

BETONARME KİRİŞLERİN DIŞTAN YAPIŞTIRILMIŞ KARBON KUMAŞ VE ÇELİK LEVHALARDAN OLUŞAN KOMPOZİT MALZEMEYLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Bengi AYKAÇ^a, Deniz ACAR^b

^a Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maltepe/Ankara;

^b Özel Şirket, Y. Öveçler Mah., 1065. Cd. 4/1 Çankaya/Ankara;

baykac@gazi.edu.tr, dnzacr@gmail.com

(Geliş/Received: 23.12.2013; Kabul/Accepted: 17.02.2014)

ÖZET

Betonarme kirişlerin çekme yüzüne çelik levha veya lifli polimer (FRP) kumaş yapıştırılarak güçlendirmesi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Bu malzemelerden FRP yüksek dayanım talebini karşılayabilmesine rağmen, süneklik talebini karşılamada genellikle yetersiz kalmaktadır. Çelik ise hem dayanım hem de süneklik talebini karşılayabilmektedir. Ancak özellikle dayanım talebinin yüksek olduğu durumlarda kalın levha kullanımının gerekmesi, bazı uygulama zorlukları doğurmaktadır. Bu çalışmada sünekliğin yanı sıra yüksek dayanım talebinin de gerekli olduğu durumlarda her iki malzemenin birbirinin eksiklerini tamamlayacak şekilde kullanılmasının betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, biri yalın, ikisi sadece karbon kumaşlarla, diğerleri ise hem karbon kumaş hem de çelik levhalarla güçlendirilmiş toplam 11 adet betonarme kiriş düşey yükler altında test edilmiştir. Çalışmada, karbon kumaş ve çelik levha katman sayısı ile yapıştırma sırası ve çelik levha kalınlığı parametre olarak ele alınmıştır. İki malzemenin beraber kullanımının, kirişlerin davranış ve dayanımı üzerine önemli katkılarda bulunduğu ve yapıştırma sırasının kiriş davranışını belirleyen en önemli değişken olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, güçlendirme, çelik levha, karbon kumaş, lifli polimer

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH AN EXTERNALLY BONDED COMPOSITE MATERIAL COMPOSED OF FRP FABRIC AND STEEL PLATE

ABSTRACT

Bonding steel plates or FRP laminates to the tension faces of reinforced concrete beams are among the common strengthening methods. Among these two strengthening materials, FRP generally is not capable of fulfilling the ductility demand while fulfilling the high strength demand. Mild steel, on the other hand, is capable of fulfilling both the strength and the ductility demands. However, the use of thick plates, whose application is impractical, might be needed in the case of high strength demand. In the present study, the effects of the composite use of the two materials to overcome the shortcomings of the individual use of each material on the behavior of reinforced concrete beams was investigated. For this purpose, a total of 11 reinforced concrete beams, including a plain beam, two reference beams strengthened with only FRP laminates and 8 beams strengthened with both steel plates and FRP laminates, were tested under transverse loading. The number of CFRP and steel layers, the bonding sequence of these layers and the plate thickness were adopted as the parameters of the present study. The composite use of CFRP and steel proved to have significant contributions to the behavior and strength of reinforced concrete beams and the bonding sequence of the layers was found to be the most important parameter influencing the beam behavior.

Keywords: Reinforced concrete beam, strengthening, steel plate, cfrp laminate, fiber reinforced polymer

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde yaygın kullanılan tekniklerden biri kiriş çekme yüzüne lifli polimer (FRP) kumaş yapıştırılması yöntemidir. Polimer kumaşların çekme dayanımı yüksek olmasına rağmen bu kumaşların gerildikten sonraki deformasyon yeteneklerinin oldukça kısıtlı olması ve kopmanın gevrek bir şekilde, hiçbir işaret vermeden gerçekleşmesi bu yöntemin en büyük dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır. Karbon kumaşlar gerekli dayanım talebini karşılarken, deformasyon talebini karşılamakta yetersiz kalmaktadırlar. Betonarme kiriş güçlendirme yöntemlerinden bir diğeri olan çekme bölgesine dıştan çelik levha yapıştırılması ise, yumuşak çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisindeki akma platosu sayesinde, betonarme kirişin sünek bir davranış göstermesini sağlamaktadır. Buna karşın, çelik levhalar bazen gerekli dayanım talebini karşılamakta yetersiz kalabilmektedirler. Bu gibi durumlarda, dayanım talebini karşılamak için levha kalınlığı arttırılmakta ancak bu da taşıma, montaj gibi zorlukları doğurmaktadır. Ayrıca, güçlendirmede yüksek dayanımlı çeliğin kullanılması bu çeliğin sünekliğinin yumuşak çeliğe göre çok daha kısıtlı olması sebebiyle süneklik problemlerine yol açmakta ve yüksek dayanımlı çeliğin daha az bulunması sebebiyle çelik plakaların temininin daha zor ve maliyetli olmasına sebep olmaktadır. Özetle karbon kumaşların deformasyon kapasitesi kısıtlı iken, çelik levhalarla güçlendirmede özellikle aşırı dayanımın gerektiği bazı durumlarda dayanım kapasitesi yetersiz kalabilmektedirler.

Betonarme kirişlerin çekme yüzlerine yapıştırılan çelik levhalar yardımıyla güçlendirilmesi ilk olarak, L'Hermite ve Breson [1] tarafından incelenmiştir. Oehlers ve Moran [2] ve Oehlers [3], çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerde eğilme ve kesme kaynaklı levha sıyrılması sınır durumlarını ve bu durumları etkileyen parametreleri araştırmış ve önemli sonuçlara ulaşmıştır. Raoof ve arkadaşları [4-5], levha sıyrılması sınır durumunun gerçekleştiği levha eksenel gerilmesinin alt ve üst sınır değerlerinin hesaplanmasında kullanılacak teorik formüller geliştirmiştir. Aykaç ve arkadaşları [6-9], yaptıkları kapsamlı araştırmalarda betonarme kiriş güçlendirmesinde ve onarımında delikli çelik levha kullanımının kirişin sünekliğine ve enerji sönmüleme kapasitesine önemli katkılarda bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca levhaların deney elemanına sabitlenmesinde yanyüz levhası ve bulon kullanımının kirişin davranışına yaptığı olumlu etkiler de bu çalışmalarda [6-9] elde edilen önemli sonuçlardandır.

Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde FRP levha veya kumaşların kullanılması ile ilgili de kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Garden ve Hollaway [10], karbon plaka uçlarının kirişe sabitlenmesinin plakaların daha yüksek birim deformasyon

değerlerine ulaşmasını sağlayarak levhalardan daha iyi istifade edilmesine imkan tanıdığı göstermiştir. Ali ve diğ. [11] tarafından gerçekleştirilen deneyler, CFRP plakalar ile çelik plakaların elastisite modülleri arasındaki önemli farka rağmen, karbon levhaların kirişten sıyrılma mekanizmasının çelik levhalarla aynı olduğunu göstermiştir. Ashour ve diğ. [12] tarafından farklı uzunluktaki karbon kumaşlarla güçlendirilmiş çeşitli boyuna donatı oranlarına sahip sürekli betonarme kirişler üzerine yapılan deneyler, yapıştırılmadan başka bir ek önlemlerle kirişe sabitlenmemiş kumaşların sıyrılmasının kirişlerin taşıma gücünü önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Esfahani ve diğ. [13], karbon kumaşlarla güçlendirilmiş yüksek donatı oranlı betonarme kirişlerde karbon kumaşın kabuk beton katmanıyla beraber sıyrıldığını belirlemiştir. Aram ve diğ. [14], lifli polimer plakalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerdeki farklı levha ayrılması şekillerini tanımlamış ve bunların engellenmesi için alınabilecek önlemleri belirlemiştir.

Geçmişte yapılmış olan araştırmalar, çelik levha ve karbon kumaşlarla yapılan güçlendirme işlemlerinin betonarme kirişlerin dayanım ve davranışına önemli katkıları bulunduğunu, ancak bu malzemelerin güçlendirmede tek başına kullanımının bazı dezavantajlar ortaya çıkardığını göstermiştir. Bu çalışmada iki malzemenin kompozit olarak beraber kullanılmasının betonarme kiriş davranışına yapacağı katkıları araştırılmıştır. Bu güçlendirme yönteminin aşağıdaki avantajları sağlaması hedeflenmiştir:

1. İki malzemenin beraber kullanımının, bu malzemelerin birbirlerinin eksik taraflarını tamamlanması hedeflenmiştir. Başka bir deyişle, bu güçlendirme yönteminde gerekli dayanım talebini karbon kumaşın, gerekli süneklik talebini ise çelik levhaların karşılayabileceği düşünülmüştür.

2. Sadece karbon kumaşlarla güçlendirilmiş kirişlerde kumaş koştugu anda kirişin dayanımında büyük düşüşler yaşanır. Kumaşların kopma anındaki birim deformasyon değerlerinin çeliğe göre önemli derecede düşük olması sebebiyle karbon kumaş ve çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerde ise belirli deformasyon değerlerine ulaşıldığında, kumaşlar kopar fakat levhalar deformasyon yapmaya devam eder. Çelik levhalardaki bu deformasyonlar sayesinde, karbon kumaş kopsa bile kiriş dayanımındaki kayıpların sınırlı kalması ve nihai dayanımın her zaman yalın kiriş dayanımından daha büyük olması hedeflenmiştir. Yani kullanılan çelik levhaların, belirlenmiş bir asgari dayanım için, bir nevi sigorta görevi yapması öngörülmüştür.

3. Karbon kumaşların elastisite modülü, çelik levhaların elastisite modülüne göre önemli derecede düşüktür. Betonarme kiriş güçlendirmesinde karbon kumaşlara ek olarak çelik levhaların kullanılması,

kirişlerin aynı yük değerleri altında göstereceği sehimleri azaltması açısından da önem taşımaktadır.

4. Karbon kumaşların yüksek çekme dayanımları, güçlendirmede kullanılacak plaka ve kumaşların toplam kalınlığının yalnızca çelik levha kullanılarak yapılan güçlendirme çalışmalarında kullanılan çelik plaka kalınlığına göre daha az olmasını sağlamaktadır. Bunun da güçlendirme işleminin uygulanmasında ve levhaların montajında karşılaşılabilecek zorlukların daha düşük seviyelere indirgenmesini sağlayacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmada, biri güçlendirilmemiş, ikisi sadece karbon kumaşlarla güçlendirilmiş referans, diğerleri karbon kumaş ve çelik levhalarla güçlendirilmiş, toplam 11 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Deneyler kapsamında bu güçlendirme yönteminin etkinliğinin yanı sıra, çelik levha kalınlığının, kumaş ve levha sırası ile düzeninin güçlendirilmiş kiriş davranışına etkileri araştırılmıştır. Bütün kirişlerde aynı malzemeden yapılmış çelik levha ve karbon kumaşlar ile yapıştırıcılar kullanılarak, malzeme özelliklerinin deney sonuçlarını etkilememesi sağlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile taşıma gücü, tokluk modülü ve başlangıç rijitliği değerleri karşılaştırılmış ve bu güçlendirme yöntemi hakkında önemli bilgilere ulaşılmıştır. Ayrıca, deney kirişlerinin değişen yük değerleri altındaki davranışları ile göçme anındaki çatlak ve hasar durumları da araştırılmıştır.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada 11 adet 150x300 mm kesitinde ve 3,2 m uzunluğunda betonarme kiriş (Tablo 1) test edilmiştir. Elemanların isimlendirilmesinde kullanılan “B” harfi (bare) güçlendirilmemiş yalın elemanı, “R” harfi (reference) sadece karbon kumaşla güçlendirilmiş elemanları, “S” harfi ise (strengthened) karbon kumaş ile çelik levhaların oluşturduğu

kompozit malzemeyle güçlendirilmiş elemanları simgelemektedir. Güçlendirmede kullanılan kumaş ve levhaların katman sayısı, levhaların kalınlığı, karbon ve çelik katmanlarının sıralaması deney parametreleri olarak ele alınmıştır. Kirişlerin çekme ve basınç donatıları sırasıyla 2Ø10 ve 2Ø8 olarak seçilmiş ve kirişlerde mesnet bölgelerinde 6 cm, orta bölgelerde 10 cm aralıklı Ø5 etriyeler kullanılmıştır.

Kirişlerde levha veya kumaşların yapıştırılacağı yüzeyler taşlanarak temizlenmiş ve tozdan arındırılmıştır. Çelik levhaların yüzeyleri kumlama işlemiyle pürüzlendirilmiş ve levhalar ile kumaşlar epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır (Şekil 1). Kompozit malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerde her güçlendirme katmanının betona yapıştırılmasından yaklaşık iki gün sonra bir sonraki güçlendirme katmanının yapıştırılarak, katmanların yapıştırıldıkları yüzeylerle tam olarak kenetlenmeleri sağlanmıştır. Karbon kumaş ve çelik levha yapıştırılmasından sonra bu katmanlar, sıyrılmayı önlemek amacıyla kiriş uzunluğu boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiş beş yanyüz levhasıyla kirişe sabitlenmiştir.

2.1 Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Deney elemanlarında kullanılan SikaWrap 230 C/45 karbon kumaş, kuru uygulama için kullanılan tek doğrultulu karbon lifli bir dokumadır. Üretici firma tarafından bu dokumadaki liflerin çekme dayanımı 4300 MPa, elastisite modülü 234000 MPa ve kopma uzaması % 1,8 olarak verilmektedir. 9 adet 200x200x200 mm küp ve 6 adet 100x200 mm silindir numune hazırlanmış ve bu numunelerin deneylerinden beton karışımının ortalama küp ve silindir basınç dayanımlarının sırasıyla 43,4 ve 33,1 MPa; küp ve silindir dayanımlarının standart sapmalarının sırasıyla 2,3 ve 3,5 MPa olduğu belirlenmiştir. Güçlendirmede kullanılan çelik plakaların akma dayanımının 240 MPa düzeyinde olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Deney kirişleri (Test beams)

Eleman	Nitelik	Kumaş Katman Sayısı	Karbon Kumaş Boyutu (mm x mm)	Çelik Levha Boyutu (mm x mm)	Çel. Levha Katman Sayısı	Katman Tipi	Betona Yapıştırılan Yüzy
B	Yalın	-	-	-	-	-	-
R1	Referans	1	150x1	-	-	-	Polimer
R2	Referans	2	150x1	-	-	-	Polimer
S1	Katmanlı	1	150x1	150x1,50	1	Kumaş Üstte	Polimer
S2	Katmanlı	1	150x1	150x1,50	1	Levha Üstte	Çelik
S3	Katmanlı	1	150x1	150x0,80	2	Kumaş Ortada	Çelik
S4	Katmanlı	1	150x1	150x1,00	2	Kumaş Ortada	Çelik
S5	Katmanlı	1	150x1	150x1,50	2	Kumaş Ortada	Çelik
S6	Katmanlı	2	150x1	150x1,00	1	Levha Ortada	Polimer
S7	Katmanlı	2	150x1	150x1,50	1	Levha Ortada	Polimer
S8	Katmanlı	2	150x1	150x2,00	1	Levha Ortada	Polimer



Şekil 1. Güçlendirme İşlemi (Strengthening Procedure)

2.2 Deneysel Düzeneği ve Deneysel Prosedürü (Test Setup and Test Procedure)

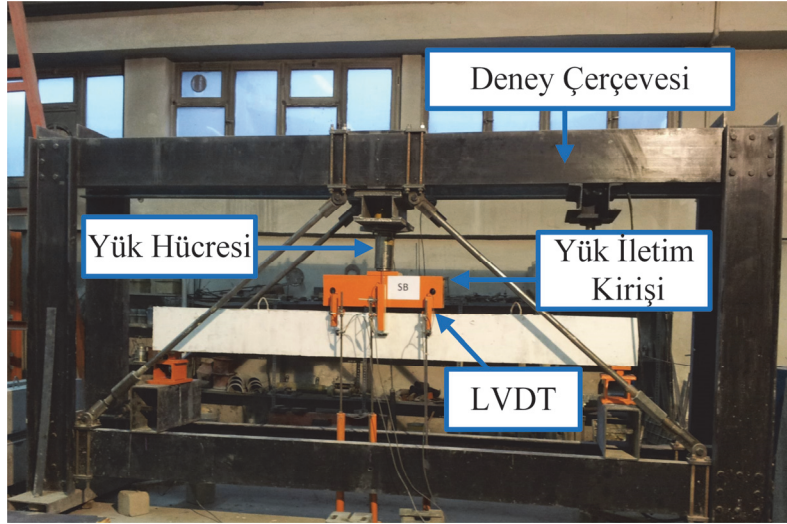
Deneysel, Gazi Üniversitesi, Yapı Mekaniği laboratuvarında yer alan 400 kN kapasiteli çelik deneysel çerçevesinde yapılmıştır. Deneysel elemanları çerçeveye basit mesnetli olacak şekilde yerleştirilmiştir ve iki noktalı tekil yükler altında test edilmiştir. Tekil yükler arasındaki mesafe (60 cm), bu yükler altında oluşan moment diyagramı, düzgün yayılı yük durumunda oluşan moment diyagramına yaklaşık olarak dıştan teğet olacak şekilde seçilmiştir. Deneysel elemanlarına hidrolik bir kriko ve kiriş üzerine yerleştirilmiş bir çelik kiriş ile yük uygulanmış ve yük, bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 2).

Deneysel, kiriş ortası ve yükleme noktalarındaki sehimler ile mesnet çökmelerini ölçmek üzere 5 adet LVDT kullanılmıştır (Şekil 2). Bu LVDT'ler ve yük hücresinden gelen veriler bir bilgisayar sistemi tarafından sürekli kaydedilmiştir. Deneysel elemanları kademeli olarak nihai göçmeye ulaşmaya kadar yüklenmiştir. Elemanlarının düşey deplasmanları belirlenirken mesnet çökmeleri de hesaba katılmıştır.

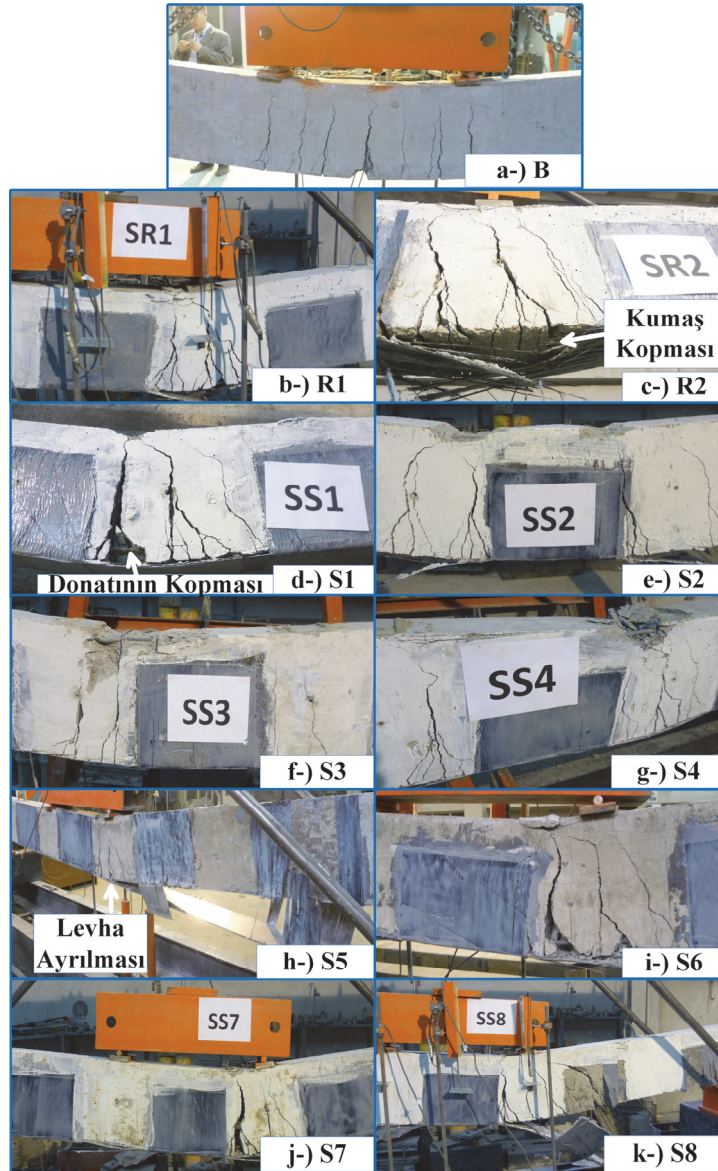
2.3 Kirişlerin Göçme Şekilleri (Failure Modes of the Specimens)

Yalın kiriş (B), yükleme bölgesinde yoğunlaşan eğilme çatlaklarının basınç bölgesine ulaşmasından sonra sünek bir biçimde göçmüştür ve kirişte herhangi bir kesme çatlağı oluşmamıştır (Şekil 3a). Tek kat karbon kumaşla güçlendirilmiş referans eleman (R1) ile çift kat kumaşla güçlendirilmiş referans elemanda (R2) yükleme bölgesi içerisinde eğilme çatlakları oluşmuş ve bu çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleyerek beton ezilmesinin ortaya çıktığı alanda birleşmiştir. R1 elemanı bir kumaş katmanının, R2 elemanı da iki kumaş katmanının sağ yük uygulama noktası çevresinde kopması sonucu (Şekil 3b ve 3c) taşıma gücüne ulaşmış ve kopmanın meydana gelmesinden sonra yükte büyük düşüşler meydana gelirken deformasyonlara bir süre devam edilmiştir (Şekil 4). Kumaşın kirişe, levhanın da kumaşa yapıştırıldığı çift katmanlı S1 kirişinde sağ yükleme noktasının hemen altında ortaya çıkan iki ana çatlak ilerleyerek beton ezilme bölgesine ulaşmıştır (Şekil

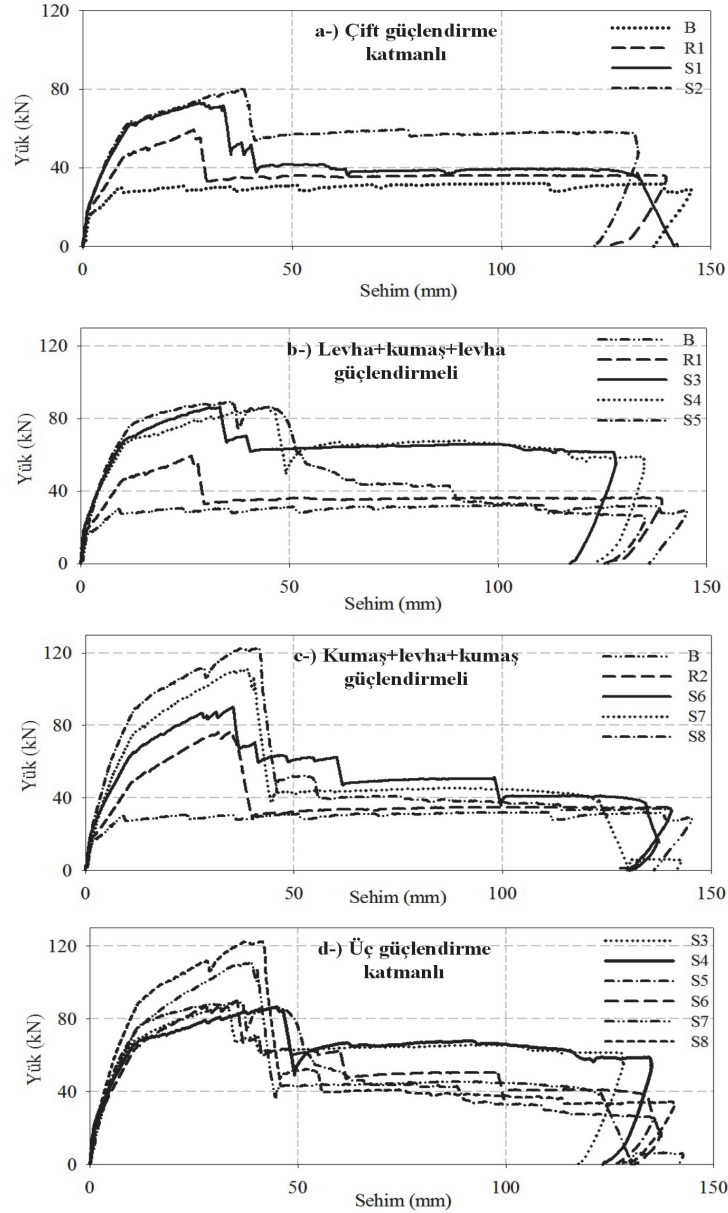
3d). Bu çatlakların ilerlemesi esnasında çatlama bölgesinde kirişe yapışık olan karbon kumaş kopmuş ve yükte ani bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 4a). Kirişin bir miktar daha deformasyon yapmasından sonra çelik plaka da sıyrılmış ve yük önemli ölçüde düşmüştür. Bu yük değerinde kiriş iç çekme donatıları kopana kadar deforme olmaya devam etmiştir. Çatlama bölgesinde kirişten sıyrılmış olsa da çelik güçlendirme levhası, iç donatılar kopana kadar kirişin deformasyonlara devam etmesini sağlamış, beton ezilmesinin etkisiyle kirişin tamamen yük taşıyamaz duruma gelmesini önlemiştir. Levhanın kirişe, kumaşın da levhaya yapıştırıldığı çift katmanlı S2 kirişinde, S1 kirişinden farklı olarak çekme çatlakları daha geniş bir alana yayılmış (Şekil 3e) ve kumaş bir bütün olarak değil lifler halinde kopmuştur. Bu kopmadan sonra doğrudan kirişe yapıştırılmış olan çelik levha, kirişin daha yüksek yük düzeyinde deformasyonlara devam etmesini sağlamış ve kiriş beton ezilmeleri sonucu nihai göçmeye ulaşmıştır (Şekil 4a). Sırasıyla 0,8 ve 1,0 mm kalınlıklarında ikişer çelik levha ve bu levhalar arasında konmuş karbon kumaş ile güçlendirilmiş üç katmanlı S3 ve S4 kirişlerinde eğilme çatlakları yükleme bölgesine yayılmıştır. Bu iki kirişte de karbon kumaş yırtıldıktan sonra, çelik levhaların yükü alarak kirişlerin taşıma gücünde önemli kayıplar yaşanmasını engellediği ve kirişlerin bu yük değerlerinde önemli deformasyonlar yapabildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4b). S4 kirişinde liflerin kopma anında yükte yaşanan büyük kaybın bir bölümü yükün çelik levhalara iletilmesi ile telafi edilmiştir. S3 ve S4, beton ezilmesi ve basınç donatı burkulması sonucu nihai göçmeye ulaşmışlardır (Şekil 3f ve 3g). Her biri 1,5 mm kalınlığında iki çelik levha ve bunların arasında yerleştirilmiş karbon kumaşla güçlendirilmiş S5 kirişinde güçlendirme katmanlarını kirişe bağlayan yanyüz levhalarından biri yükleme esnasında kopmuştur (Şekil 3h). Bu kopma sonucu, kirişin taşıma gücü kademeli olarak yalın kiriş taşıma gücü seviyelerine düşmüştür (Şekil 4b). İki kumaş katmanı ve bunlar arasında yerleştirilmiş sırasıyla 1,00; 1,50; ve 2,00 mm kalınlığında bir çelik levha ile güçlendirilmiş S6, S7 ve S8 kirişleri, karbon kumaş katmanlarının kopmasıyla yalın kiriş taşıma gücü seviyelerine inerek deformasyonlara devam etmiştir. Bu kirişler eğilme çatlaklarının beton ezilme bölgesine ulaşmasından sonra, çekme donatısı kopması veya beton ezilmesi sonucu nihai göçmeye ulaşmıştır (Şekil 3i, 3j ve 3k). S6 ve S8 kirişlerinde farklı kumaş katmanlarının aynı anda kopmaması sonucu yükteki düşüşler kademeli gerçekleşmiş, ancak yük belirli deformasyonlardan sonra yalın kiriş taşıma gücü seviyelerine inmiştir (Şekil 4c ve 4d).



Şekil 2. Deneysel Düzenek (Test Setup)



Şekil 3. Elemanların Göçme Şekilleri (Failure Modes of the Specimens)



Şekil 4. Kirişlerin yük-sehim eğrileri (Load-deflection curves of the beams)

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE EXPERIMENTAL RESULTS)

Deney elemanlarının taşıma güçleri (P_y), her kirişin taşıma gücünün güçlendirilmemiş yalın kirişin taşıma gücüne oranı (P_y/P_{yB}), tek kumaş katmanlı elemanların taşıma güçlerinin tek kumaş katmanlı referans elemanın taşıma gücüne oranı (P_y/P_{yR1}), ve çift kumaş katmanlı elemanların taşıma güçlerinin çift kumaş katmanlı referans elemanın taşıma gücüne oranı (P_y/P_{yR2}), Tablo 2’de gösterilmektedir. Bu bölümde kirişin en dış levha veya donatı katmanında akmaya ulaşıldığı andaki yük değeri taşıma gücü (P_y) olarak tanımlanmıştır. Güçlendirilmiş deney elemanlarında akma gerçekleşikten sonra da yük değerleri artmaya devam etmiş ve deney kirişleri daha büyük yük değerlerine ulaşmıştır. Ancak bu yük

değerlerine ulaşılması esnasında kirişlerde büyük deformasyonlar meydana geldiği için akma yüküne ulaşıldıktan sonra yükte meydana gelen artışlar göz ardı edilmiş ve akma yükü taşıma gücü olarak kabul edilmiştir. Çelik levha ve karbon kumaşların beraber kullanılmasıyla güçlendirilmiş kirişlerin taşıma güçlerinin yalın elemanın taşıma gücünden % 106-195 arasında değişen oranlarda büyük olduğu görülmektedir. Aynı kalınlıkta çelik levha ve karbon kumaşla güçlendirilmiş çift katmanlı S1 ve S2 kirişlerinden, kirişe yapıştırılan üst katmanlı çelik olan S2 kirişinin taşıma gücünün daha yüksek olması, betona yapışan yüzeyin sınırlı da olsa taşıma gücünü etkilediğini göstermektedir. Kumaş katmanının ortada olduğu üç katmanlı S3, S4 ve S5 kirişlerinin taşıma güçlerinin R1 referans kirişinin taşıma gücünü % 45-62 arasında değişen oranlarda aştığı ve genel olarak çelik levha kalınlığı arttıkça taşıma gücünün

arttığı görülmektedir. S5 elemanında yanyüz levhalarından birinin aşırı gerilme birikmeleri sonucu kopmuş olması dahi taşıma gücündeki bu artışı engellemiştir. Aynı sonuç levha katmanının ortada olduğu S6, S7 ve S8 kirişleri için de geçerlidir. Bu kirişlerde levha kalınlığının 1,00 mm'den 2,00 mm'ye artırılmasıyla taşıma gücünün, R2 referans taşıma gücüne göre 1,30-1,78 kat arttığı görülmektedir.

S2 ve S3 elemanlarında güçlendirmede kullanılan toplam levha kalınlıkları birbirlerine yakındır ve iki kirişte de betona yapıştırılan yüzey çeliktir. S2 kirişinde 1,50 mm kalınlığında tek kat çelik levha kullanılmışken, S3 kirişinde 0,80 mm kalınlığında iki kat çelik levha en alt ve en üst güçlendirme katmanı olacak şekilde iki katman halinde kullanılmıştır. S3 elemanının taşıma gücü S2 elemanından yaklaşık %8 büyüktür. S3 elemanındaki toplam levha kalınlığının S2 elemanından 0,1 mm fazla olduğu da dikkate alınırsa, çelik levhanın birden çok katman halinde karbon kumaşı çevreleyecek şekilde kullanımının kirişin taşıma gücünü çok sınırlı da olsa arttırdığı görülmektedir.

Süneklik oranı, en yüksek yük değerinin %15 azaldığı andaki sehim değerinin akma anındaki sehim değerine oranı olarak tanımlanmıştır. Sadece çelik donatıya sahip kirişlerde yükte meydana gelecek %15 mertebesindeki bir kayıptan kısa bir süre sonra kirişin göçmeye ulaşmasından dolayı, bu andaki deformasyon değerinin en büyük sehim olarak kabul edilmesi sünekliğin tanımlanması açısından yeterlidir. Çelik levha ve karbon kumaşların oluşturduğu kompozit malzemeye güçlendirilmiş kirişlerde, maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra kumaş kopmasının etkisiyle yük değerlerinde ani bir düşüş yaşanmakta ve bu düşüşten sonra yük, maksimum yükün %85'inin çok altındaki değerlere düşmektedir. Ancak, güçlendirilmiş kirişler çelik levhaların katkısıyla yalın kirişin taşıma gücünün çok üstündeki yük değerlerinde deformasyonlara devam etmekte ve büyük sehimlerden sonra göçmektedir. Yükün %15 düştüğü andaki sehim değerini, en büyük sehim değeri olarak kabul etmek, kompozit malzemeye güçlendirilmiş kirişin kumaş kopmasından sonra yaptığı çok önemli deformasyonları ihmal etmek anlamına gelmektedir. %15 mertebesindeki bir kayıp kompozit malzemeye güçlendirilmiş kirişlerin kullanılamaz ve yük taşıyamaz duruma geldiğini göstermeyeceğinden, süneklik oranı değerleri deney sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmamıştır.

Elemanların başlangıç rijitliği değerleri (K) ile her elemanın başlangıç rijitliğinin yalın elemanın rijitliğine oranı (K/K_B), Tablo 3'te gösterilmektedir. Eleman rijitlikleri, yük-sehim eğrilerinin doğrusal olan başlangıç bölgelerinin eğiminden elde edilmiştir. Ayrıca her elemanın yük-sehim eğrisinin altında kalan alan olan tokluk modülü (E_{mt}) ve her elemanın tokluk modülünün (enerji tüketimi) yalın elemanın (E_{mt}/E_{mtB})

ve ilgili referans elemanın tokluk modülüne (E_{mt}/E_{mtR1} ve E_{mt}/E_{mtR2}) oranları da Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3'te verilen değerler incelendiğinde, çelik levhalar ile karbon kumaşların beraber kullanılmasının kirişin rijitliğinde güçlendirilmemiş yalın elemana göre %65-150, enerji sönümleme kapasitesinde ise %20-70 arasında değişen oranlarda artışlar sağladığı görülmektedir. İki güçlendirme katmanlı elemanların katmanlı elemanlardan S2 elemanının rijitlik ve tokluk modülü değerlerinin S1 elemanına göre önemli derecede yüksek olması, betona yapışan yüzeyin çelik olmasının eleman davranışına yaptığı katkıyı göstermektedir. Betona yapışma yüzeyi kumaş olan üç katmanlı S6, S7 ve S8 elemanlarının sonuçları incelendiğinde, çelik levha kalınlığı arttıkça başlangıç rijitliği ve süneklik oranının arttığı, ancak tokluk modülünün azaldığı görülmektedir.

Karbon kumaş katmanının ortada yer aldığı ve betona yapışma yüzeyi çelik olan üç katmanlı S3, S4 ve S5 kirişlerinde, levha kalınlığı arttıkça başlangıç rijitliğinin genel olarak arttığı görülmektedir. Kumaş sıyrılmaması olan S5 kirişi göz ardı edildiğinde, levha kalınlığı arttıkça kirişin tokluk modülünün de arttığı görülmektedir. Betona yapışma yüzeyi kumaş olan üç katmanlı kirişlerde (S6, S7 ve S8) levha kalınlığı arttıkça enerji sönümleme kapasitesi azalırken, betona yapışma yüzeyi çelik olan kirişlerde (S3 ve S4) bu kapasite artmaktadır. Bu artış, levha kalınlığını arttırmanın yalnızca betona yapışma yüzeyi çelik olan kirişlerde enerji kapasitesi üzerinde olumlu etkiler yapacağını göstermektedir. 1,50 mm kalınlığında tek kat çelik levhanın kullanıldığı S2 kirişi ile 0,80 mm kalınlığında iki kat çelik levhanın en alt ve en üst katman halinde karbon kumaşı çevreleyecek şekilde kullanıldığı S3 kirişi karşılaştırıldığında, S3 kirişinin rijitlik ve enerji değerlerinin S2 kirişinden yaklaşık %13 ve %8 büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Deney elemanlarının taşıma güçleri (Ultimate loads of the test specimens)

Eleman	P_y (kN)	P_y/P_{yB}	P_y/P_{yR1}	P_y/P_{yR2}
B	30,19	1,00	-	-
R1	46,28	1,53	1,00	-
R2	50,18	1,66	-	1,00
S1	62,34	2,06	1,35	-
S2	63,84	2,11	1,38	-
S3	68,87	2,28	1,49	-
S4	67,19	2,23	1,45	-
S5	75,13	2,49	1,62	-
S6	65,25	2,16	-	1,30
S7	76,48	2,53	-	1,52
S8	89,21	2,95	-	1,78

Tablo 3. Deney elemanlarının başlangıç rijitliği ve tokluk modülü değerleri (Initial rigidity and modulus of toughness values of the test specimens)

Eleman	K (kN/mm)	K/K_B	E_{mt} (kJ)	E_{mt} / E_{mtB}	E_{mt} / E_{mtR1}	E_{mt} / E_{mtR2}
B	3,33	1,00	4,32	1,00	-	-
R1	4,58	1,38	5,22	1,21	1,00	-
R2	4,41	1,32	5,57	1,29	-	1,00
S1	5,48	1,65	6,10	1,41	1,17	-
S2	5,48	1,65	7,66	1,77	1,47	-
S3	6,36	1,91	8,36	1,94	1,60	-
S4	6,36	1,91	8,91	2,06	1,71	-
S5	8,20	2,46	7,02	1,63	1,34	-
S6	5,80	1,74	7,41	1,72	-	1,33
S7	6,35	1,91	7,25	1,68	-	1,19
S8	7,54	2,26	7,89	1,83	-	1,03

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çelik levhalar ve karbon kumaşların beraber kullanılması yoluyla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının incelenmesi amacıyla biri güçlendirilmemiş yalın ve ikisi sadece karbon kumaşlarla güçlendirilmiş referans olmak üzere toplam 11 adet betonarme kiriş, düşey statik yükler altında test edilmiştir. Yapılan deneylerde güçlendirmede kullanılan çelik levhaların kalınlığı ile karbon kumaş ve çelik katmanlarının yapıştırma sırası ve düzenlemesi de deney değişkenleri olarak incelenerek, bu güçlendirme yönteminin en etkili olabileceği detaylar araştırılmıştır. Deney kirişlerinin davranışlarının araştırılması amacıyla kiriş taşıma gücünün yanı sıra, başlangıç rijitliği ve tokluk modülü (enerji sönmüleme miktarı) değerleri de incelenmiştir. Bu deneylerde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Çelik levhalar ve karbon kumaşların beraber kullanılmasının, kirişin taşıma gücü; başlangıç rijitliği ve tokluk modülü değerlerine yalın elemana göre sırasıyla % 106-195; % 65-150; % 20-70 arasında değişen oranlarda katkı yaptığı görülmüştür. Sadece bir kat kumaş bulunduran kompozit malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerin taşıma gücü ve tokluk modülü değerlerinin sadece bir kat kumaşla güçlendirilmiş referans elemana göre sırasıyla % 35-60 ve % 20-70 arasında değişen oranlarda yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde iki kat kumaş bulunduran kompozit malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerin taşıma gücü ve tokluk modülü değerlerinin sadece iki kat kumaşla güçlendirilmiş referans elemana göre sırasıyla % 30-80 ve % 5-35 arasında aşmıştır.

2. Kirişe yapıştırılan en üst güçlendirme katmanının, kiriş davranışını belirleyen en önemli değişkenlerden biri olduğu belirlenmiştir. Bu katmanın çelik olması durumunda, karbon kumaşın kopmasından sonra çelik levhanın gerilmeleri üzerine alarak, güçlendirilmiş kirişin yalın kiriş taşıma gücünün üzerindeki yük değerlerinde deforme olmaya devam etmesini sağladığı tespit edilmiştir. Kirişle temas eden katmanın karbon olması durumunda ise, kumaşın

kopmasıyla bütün güçlendirme katmanının etkisini yitirdiği ve kirişin aniden yalın kirişin taşıma gücü seviyesine düştüğü görülmüştür. Betona yapışma yüzeyi kumaş olan üç katmanlı kirişlerde, kumaştaki kopmaların etkisiyle kiriş dayanımındaki önemli azalmalar, bu kirişlerin süneklik oranı değerlerinin betona yapışma yüzeyi çelik olan üç katmanlı kirişlere göre çok daha düşük olmasına neden olmaktadır.

3. Üç katmanlı kompozit malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerde çelik levha kalınlığının fazla artırılması güçlendirme katmanlarının kirişe daha iyi tutunması amacıyla kullanılan kuşaklarda büyük gerilmeler oluşturmuştur. Bu gerilmeler, kuşakların erken koparak işlevini yitirmesine ve kirişin erken göçmesine neden olmuştur.

4. En üst katmanı kumaş olan üç katmanlı kirişlerde çelik levha kalınlığı arttıkça kirişteki deformasyonların ve tokluk modülünün azaldığı sonucuna varılmıştır. Ancak levha kalınlığı arttıkça kirişin kumaş kopmasından sonra taşıdığı yük değerlerinin daha büyük olduğu belirlenmiştir.

5. Sadece bir kat çelik plaka ve bir kat karbon kumaşla güçlendirilmiş iki katmanlı kirişlerde betona yapıştırılan yüzeyin çelik olmasının kirişin taşıma gücü ve rijitlik değerlerine katkı yaptığı görüldü de bu katmanın sınırlı olduğu belirlenmiştir. Yani iki katmanlı kirişlerde betona yapışma yüzeyi, kiriş davranışını üç katmanlı kirişlere göre daha sınırlı ölçüde etkilemektedir.

6. Çelik levha katmanlarının kumaş katmanını çevreleyecek şekilde en alt ve en üst katman olarak kullanılması güçlendirilmiş kiriş davranışını, kirişe yapışan yüzeyi çelik levha olan iki katmanlı elemana göre, daha olumlu yönde etkilemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. L'Hermite, R., ve Bresson, J., "Concrete Reinforced with Glued Plates", **RILEM Int. Symposium on Synthetic Resins in Building Construction**, Paris, France, 175-203, 1967.

2. Oehlers, D.J., ve Moran, J.P., “Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams”, **ASCE Journal of Structural Eng.**, Cilt 116, No.4, 978-95, 1990.
3. Oehlers, D.J., “Reinforced Concrete Beams with Plates Glued to their Soffits”, **ASCE Journal of Structural Engineering**, Cilt 118, No. 8, 2023-2038, 1992.
4. Raouf, M., El-Rimawi, J.A., ve Hassanen, M.A.H., “Theoretical and Experimental Study on Externally Plated R.C. Beams”, **Engineering Structures**, Cilt 22, No. 1, 85-101, 2000.
5. Raouf, M., ve Zhang, S., “An Insight into the Structural Behavior of R.C. Beams with Externally Bonded Plates”, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures and Buildings**, Cilt 122, No. 4, 477-492, 2000.
6. Aykaç, S., ve Özbek, E., “T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi”, **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi**, Cilt 22, 5319-5334, 2011.
7. Aykaç, S., Kalkan, I., ve Uysal, A., “Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Epoxy-Bonded Perforated Steel Plates”, **Structural Engineering and Mechanics**, Cilt 44, No. 6, 735-751, 2012.
8. Aykaç, S., Aykaç, B., Kalkan, I., ve Özbek, E., “Strengthening of RC T-Beams with Perforated Steel Plates”, **Magazine of Concrete Res.**, Cilt 65, No. 1, 37-51, 2012.
9. Aykaç, S., Kalkan, I., Aykaç, B., Karahan, S., ve Kayar, S., “Strengthening and Repair of RC Beams Using External Steel Plates”, **ASCE Journal of Structural Engineering**, Cilt 139, No. 6, 929-939, 2013.
10. Garden, H.N., ve Hollaway, L.C., “An Experimental Study of the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fibre Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams”, **Composite Structures**, Cilt 42, 175-188, 1998.
11. Ali, M.S.M., Oehlers, D.J., ve Park, S.M., “Comparison between FRP and Steel Plating of Reinforced Concrete Beams”, **Composites: Part A**, Cilt 32, No. 9, 1319-1328, 2001.
12. Ashour, A.F., El-Refaie, S.A., ve Garrity, S.W., “Flexural Strengthening of RC Continuous Beams Using CFRP Laminates”, **Cement and Concrete Composites**, Cilt 26, 765-775, 2004.
13. Esfahani, M.R., Kianoush, M.R., ve Tajari, A.R., “Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Sheets”, **Engineering Structures**, Cilt 29, 2428-2444, 2007.
14. Aram, M.R., Czaderski, C., ve Motavalli, M., “Debonding Failure Modes of Flexural FRP-Strengthened RC Beams”, **Composites: Part B**, Cilt 39, 826-841, 2008.

