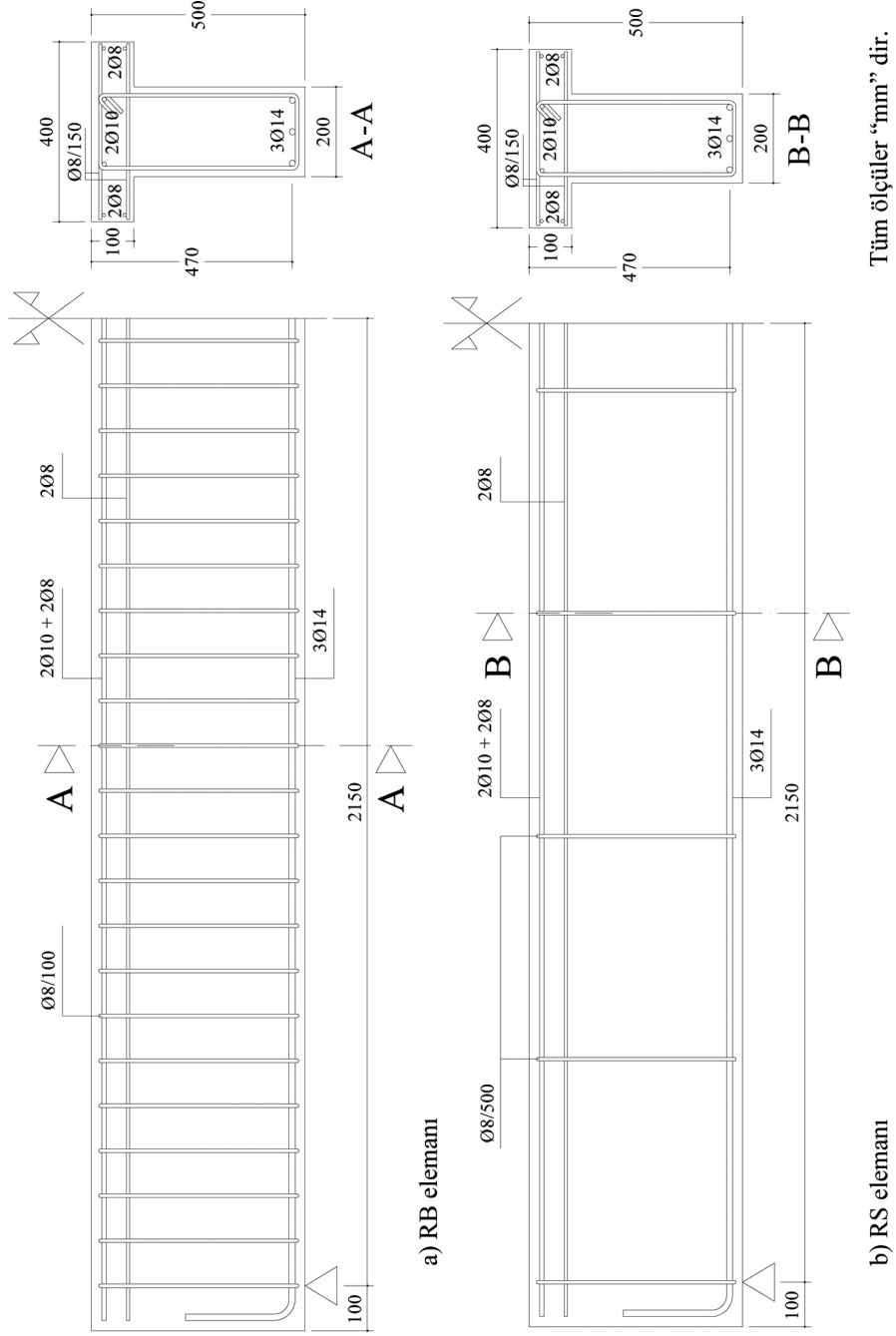
3.1. Deney Elamanları ve Güçlendirme İlkeleri

Olabildiğince gerçeği yansıtması için deney elemanı ölçeğinin 1/1 olmasına karar verilmiştir. Referans olarak 200 mm eninde, 500 mm yüksekliğinde ve 4.5 m boyunda betonarme T-kesitli bir kiriş ele alınmıştır. Tabla kalınlığı 100 mm ve tabla genişliği 400 mm olup gerçekte bu değer etkili tabla genişliğinden çok küçüktür. Ancak çalışmada T-kesit kullanılmasının gerçek amacı, güçlendirme işlemlerinin tablaya rağmen nasıl yapılacağına cevap bulmak olduğundan, bu genişlik ile yetinilmiştir. Tüm kirişlerin çekme bölgesinde 3 ϕ 14, basınç bölgesinde ise 2 ϕ 10+4 ϕ 8 boyuna donatı kullanılmıştır. ϕ 8 lik donatılar döşemenin kiriş doğrultusundaki boyuna donatıları olup tablanın dört köşesine yerleştirilmiştir. Ayrıca kiriş eksenine dik doğrultudaki tabla donatısı alt yüzde ϕ 8/300 mm, üst yüzde ise ϕ 8/150 mm olarak seçilmiştir. Sadece eğilmeye karşı güçlendirilen kirişlerde herhangi bir kesme sorunu oluşmaması için kiriş boyunca ϕ 8/100 mm etriye kullanılmıştır. Eğilmenin yanı sıra kesmeye karşı da güçlendirilecek kirişlerde ise ϕ 8/500 mm etriye kullanılmıştır. Tüm donatılar S420 çeliğinden seçilmiştir. Çizelge 1. de deney elemanlarının özellikleri topluca verilmiştir. Çizelgede yer alan RB ve RS elemanları referans kirişlerdir. RB sadece eğilme dayanımı, RS ise hem eğilme hem de kesme dayanımı yetersiz olan bir kirişi temsil etmektedir. RB ve RS elemanlarında, sırasıyla kiriş boyunca ϕ 8/100 ve ϕ 8/500 mm etriye kullanılmıştır, Şekil 1. Çizelgedeki S-elemanları güçlendirilmiş kirişlerdir. S4 ve S6 dışındaki tüm elemanlar sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. S4 ve S6 elemanları ise eğilmenin yanı sıra kesmeye karşı da güçlendirilmiştir. Sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiş S1 ve S5 elemanlarında güçlendirme, bu elemanların alt yüzüne çelik levha yapıştırılarak yapılmıştır, Şekil 2a. S2 ve S3 elemanları da sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Ancak bu elemanların güçlendirilmesi hem çekme hem de basınç yüzüne çelik levha eklenerek yapılmıştır. S2 elemanında levha ile kiriş arasında epoksi yapıştırıcı kullanılmamıştır, Şekil 2b. S4 ve S6 elemanları ise hem eğilmeye hem de kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirmede, [16] de önerilen yönteminin bir benzeri tercih edilmiştir. S4'ün eğilmeye karşı güçlendirmesi S1'deki gibidir. S6'nın eğilmeye karşı güçlendirmesi ise S3'deki gibidir, Şekil 3.

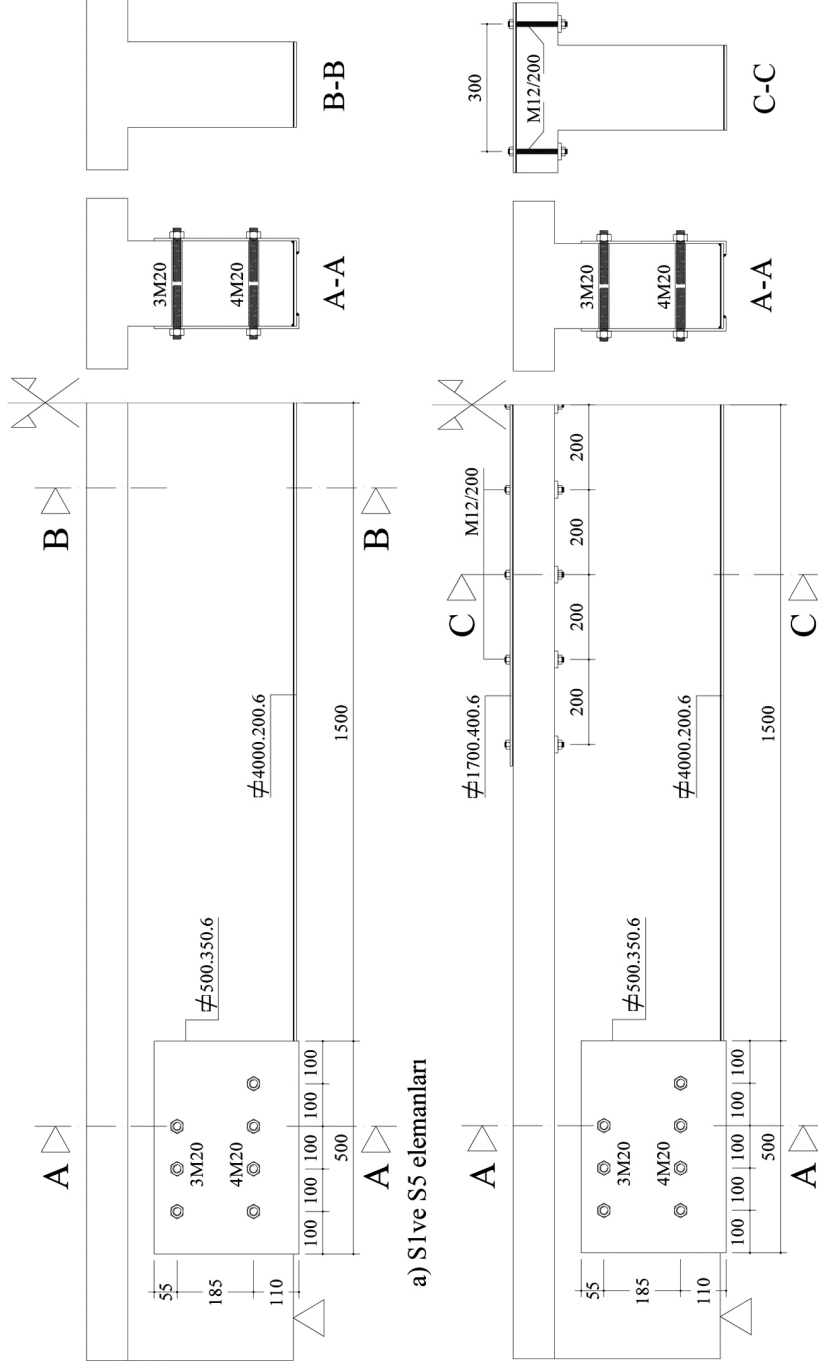
Çizelge 1. Deney elemanlarının özellikleri

Eleman adı	Yetersiz dayanım türü	Çelik levha kalınlığı	Kesmeye karşı güçlendirme	Levha uygulama metodu
RB	Eğilme	---	---	---
RS	Eğilme+Kesme	---	Yok	---
S1	Eğilme	6 mm	---	Alt yüze epoksiyle
S2	Eğilme	6 mm	---	Alt ve üst yüze epoksisiz
S3	Eğilme	6 mm	---	Alt ve üst yüze epoksiyle
S4	Eğilme+Kesme	6 mm	Var	Alt yüze epoksiyle
S5	Eğilme+Kesme	6 mm	Yok	Alt yüze epoksiyle
S6	Eğilme+Kesme	6 mm	Var	Alt ve üst yüze epoksiyle

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi



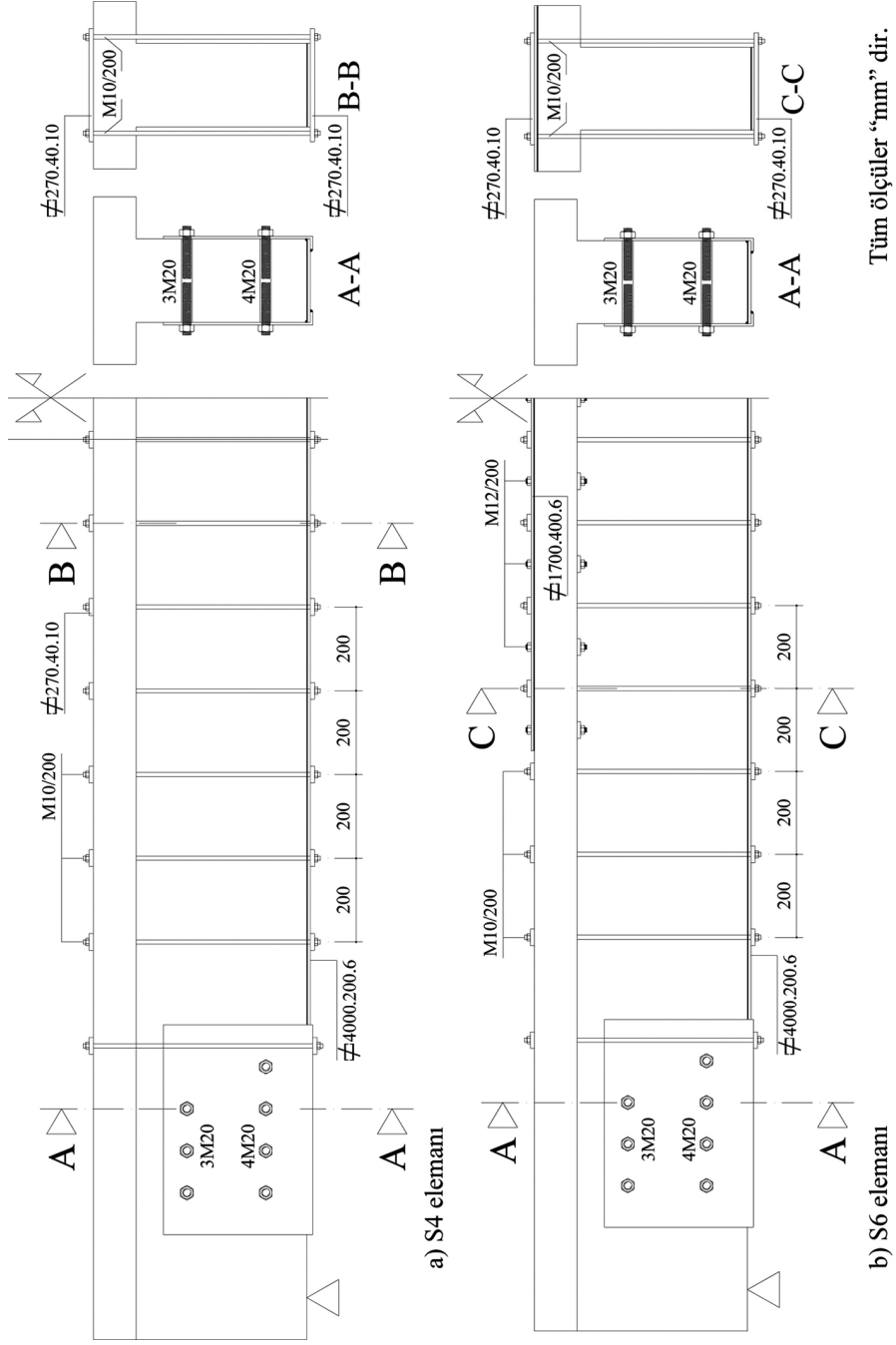
Şekil 1. RB ve RS elemanlarının detayı



Tüm ölçüler "mm" dir.

Şekil 2. S1, S5, S2 ve S3 elemanlarının detayı

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi



Şekil 3. S4 ve S6 elemanlarının detayı

Çekme yüzündeki levhalar kiriş alt yüzüne epoksi ile yapıştırılmıştır (S2 hariç). Ayrıca tüm çekme levhalarının uçları kiriş yan yüzüne, Şekil 2 ve 3 deki gibi, 7M20'lik bulonlarla tutturulmuştur. Bulonlar kiriş yan yüzüne epoksi ile ankre edilmiştir. Ankraj derinliği kiriş genişliğinin yarısına eşit tutulmuştur. Bulon sayısı çelik levhada olabilecek en büyük kuvveti taşıyacak şekilde belirlenmiştir. Bulon sayısı hesaplanırken çelik levha ile beton yüzey arasındaki yapışma kuvvetleri ile sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Bu yaklaşımın oldukça yerinde olduğu deneyler sırasında da gözlenmiştir. Yük altında levha ile beton yüzey arasındaki aderans kuvvetleri, kiriş ortasından başlayarak uçlara doğru yavaş yavaş yok olmuş ve deneylerin ilerleyen aşamalarında tüm yükün bulonlara aktarıldığı gözlenmiştir. Bulon somunları sıfır tork ile sıkılmıştır. Güçlendirme işlemi yapılmış tüm elemanların çekme levhasında aynı uç detayı kullanılmıştır.

Daha iyi bir süneklik elde etmek için bazı elemanların basınç yüzüne de çelik levha koyulmuştur. Çelik levhanın eni tabla genişliğine eşit ve 400 mm, kalınlığı çekme levhasına eşit ve 6 mm, boyu ise 1.70 m olarak seçilmiştir (moment sıfır noktaları arasındaki mesafenin %80'i). İlerleyen yük aşamalarında basınç levhasının yüzeyden ayrılıp burkulmasını önlemek için, basınç levhası, kirişin iki tarafından tablaya M12/200 mm lik bulonlarla bağlanmıştır, Şekil 2b. ve Şekil 3b.

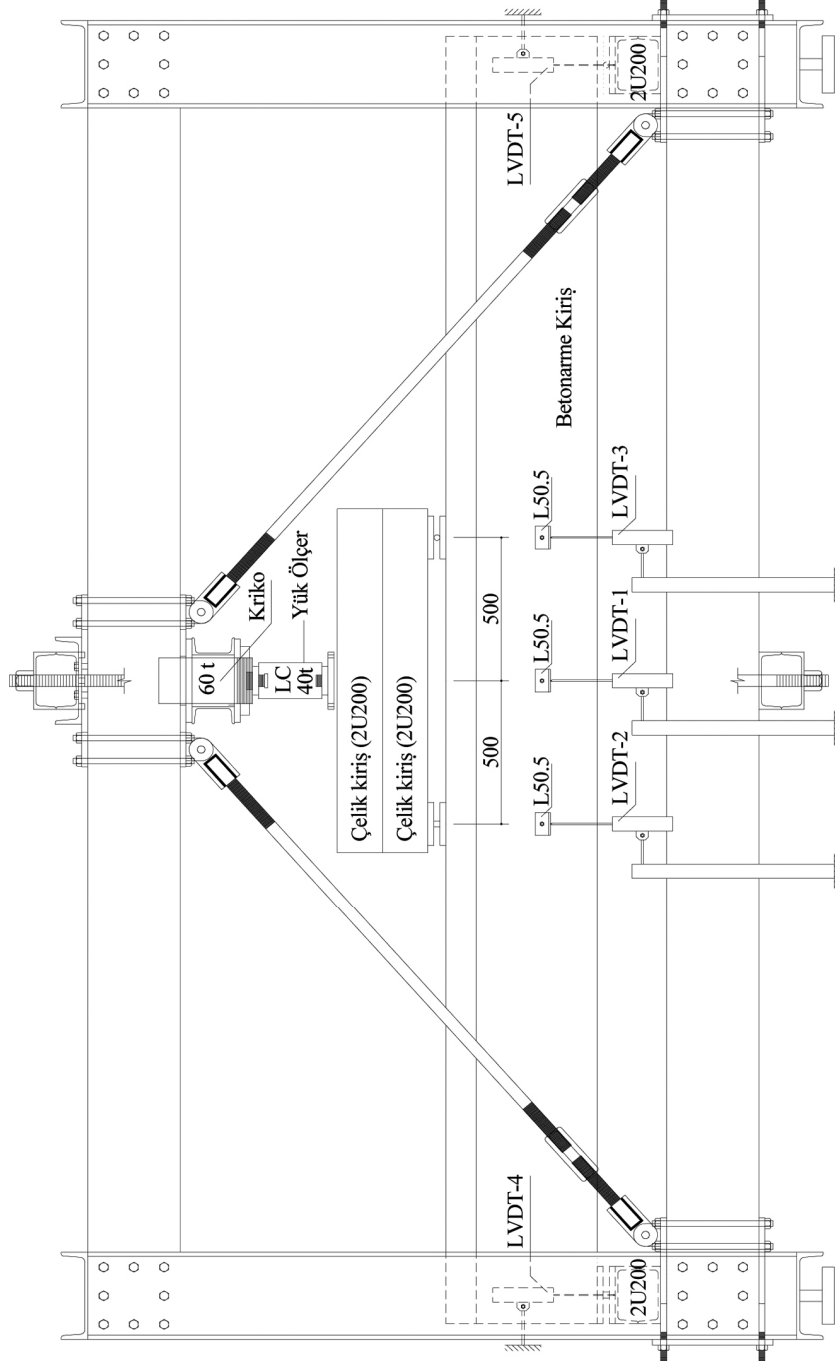
S4, S5 ve S6 elemanlarının eğilme dayanımının yanı sıra kesme dayanımı da yetersizdir. Bu elemanlardan S4 ve S6 eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilmiş, S5 ise sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirme, kiriş yan yüzüne 200 mm aralıklarla yerleştirilen ve ard germe verilen bulonlarla (M10/200 mm) yapılmıştır. 10 mm çaplı bulonlar 12 Nm tork ile sıkılarak, her bir bulonda yaklaşık 6 kN ard germe kuvveti oluşturulmuştur, Şekil 2 ve Şekil 3.

Tüm elemanlarda ortalama beton dayanımı $f_c=16$ MPa, boyuna donatıların akma dayanımı $f_y=450$ MPa ve kopma dayanımı $f_u=620$ MPa olarak belirlenmiştir. Güçlendirme işleminde A1 kalitesinde yumuşak DKP çelik levha kullanılmıştır. Kullanılan levhanın akma ve kopma dayanımı 280 MPa olarak belirlenmiştir.

3.2. Yük ve Ölçüm Düzeni

Deneyler çelik çaprazlarla güçlendirilmiş bir kapalı çerçevede yapılmıştır. Deney elemanları bu çerçevenin içine basit mesnetli olarak yerleştirilmiştir. Betonarme kiriş üzerine, ortalı olarak, oturtulmuş 1 m açıklığındaki çelik bir kirişe hidrolik bir kriko ile yük uygulanarak deney elemanının iki eşit tekil yük etkisinde eğilmesi sağlanmıştır, Şekil 4. Oluşturulan iki noktalı yükleme sisteminin yükleri arasındaki mesafe, düzgün yayılı yükler altında oluşacak moment diyagramını yaklaşık olarak kapsayacak şekilde seçilmiştir. Deney elemanlarında oluşacak sehimleri ölçmek için, mesnet altlarına (anlaşılır olması için çizimde ters tarafta gösterilmiştir), kiriş ortasına ve yük noktalarının altına elektronik deplasman ölçerler (LVDT) yerleştirilmiştir. Oluşturulan bu ölçüm sistemi de Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir. Elemanların ortadaki 1.5 m lik kısımda oluşan eğrilikleri hesaplamak amacıyla eleman üzerinden başka ölçümler de alınmıştır. Ancak, karışıklığa yol açmamak için, bu ölçümler burada gösterilmemiştir. Tüm ölçümler bilgisayar aracılığı ile okunmuş ve deneylerin gelişimi de bilgisayar ekranından izlenmiştir.

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi



Tüm ölçüler "mm" dir.

Şekil 4. Yük ve ölçüm düzeni

4. DENEYLER VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney elemanlarına ait yük-sehim grafikleri çizilmiş ve bunların kendi aralarında karşılaştırması yapılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar bu konudaki önemli çalışmalardan biri olan Tankut ve Arslan'ın yapmış olduğu çalışmadan [8-9] elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Eksik dayanım türü sadece eğilme olan elemanların grafikleri Şekil 5 de, eksik dayanım türü eğilme ve kesme olan elemanların grafikleri ise Şekil 6 da gösterilmiştir. Ayrıca tüm elemanlara ait çeşitli büyüklükler de Çizelge 2 de verilmiştir. Çizelge 2 deki akma deformasyonları, çıkış kolunun doğrultusu ile plastik kısmın doğrultusunun kesiştiği nokta olarak alınmıştır. Aynı çizelgedeki süneklik oranları ise dayanımda %15 lik kayba karşı gelen noktanın deformasyonunun (δ_u), akma deformasyonuna (δ_y) oranından bulunmuştur. Şekil 5. ve 6.'daki yük-sehim grafiklerinin çeşitli noktalarında görülen "boşaltma-tekrar yükleme" işlemi kriko piston boyunun yetmemesinden veya zorunlu nedenlerden kaynaklanmıştır. Bu noktada yük boşaltılmış ve kriko altına yeterli dolgu koyulduktan veya sorun giderildikten sonra deneye kalınan yerden devam edilmiştir. Değerlendirmelerde tüm güçlendirilmiş elemanların, çekme yüzündeki levha uçlarının aynı şekilde tutulu olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 2. Deney sonuçları

Eleman adı	P_{yh} (kN)	P_{yd} (kN)	P_u (kN)	δ_y (mm)	P_{yd}/P_{yh}	$\mu=\delta_u/\delta_y$
RB	117	117	135	14	1.00	>20
RS	117	117	136	15	1.00	14
S1	298	293	310	18	0.98	10
S2	335	272	350	17	0.81	>14
S3	335	309	350	17	0.92	>16
S4	298	280	321	17.5	0.94	11
S5	298	290	323	17.5	0.97	6
S6	335	300	350	17.5	0.90	>16

P_{yh} : Hesap taşıma gücü

δ_y : Akma anındaki sehim

P_{yd} : Deney taşıma gücü

δ_u : Dayanımda %15'lik kayba karşı gelen sehim

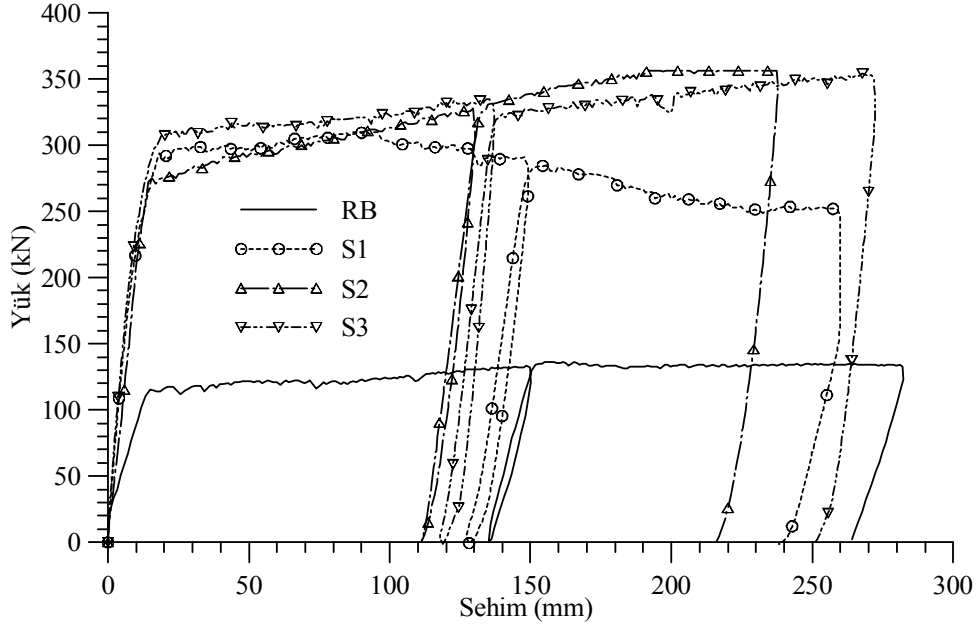
P_u : Ulaşılan en büyük yük

μ : Süneklik oranı

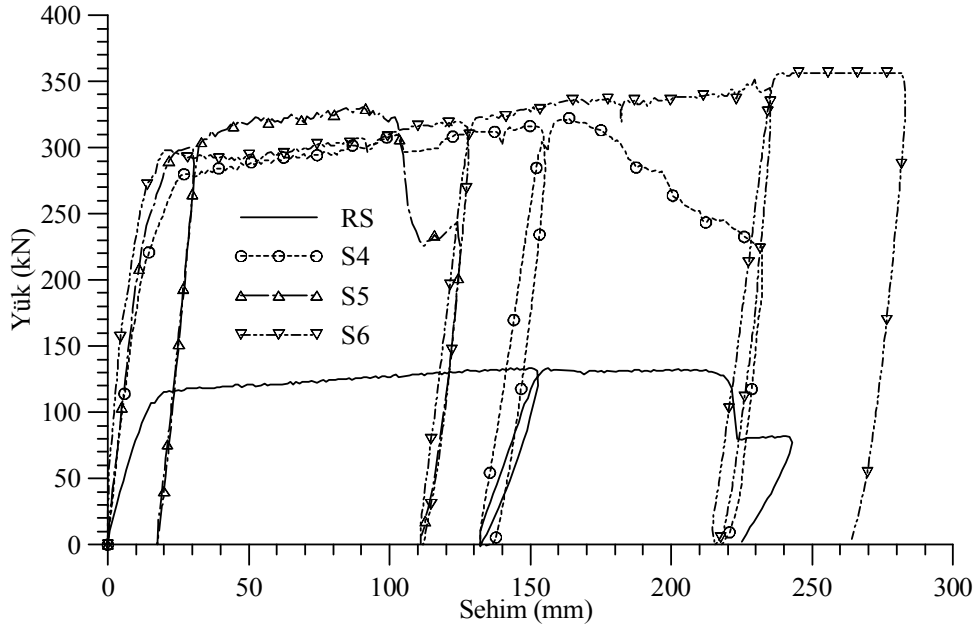
Genel olarak eksik dayanım türü eğilme olan S1, S2 ve S3 elemanları kendi aralarında ve referans kirişi RB ile kıyaslandığında davranışın hem taşıma gücü, hem de süneklik bakımından oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu elemanlarda taşıma gücü referans kirişine göre yaklaşık 2.5 kat artmış olmasına rağmen elemanlar son derece sünek davranmışlardır.

S1 deney elemanı sadece alt yüze çelik levha yapıştırılmış elemandır. Bu eleman, yük 293 kN'a ulaştığında akmış ve 90 mm sehime kadar yükte az da olsa artımlar gözlenmiştir. 90 mm sehimden sonra eleman yavaş yavaş dayanım kaybetmeye başlamıştır. Ulaşılan en büyük yüke (310 kN) göre, elemandaki %15'lik dayanım kaybı 185 mm sehimde gerçekleşmiştir. Bu nokta ile hesaplanan süneklik oranı ise 10 olarak bulunmuştur.

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi



Şekil 5. S1, S2, S3 ve RB elemanlarının yük-sehim ilişkisi



Şekil 6. S3, S4, S5 ve RS elemanlarının yük-sehim ilişkisi

Eleman deney sonuna kadar önemli oranda yük taşımaya devam etmiştir. Deneye 260 mm sehime ulaşıldığında son verilmiştir. Bu noktadaki yük 250 kN olup, bu değer akma yükünü %85'ine en büyük yükün ise %20'sine karşı gelmektedir.

S2 deney elemanında hem alt, hem de üst yüze çelik levha yerleştirilmiştir. Levhalar beton yüzeye yapıştırılmamıştır. Alt levha sadece uçlarından tutturulmuş, üst levha ise tabliyeye bulonlarla bağlanmıştır. Bu elemanda, epoksinin varlığının veya yokluğunun davranış üzerindeki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. S2 elemanın oluşturulmasındaki hedeflerden biri de yangın durumunda, güçlendirme elemanının ne şekilde davranacağı belirlenmesidir. Bilindiği gibi sıcaklık epoksi dayanımını doğrudan etkilemekte ve sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak epoksi dayanımı hızla düşmektedir. Şekil 6 dan da görüleceği gibi akma öncesi davranışta, beklenenin tersine, belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak bu elemanda akma, diğer elemanlara göre biraz daha erken gerçekleşmiştir. Deney sırasında alt çelik levhanın, levha boyuna eksenini etrafında gerilerek, kenarların kiriş yüzeyinden uzaklaştığı görülmüştür. Buna bağlı olarak levha orta eksenindeki liflerin, kenar liflere göre daha önce aktığı ve akma dayanımındaki kaybın bundan kaynaklandığı belirlenmiştir. Ancak yüklemeye devam edildikçe kiriş tam bir gergili kemer davranışı göstermiş ve yük kararlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Bu elemanda ulaşılan en büyük yük S1 ve S3 elemanından bile fazla olmuştur. Yaklaşık 200 mm sehimden sonra, yük hücrelerinin ölçüm aralığı dışına çıktığı için, yük okuması alınamamıştır (eğrinin yatay bölgesi). Eleman dayanımında deney sonuna kadar bir kayıp gözlenmemiş ve deney sistemi elvermediği için deneye son verilmiştir. Bu eleman için süneklik oranı en az 14 olarak hesaplanmıştır.

S3 deney elemanında da hem alt, hem de üst yüze çelik levha yerleştirilmiş ve levhalar beton yüzeye epoksi ile yapıştırılmıştır. Ayrıca üst levha tabliyeye bulonlarla da tutturulmuştur. Güçlendirme işleminde, çekme levhasına ek olarak, basınç yüzünde de levha kullanılmasının davranış üzerinde oldukça olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Bu elemanda eklenen basınç levhasına bağlı olarak taşıma gücünde az da olsa bir artım gözlenmiştir. Daha da önemlisi ulaşılan akma yükü deney sonuna kadar korunmuştur. Eleman son derece sünek davranmıştır. Deney sistemi daha fazla yük uygulamaya elverişli olmadığı için deneye son verilmiş ve bu eleman için süneklik oranı en az 16 olarak hesaplanmıştır.

S4, S5 ve S6 deney elemanları, eksik dayanım türü hem eğilme hem de kesme olacak şekilde tasarlanmıştır. S4 ve S6 hem eğilmeye, hem de kesmeye karşı ve güçlendirilmiştir. S5 elemanı ise, aradaki farkın belirlenmesi için, sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Referans elemanda (RS), kesme açıklığı $a/d=3.5$ gibi kritik bir değer ve etriye aralığı 500 mm olmasına rağmen eleman taşıma gücünü, kesme yerine, eğilme kapasitesi belirlemiştir. Başlarda kesme açıklığında önemli kesme çatlakları olmasına rağmen deneyin ileri aşamalarında davranış kesmeden eğilmeye dönüşmüştür. Taşıma gücü davranışının, beklenenin tersi yönde gerçekleşmesinde, boyuna donatı oranının azlığının neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, S4, S5 ve S6 elemanlarında ulaşılan sonuçlar referans elemanından çok kendi aralarında kıyaslanmıştır.

Alt yüzüne çelik levha yerleştirilerek eğilmeye ve dışarıdan ard germeli kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilen S4 elemanı, kesmeye karşı alınan önlemler dışında, S1 elemanının benzeridir. Sargılama yönünde oluşturulan ard germe kuvvetleri nedeniyle bu elemandaki davranışın S1 dekinden biraz daha iyi olduğu, görülmüştür. Bu elemandaki

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi

dayanım kaybı, S1 elemanına göre daha geç başlamış ve süneklik oranı 11 olarak hesaplanmıştır. 200 kN yük civarında mesnet bölgesinde oluşan ani kesme çatlaklarına bağlı olarak rijitlikte belirgin bir düşme gözlenmiştir. Ancak devam eden yüklerle birlikte bu çatlaklar sınırlı düzeyde kalmış ve eleman eğilme taşıma gücüne ulaşmıştır. Şekil 6 dan da görülebileceği gibi eleman yeterli bir dayanım ve süneklik göstermiştir.

S5 deney elemanı, eksik etriyeli olmasına rağmen, alt yüzüne levha yapıştirılarak sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Güçlendirme işlemi S1 ile aynıdır. Boyuna donatısı arttırılmış olan bu elemanda mutlak bir kesme kırılması beklenmesine rağmen gerçekte durum böyle olmamıştır. Artan yüklerle birlikte mesnet bölgelerinde önemli kesme çatlakları oluşmuş ancak, gergin çekme levhası; eğilmiş ve kesmeden kırılmak üzere olan kirişe yukarı doğru basınç kuvveti uygulamış, sağ ve sol mesnetler arasında oluşan kesme çatlakları arasında kalan kiriş parçasını taşıyarak, yükü kiriş uçlarındaki bağlantı noktalarına aktarmıştır. Yani kiriş belirli bir süre üzerindeki yükleri zar (membrane) etkisi ile taşımıştır. Buna bağlı olarak oldukça önemli kesme çatlakları meydana gelmiş olmasına rağmen, eleman eğilme kapasitesine ulaşabilmiştir. Ancak sehim 100 mm civarında iken sabit moment bölgesindeki tabliye betonu, sargılama yetersizliğine bağlı olarak, aniden ezilerek kiriş kırılmıştır. Buna rağmen bu elemanda süneklik oranı 6 olarak hesaplanmıştır. Bu elemanda, uçları önerilen şekilde tutturulmuş olan alt çelik levhanın kesme dayanımı üzerinde oldukça önemli bir katkı sağladığı ve eleman etriyesi çok eksik olmasına rağmen kesmeden kırılmasını önleyebildiği görülmüştür.

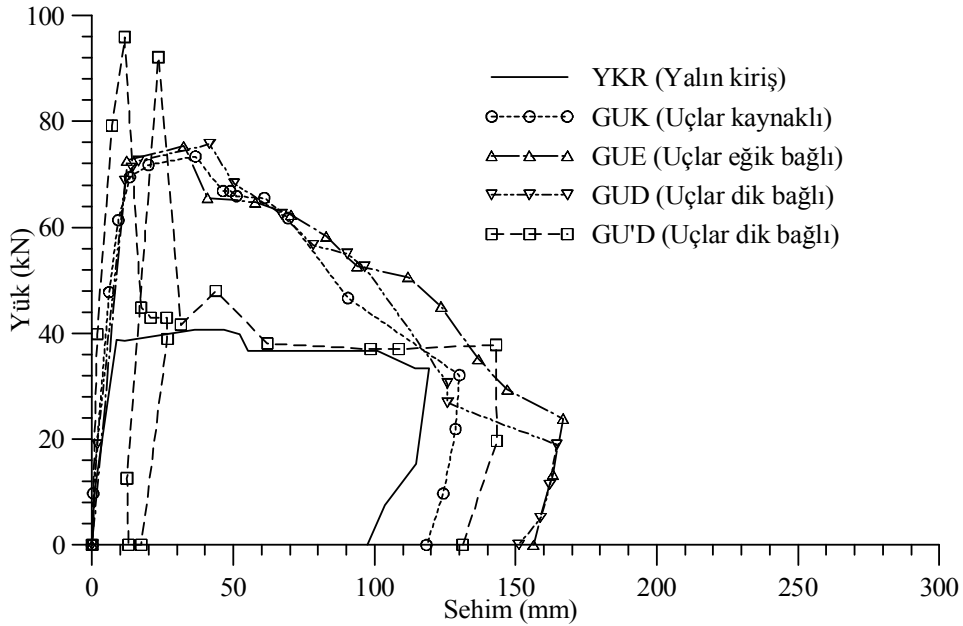
Alt ve üst yüzünden çelik levhalarla eğilmeye karşı ve ard germeli kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilmiş olan S6 deney elemanı, hem dayanım hem de süneklik bakımından oldukça iyi bir davranış göstermiştir. S3 dekinde benzer olarak bu elemanda da basınç yüzündeki güçlendirme levhasının süneklik kapasitesi üzerinde oldukça olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Ulaşılan akma yükü deney sonuna kadar korunmuş ve eleman son derece sünek bir davranış sergilemiştir. Deney sistemi daha fazla yük uygulamaya elverişli olmadığı için deneye son verilmiş ve bu eleman için süneklik oranı en az 16 olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık 235 mm sehimden sonra, yük hücrelerinin ölçüm aralığı dışına çıkıldığı için, yük okuması alınamamıştır (eğrinin yatay bölgesi).

Genel olarak tüm elemanlarda, monolitik kesit varsayımı ile yapılan taşıma gücü hesaplarının ulaşılan taşıma güçleri ile iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Çizelge 2. de, S2 dışındaki tüm elemanlarda monolitik kesit varsayımı ile hesaplanan taşıma gücünün %10 azaltılarak, eleman taşıma gücünün rahatlıkla bulunabileceği görülmektedir. S2 elemanında ise, epoksi kullanılmamış, çelik levhalar sadece mekanik olarak kirişe tutturulmuştur. Buna bağlı olarak da taşıma gücünde %20 civarında bir kayıp oluşmuştur.

Tankut ve Arslan'ın [8-9] çalışmasının bu konuda yapılmış önemli ve sistematik çalışmalardan biri olduğu daha önceden de belirtilmişti. Bu çalışmada özetle biri yalın kiriş (YKR) olmak üzere toplam dokuz adet orta ölçekli betonarme kiriş güçlendirilerek veya onarılarak test edilmiştir. Anlamli karşılaştırmaların yapılabileceği elemanların (YK, GUK, GUE, GUD ve GU'D) yük-sehim ilişkileri söz konusu çalışmadan alınmış ve Şekil 7 de gösterilmiştir. GU'D elemanında levha kalınlığı 4 mm olup, diğer tüm elemanlarda levha kalınlığı 2 mm olarak seçilmiştir. Şekil 7 de verilen güçlendirilmiş elemanlarının hepsinde levha uçları kirişe bağlanmıştır. GUK elemanında, levha uçları kiriş boyuna donatılarına kaynakla bağlanmıştır. GUE elemanında levha uçları kiriş yan yüzüne diyagonal levhalarla yapıştirilmiştir. GUD ve GU'D elemanlarında ise levha uçları, kiriş eksenine dik levhalar

ile kiriş yan yüzüne yapıştırılmıştır. Tankut ve Arslan'ın çalışması ile bu çalışma arasında ölçek farkı olduğundan her iki çalışma arasındaki karşılaştırmalar sadece süneklik bakımından yapılmıştır. Şekil 7 den de görüleceği gibi kalın levhayla güçlendirilmiş eleman (GU'D), akma bölgesine geçmeden, gevrek bir şekilde kırılmıştır. İnce levha ile güçlendirilmiş elemanlarda ise, levha uçları bağlı olmasına rağmen, sınırlı bir süneklik elde edilebilmiştir. Bu elemanlarda ortalama süneklik oranının 2.5 civarında olduğu belirtilmiştir. Oysa önerilen yöntemle güçlendirilmiş kirişlerdeki en küçük süneklik oranı 10 olarak belirlenmiştir, (S5 tam anlamıyla bir güçlendirme yöntemi olmadığından karşılaştırma dışında tutulmuştur).

Bilindiği gibi betonarme kirişlerin sünek bir davranış gösterebilmesi, çekme yüzündeki donatıların aktıktan sonra da uzun bir süre deformasyon yapabilmesine bağlıdır. Bu nedenle deneyler bittikten sonra, çekme yüzündeki levhaların boyuna ve enine yöndeki deformasyonları ölçülerek Çizelge 3.'de verilmiştir. Boyuna deformasyonlar levhaların son boyu ölçülerek elde edilmiştir. Enine deformasyonlar ise maksimum daralmanın olduğu noktalardan ölçülmüştür. Çizelge 3.'de basınç levhalarının süneklik düzeyi üzerindeki etkileri oldukça açık bir şekilde görülmektedir. Basınç levhası kullanılan elemanlarda (S2, S3, S6), çekme yüzündeki çelik levhalar diğerlerine göre 1.5~2 kat daha fazla uzayabilmiştir.



Şekil 7. Tankut ve Arslan'ın çalışmasının bir kısmı

Çizelge 3. Çekme levhalarındaki deformasyon miktarları

Eleman adı	Boyda uzama (mm)	Ende kısalma (mm)
S1	80	6
S2	120	5
S3	125	5
S4	55	3.5
S5	40	3
S6	127	6

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin alt yüzüne çelik levha yapıştırarak eğilmeye karşı güçlendirilmesi sıkça uygulanan bir yöntemdir. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmalarda önemli süneklik sorunlarının ortaya çıktığı ve genellikle sorunun, levhanın kirişe yeterince iyi bağlanamamasından kaynaklandığı görülmüştür. Bu çalışma, aynı yöntem ile güçlendirilmiş kirişlerde dayanımın yanı sıra, yeterli bir süneklik kapasitesine ulaşılması için, levhadaki gerilmeleri uygun bir biçimde kirişe aktaracak düzenlemeler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Birçok bağlantı şekilli araştırılarak çalışmanın sonunda yeni, basit ve kolay uygulanabilir bir uç bağlantısı geliştirilmiştir. Bu uç bağlantısına oldukça kapsamlı bir deney dizisinden sonra ulaşılmış ve geliştirilen uç bağlantısı altı adet deney kirişi üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntem ile güçlendirilmiş kirişlerin aşırı zorlanma durumlarında bile oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Kirişlerde yaklaşık iki buçuk kat dayanım artışı olmasına rağmen, kirişlerin beklentilerin de ötesinde, oldukça sünek davrandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Eğilmeye karşı çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanları hem hedeflenen taşıma gücüne ulaşmış, hem de oldukça sünek davranmıştır.
- 2) Çekme levhalarının ucu için önerilen bağlantı şekilli oldukça başarılı olmuştur. Hiç epoksi kullanılmamış elemanlarda bile, çekme levhasını uçtan tutan yan levha ve bulonlarda herhangi bir sıyrılma, ezilme veya kopma belirtisi gözlenmemiştir.
- 3) Eğilmeye karşı önerilen güçlendirme yönteminin, kesme dayanımı üzerinde de belirgin ve olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Etriyesi oldukça az ve sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiş kiriş bile, oluşan gergili kemer davranışı ve zar etkisi ile, eğilme taşıma gücüne ulaşabilmiştir.
- 4) Çekme levhası, epoksi kullanılmadan, sadece uçlardan tutturulmuş eleman bile yeterli bir dayanım ve süneklik gösterebilmiştir. Dolayısıyla yangın ya da benzer sebeplerle epoksi yapıştırma özelliğini yitirse bile, davranışta önemli bir değişiklik olmaksızın, güçlendirilmiş kiriş dayanımının korunabileceği kanısına ulaşılmıştır. Doğal olarak bu durum, sıcaklık artışının çekme levhası çeliğini etkilemeyecek düzeyde olduğu sürece geçerli olacaktır.

- 5) Güçlendirme işleminde, çekme levhasının yanı sıra, basınç yüzünde de çelik levha kullanımının eleman süneklik kapasitesini oldukça arttırdığı, davranışı olumlu yönde ve önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.
- 6) Genel olarak tüm elemanlarda taşıma gücü hesabının monolitik kesit varsayımı ile yapılabileceği, ancak hesaplanan taşıma gücünün bir miktar azaltılması gerektiği, görülmüştür. Güçlendirme levhaları, uç bağlantılarının yanı sıra, epoksi ile de yapıştırılmış elemanlarda bu azaltımın %10, epoksisiz elemanlarda ise %20 alınmasının uygun olabileceği belirlenmiştir. Ancak, Yazarlar epoksisiz deneyin sadece davranış belirlemeye yönelik yapıldığını ve tüm güçlendirme işlemlerinde mutlaka epoksi kullanılması gerektiğini özellikle belirtmektedirler. Ayrıca önerilen %20'lik oranın, alt levhanın gerginlik durumuna bağlı olarak, önemli ölçüde değişebileceği de unutulmamalıdır.

Semboller

- LC : Yük hücresi
LVDT : Elektronik deplasman ölçer
M : Metrik bulon sembolü
 f_c : Ortalama beton dayanımı
 f_y : Boyuna donatı akma dayanımı
 f_u : Boyuna donatı kopma dayanımı
 P_{yh} : Hesap taşıma gücü
 P_{yd} : Deney taşıma gücü
 P_u : Ulaşılan en büyük yük
 δ_y : Akma anındaki sehim
 δ_u : Dayanımda %15 lik kayba karşı gelen sehim
 ϕ : Donatı çap sembolü
 μ : Süneklik oranı
 ρ : Çekme donatısı oranı

Teşekkür

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Biriminin sağladığı olanaklarla gerçekleştirilmiştir. Değerli Üniversitemize teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynaklar

- [1] Aykaç, S., Onarılmış/Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Deprem Davranışı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001.

T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi

- [2] Yang, D., Park S., Neale, W.K., Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composites, *Composite Structures*, 88, 497–508, 2009
- [3] Li, L. J., Guo, Y. C., Liu, F., Bungey, J.H., Test Analysis for FRC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Sheets, *Construction and Building Materials*, 23, 315–323, 2008.
- [4] Toutanji, H., Zhao, L., Zhang, Y., Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an İnorganic Matrix, *Engineering Structures*, 28, 557–566, 2006.
- [5] Anania, L., Badala, A., Failla, G., Increasing The Flexural Performance of RC Beams Strengthened with CFRP Materials, *Construction and Building Materials*, 19, 55–61, 2005.
- [6] Ashour, A.F., El-Refaie, S.A., Garrity S.W., Flexural Strengthening of RC Continuous Beams Using CFRP Laminates, 26, 765–775, 2004.
- [7] Ali, M.S.M., Oehlers, D.J., Park, S.M., Comparison Between FRP And Steel Plating Of Reinforced Concrete Beams, *Composites, Part A* 32, 1319-1328, 2001.
- [8] Tankut, T. ve Arslan, M., Epoksili Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş Davranışı, *IMO Teknik Dergi*, 3, 4, 575-584, 1992.
- [9] Arslan, M., Betonarme Kirişlerin Epoksiyle Yapıştırılan Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1991.
- [10] Gülenler, C., Betonarme Elemanların Polimer Yapıştırıcı Kullanarak Çelik Levhalarla Takviyesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1977.
- [11] Raouf, M., El-Rimawi, J. A., Hassanen, M.A.H., Theoretical and Experimental Study on Externally Plated R.C. Beams, *Engineering Structures*, 22, 85-101, 2000.
- [12] Uysal, A., Betonarme Kirişlerin Epoksiyle Yapıştırılan Delikli Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [13] Karahan, S., Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [14] Kayar, S., Güçlendirilmiş/Onarılmış Betonarme Kirişlerin Rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [15] 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.
- [16] Altın, S., Tankut, T., Anıl, Ö., Demirel, Y., Response of Reinforced Concrete Beams with Clamps Applied Externally: An Experimental Study, *Engineering Structures*, 25, 1217-1229, 2003.