



Farklı Kalınlıkta UYPB Laminelerin Eğilme Kapasitesine Katkısının İncelenmesi

Investigate the Influence of Different UHPC Laminates Thickness to the Flexural Capacity

Esra Gökçe Sağır ^{1*}, Hasan Murat Tanarlan ¹, Reza Jahangiri ¹, Çağlar Yalçinkaya ¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: esragokce.sagir@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 10.05.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 29.07.2019

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI:10.21205/deufmd.2019216329
*Atıf şekli/How to cite*SAGIR, E.G., TANARSLAN, H.M., JAHANGIRI, R., YALCINKAYA, C., (2019), Farklı Kalınlıkta UYPB Laminelerin Eğilme Kapasitesine Katkısının İncelenmesi, DEUFMD, 21(63), 1015-1026.

Öz

Çalışmada, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) plakalarla güçlendirilmiş eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Güçlendirme amacıyla kullanılacak plakaların imalatı için %3 fiber hacmine sahip UYPB kullanılmıştır. Bir tanesi kontrol numunesi olmak üzere, kalınlık değişiminin eğilme davranışı üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla 3 farklı kalınlıkta UYPB plaka üretilmiş (30 mm, 50 mm ve 70 mm) ve plakalar betonarme kirişlere uygulanmıştır. Kirişler, dört noktalı eğilme yükleri altında test edilmiştir. UYPB plaka ile güçlendirilmiş numunelerde yük taşıma kapasitesinde %20 ila %58 arasında değişen oranlarda artış elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra Yüksek Performanslı Beton, Betonarme Kiriş, Güçlendirilmiş Kirişte Eğilme Davranışı

Abstract

The aim of this study is to investigate behavior of reinforced concrete beams with insufficient flexural strength which are reinforced by ultra high performance concrete (UHPC) were examined experimentally. UYPC with 3% fiber volume was used for manufacturing laminates which will be used for reinforcing. UHPC having three different thickness (30 mm, 50 mm and 70 mm) where one of them will be control sample was used for observing effect of change in thickness over flexural behavior were manufactured and applied over reinforced concrete beams. RC Beams were tested under four -point bending loads. Increase in load carrying capacity varying with 20%-58% rates were obtained in samples which were reinforced with UHPC.

Keywords: Ultra high performance concrete, , reinforced concrete beam, flexural behavior in reinforced beam

1. Giriş

Betonarme yapıların kullanım amaçlarının farklılaşması ve yönetmeliklerin değişmesi ile yapılarda çeşitli nedenlerle ortaya çıkan yetersizlikleri gidermek için kusurlu yapıların veya yapı elemanlarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde; mantolama, epoksiyle yapıştırılmış çelik levhaların kullanımı, ardgerme ve karbon fiber polimer (CFRP) yapıştırma ile güçlendirme tercih edilen yöntemlerden bazılarıdır [1-11]. Ancak bu yöntemlerin; montaj zorluğu, uygulanan güçlendirme malzemelerin ağırlığı, uygulama esnasında hane halkının rahatsız edilmesi, korozyon riski ve yangına karşı dayanım eksikliği vb. dezavantajları bulunmaktadır.

Yapı malzemeleri teknolojisinde meydana gelen güncel gelişmeler, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) gibi çeşitli çimento esaslı kompozitleri ortaya çıkarmıştır.

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB); çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir karışımın sertleşmesiyle oluşan, bir matris içinde hacmen %2-%3'e varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur. Geleneksel betona göre eğilme yükleri altında yüksek enerji yutma kapasitesine ve dayanıma sahiptir. Bu yeni nesil çimento esaslı kompozitler; düşük geçirimsizlik, geliştirilmiş durabilite, sınırlı rötne ve korozyon dayanımının artırılması gibi diğer yüksek performans özellikleri de sağlamaktadır [12].

UYPB üretiminde, yoğun matraste, optimize edilmiş lif ve agrega fazları çok önemlidir. Bu nedenle optimize edilmesi gereken çelik lif dozajı, hem uygulama maliyeti hem de UYPB'nin mekanik performansını artırmak için anahtar parametre olarak kabul edilebilir. Yapılan araştırmalarda lif hacminin %1 ile %5 oranında değiştiği görülmektedir [13,31]. Lif hacmi %5 oranına kadar artırıldığında basınç dayanımı, gerilme ve elastisite modülünde artış yaşanmasını sağlamıştır [13]. Çelik liflerin artırılması ile birlikte UYPB mekanik performansının büyük ölçüde iyileşmesine rağmen kendinden sıkıştırma ile ilgili eşik değerini karşılamak için karışıma yaklaşık %2,5 oranında çelik mikro liflerin eklenebileceği ortaya çıkarılmıştır [14].

UYPB'nin yüksek performansını gözlemledikten sonra sadece mukavemeti değil aynı zamanda yüksek dayanıklılığı sayesinde modern yapıların

inşaatında da yaygın kullanıma sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapısal eleman olarak kullanımının yanında [15-20], güçlendirme veya onarım malzemesi olarak da kullanılması son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmektedir [21-25]. Prem ve Murthy (2016) UYPB plaka kullanarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesini incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli donatı oranlarına sahip betonarme kirişler 10, 15 ve 20 mm kalınlıkta UYPB plakalar kullanılarak güçlendirilmiştir [21]. Araştırmacılar güçlendirilen kirişlerin eğilme yükleri altında monolitik davrandığını ve 10 mm plaka kullanımı durumunda başlangıçtaki eğilme kapasitelerini tekrar kazanabildiği göstermiştir. Herhangi bir ayrılma olmadığı kompozit kirişlerin monolitik olarak kırıldığı ve mukavemetin %30 oranında arttığı bildirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere farklı kalınlıklarda yapıştırılan UYPB plakaların dayanım ve davranışta sağlayacağı iyileştirmeler mekanik deneylerle incelenmiştir.

Öncelikle çalışmada kullanılacak UYPB'lerin karışım oranlarını belirlemek için malzeme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada betonarme kirişlere uygulanacak boyutla üretilmiş UYPB plakalar test edilmiştir. Son olarakta kirişler UYPB plakalarla güçlendirilip test edilmiş, UYPB plakaların eğilme yetersizliğine sahip kirişlere dayanım ve davranış katkısı belirlenmiştir.

Deney elemanlarının üretilmesinde donatı, beton ve UYPB plaka kullanılmıştır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri, numuneler üzerinde laboratuvarında gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve aynı lottan temin edilmiş inşaat demiri kullanılmıştır.

2.1. Ultra yüksek performanslı beton (UYPB)

UYPB agrega iskeleti 0-0,4 mm ve 0,5-1 mm kuvars agregalardan oluşmaktadır. Portlant çimentosu (CEM I 42,5 R) ve silika dumanı bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada yeni nesil polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Lif olarak düz tip, 13 mm uzunlukta 0,20 mm çapında en boy oranı 0,65 olan pirinç kaplı çelik mikro lifler

tercih edilmiştir. Liflerin doğrudan çekme dayanımı 2750 MPa'dır.

0.16 su/bağlayıcı oranına sahip UYPB tasarımları Tablo 1'de sunulmaktadır. Düşük su/bağlayıcı oranı ve lif takviyesiyle 200 MPa basınç, 40 MPa eğilme dayanımının yakalanması hedeflenmiştir. Bununla beraber aşırı düşük su/bağlayıcı oranlarında hidrate olmamış tanecik sayısının arttığı bilinmektedir [17]. Yüksek hacimli liflerde yeterli işlenebilirliği sağlamak için UYPB karışımları hacimce %68 hamurdan oluşmaktadır. Homojen UYPB matrisi elde etmek için özel bir karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Lif hacminin işlenebilirlik üzerinde etkisini açıklığa kavuşturmak için akışkanlaştırıcı dozajı sabit tutulmuştur. Hobart mikserde hazırlanan karışımlar 40×40×160 mm³ boyutlarındaki prizmatik kalıplara dökülmüştür. UYPB karışımları üç katman halindeki kalıplar içerisine dökülerek her bir katman dış vibrasyon esnasında çelik çubuk ile 25 vuruş kullanılarak sıkıştırılmıştır.

Harç yayılma testi ASTM C1437 ile uygun olarak gerçekleştirilmiştir [26]. Karışımların mekanik performansı 28 günlük standart küreleme işleminden sonra değerlendirilmiştir.

2.1.1. Yaş durum performansı

Ön hazırlık testleri çelik mikroliflerin işlenebilirlik düşürme etkisi ile başa çıkabilmek için %68 hacimde yapıştırıcıya ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Lif olmadan düzgün karışım elde etmek için yaklaşık 150 mm akış çapı amaçlanmış ve her bir fiber hacmi için sabit akışkanlaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Sonuç olarak %1 oranında çelik lif hacmi karıştırma esnasında kesme kuvvetini arttırarak işlenebilirliği iyileştirirken yüksek hacimlerde yayılma çapında dikkate değer azalmaya neden olmuştur (Şekil 1). Bu azalma liflerin işlenebilirlik etkisine bağlı ilave iç sürtünmeye ve aşırı derecede düşük su/çimento oranına sahip karışımların yüksek viskozitesine atfedilebilir. Her şeyden önce taze karışımları

vibrasyon ve el operasyonları aracılığıyla kalıpların içerisinde kolayca dökmek mümkündür. Ancak taze UYPB yüzeyini %4 lif hacminde uygun şekilde bitirmek mümkün değildir.

2.1.2. Mekanik performansı

0-0,4 mm ve 0,5-1 mm boyutlu agrega kullanılan lifsiz UYPB'nin ortalama basınç dayanımı 109 MPa elde edilmiştir. Ortalama basınç dayanımı %1, %2, %3 ve %4 çelik lif hacimlerinde sırasıyla 155, 185, 204 ve 214 MPa olarak elde edilmiştir.

Eğilme performansını değerlendirmek adına 6 mm sehime kadar çizilen, farklı lif hacimlerine sahip karışımların eğilme yükü - orta nokta sehimi eğrileri Şekil 2'de sunulmaktadır. Lif hacmi, karışımların davranışını dikkate değer şekilde etkilemiştir. Lifsiz UYPB'nin yük taşıma kapasitesi ve nihai sehim değerleri lifin dahil edilmesi sonucunda dikkate değer şekilde artmıştır. Eğilme yüklemesi altında tüm lif hacimleri ilk çatlaktan sonra daha yüksek bir yük seviyesine erişerek deformasyon sertleşmesine ve sünek davranışa neden olmuştur [26,27]. %2 lif hacmine kadar maksimum yükler önemli oranda artmıştır.

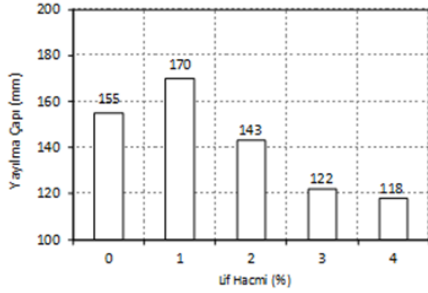
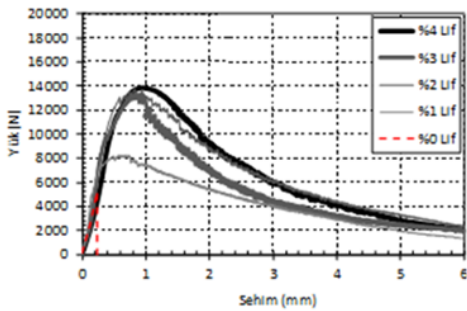
Lifsiz karışım 16 MPa ortalama eğilme dayanımı sergilemiştir. %1 ve %2 lif hacminde bu değer sırasıyla %56 ve %163 oranında artarak 25 MPa ve 42 MPa'ya erişmiştir. Lif kullanımının %3 ve %4 olması durumunda basınç dayanımındaki eğilimin aksine eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış oluşmamıştır. Lif hacmini arttırma hem eğilme hem de ilk çatlama dayanımını artırmıştır.

Sonuç olarak 40 MPa eğilme ve 200 MPa basınç dayanımı değerini yakalayan UYPB'yi elde edebilmek için %3 çelik mikro lif kullanımının gerekliliği görülmüştür. Çalışmada güçlendirme amacıyla kullanılacak plakaların imalatı için %3 lif hacmine sahip UYPB kullanılmıştır.

Tablo 1. UYPB karışım oranları.

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlarda lif oranları				
	0%	1%	2%	3%	4%
Su	200	200	200	200	200
Çimento	1000	1000	1000	1000	1000
Silis dumanı	250	250	250	250	250
0,5 – 1 mm kuvars	585	566	549	531	512
0 – 0,4 mm kuvars	251	243	235	227	220
Mikro çelik lif (13 mm)	-	71,7	143,4	215,1	286,8
Akışkanlaştırıcı (ACE450)	25	25	25	25	25
Tasarım Özellikleri					
Agrega hacmi (%)*	32				
Hamur hacmi (%)	68				
Su /Çimento	0,20				
Su / Çimento**	0,21				
Su/Bağlayıcı	0,16				
Su/Bağlayıcı**	0,17				

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir. ** Katkıdan gelen su ile.

**Şekil 1.** Lif kullanımının işlenebilirliğe etkisi**Şekil 2.** Lif hacmine bağlı olarak eğilme yükü - sehim eğrileri

2.2. Deney elemanlarının özellikleri

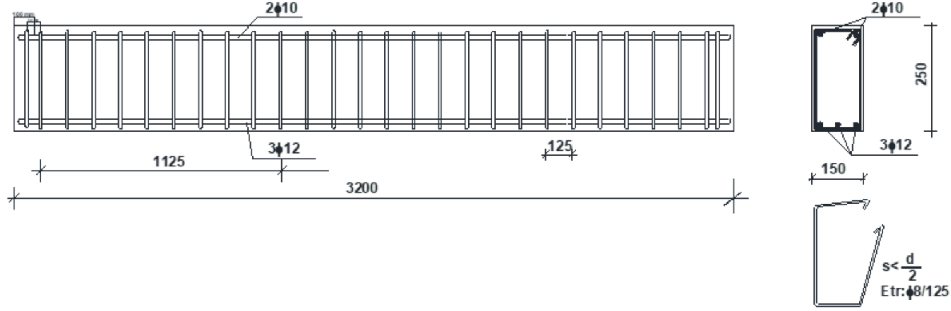
Eğilme yetersizliğine sahip deney elemanları toplamda 4 adet özdeş 150×250×3200 mm

boyutlarında ve tipik donatı yerleşimine sahip betonarme kirişlerdir.

Çalışmada UYPB plakaların eğilme dayanımına katkısının araştırılması hedeflendiği için deney elemanlarında buna uygun bir donatı düzeni belirlenmiştir. Donatı düzeni belirlenirken; güçlendirilmiş betonarme kiriş performansının yüklemeye çerçevesinin taşıma kapasitesini aşmaması ilkesi dikkate alınarak referans kirişin performansı belirlenmiştir. Kiriş tek doğrultuda iki eşit tekil yük altında test edileceği için kirişin çekme bölgesi her zaman kiriş alt yüzü olacaktır. Kirişin çekme bölgesinde 3 adet 12 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişin basınç bölgesinde ise 2 adet 10 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Eğilme yetersizliğine sahip kirişte kesme kırılmasını engelleyecek bir kesme donatı düzeni oluşturulmuştur. 8 mm çapındaki kesme donatıları 125 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Şekil 3'te kirişlerin donatı ayrıntılarını göstermektedir.

Mekanik özellikleri elde etmek için her bir çelik donatı türü gerilme altında test edilmiştir. Nervürlü donatıların akma dayanımı, kopma dayanımı ve elastisite modülü değerleri neredeyse aynıdır ve sırasıyla 470 MPa 574 MPa ve 205 GPa değerindedir.

Eğilme Yetersizliğine Sahip Deneysel Elemanı



Şekil 3. Eğilme dayanımı yetersiz deneysel elemanı

Beton için kullanılan agrega büyüklüğü 20 mm'dir. Dört adet silindirik numune dökülmüş ve beton basınç dayanımını belirlemek için kırışlar 28 günlükken test edilmiştir. Betonun ortalama basınç dayanımı 204 MPa'dır.

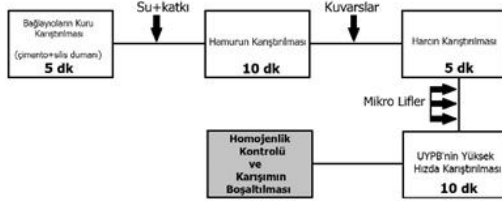
Kalınlık değişimine bağlı olarak eğilme performansında oluşacak değişikliği gözlemlemek amacıyla 3 farklı kalınlıkta UYPB plaka üretilmiştir. 30 mm, 50 mm ve 70 mm kalınlığa sahip plakalar incelenmiştir.

Plakaları üretebilmek için özel kalıplar kullanılmış, beton mikseri modifiye edilmiştir. Plaka üretimi için en önemli aşama yoğun lif oranına sahip yüksek dayanımlı betonu karıştırabilmektir. Çok düşük su/çimento oranlı kompozitleri karıştırmada, özellikle de yüksek döküm miktarlarında, geleneksel beton mikserleri işlev görememektedir. Yeterli kesme kuvvetini ve hızı uygulayabilen bir mikser gerekmektedir. Bu gereksinimleri sağlamak üzere laboratuvarında mevcut olan eski bir pan mikser modifiye edilmiştir. Pan mikserde, hazne kendi ekseninde dönmekteyken karışmayı sağlayan düşeydeki bıçaklar sabit durmaktadır. Beton mikserine titreşimsiz, uygun devirli yeni bir motor takılmıştır. Karıştırıcı bıçakların yoğun kıvamlı karışıma uygun olması için yeri ve açısı güncellenmiştir. Daha sonra sistem hız kontrollü hale getirilmiştir. Pan mikserin modifiyesi sonucu elde edilen UYPB mikseri Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. UYPB mikseri

Malzemelerin karıştırma prosedürü Şekil 5'te şematize edilmiştir. Plaka üretimine kullanılacak malzemeler hassas bir biçimde tartılarak başlanmıştır. Öncelikle bağlayıcı maddeler (çimento ve silis dumanı) 5 dakika boyunca düşük devirde karıştırılmıştır. Ardından karışım suyu ve akışkanlaştırıcıdan oluşan çözelti dönen mikserde eklenmiştir. 10 dakika içinde akıcı hamur oluşturulmuş, kuvars agregaları bu akıcı hamura eklenmiştir. Çelik lifler 13 mm uzunluğa ve çok ince bir çapa sahip olduklarından stokta topaklanmış durumdadır. El yordamı ile çelik liflerin ayrıştırılıp, serpiştirilerek harca eklenmesi ve oluşan UYPB karışımının nihai homojenliğe ulaşması için 10 dakika daha karıştırma sürdürülmüştür. Karışıma su katılmasından toplam 25 dakika sonra taze UYPB elde edilmiştir.



Şekil 5. UYPB karıştırma prosedürü

UYPB plakalar döküldükten sonra kalıptan sökülmesi için naylon örtülü numuneler laboratuvar ortamında 2 gün bekletilmiştir. Böylelikle ince elemanların (30 mm) sökülümünde oluşabilecek sorunların önüne geçilmiştir. Kalıptan sökülen numuneler ıslak şilteler ve üzerine naylon örtü ile sarılmıştır. Laboratuvar sıcaklığında (21 ± 3 °C) neme doymun ortamda 28 gün kür edilen numuneler iki gün laboratuvar ortamında kurumaya alındıktan sonra UYPB plakalar betonarme kirişlere epoksi reçine ile yapıştırılmıştır.

Epoksinin elastisite modülü ve eğilmede ortalama 7 günlük çekme dayanımı sırasıyla 5000 N/mm^2 ve $33,3 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Betonarme kiriş ile UYPB plakanın birbirlerine yapışması için yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. İlk olarak betonarme kirişin yüzeyi mekanik aşındırma ile pürüzlendirilmiş, basınçlı hava ile temizlenmiş ve astarlanmıştır. Yüzey istenen standartta olacak şekilde düzenlenince 2 mm kalınlıkta epoksi yapıştırıcı beton yüzeyine uygulanmıştır. Bundan sonra UYPB plaka basınçlı hava ile temizlenmiş ve epoksi kaplı kiriş yüzeyi üzerine yerleştirilmiştir. UYPB plakayı kirişe yapıştırmak için; kirişin uçlarına ve orta bölümüne yedi adet işkence kullanılmıştır. Bu işkenceler sadece lokal yapıştırma sağlamaktadır. Bu nedenle kiriş ve UYPB plaka arasında uygun yapışma sağlayabilmek için işkencelerin arasındaki her bir boşluğa 50 kg yük yerleştirilmiştir (Şekil 6). Sistem test edilmeden önce en az iki haftalık bir süreyle oda sıcaklığında küremeye bırakılmıştır. Kiriş altında çelik destekler koyarak benzer bir yapıştırma (bağlama sistemi) sahada uygulanabilir.



Şekil 6. UYPB plaka ile betonarme kirişin epoksi ile uygulanıp işkenceyle sıkıştırılması

Çalışmada 1 adet deney elemanı referans deney elemanı, diğer 3 adet deney elemanı ise farklı kalınlıkta UYPB plaka ile eğilme dayanımı artırılmış kirişlerdir. Referans kiriş deney elemanı Kiriş-1, 30 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney elemanı Kiriş-2, 50 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney elemanı Kiriş-3 ve 70 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney elemanı Kiriş-4 olarak isimlendirilmiştir.

2.3. Deney düzeneği

Kirişler dört noktalı eğilme yükleri altında test edilmiştir. Kirişlerin temiz açıklığı 3000 mm ve yükler arasındaki mesafe 300 mm'dir. Tüm testlerde aynı yükleme hızını elde edebilmek için yükleme kontrol makinesi kullanılmıştır. Yükleme işlemi numunelerde kırılma meydana gelene kadar uygulanmıştır. Üç adet birim deformasyon ölçer (LVDT) kirişin altına yerleştirilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden biri kirişin orta açıklığına yerleştirilmiş ve diğer ikisi mesnet noktalarına karşılık gelen kısma yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneğin şematik görünümünü ve ölçüm cihazlarının yerleşimi Şekil 7'de sunulmaktadır.

Kiriş, UYPB plakasının katkısını kaybettikten sonra 4710,07 kg yük seviyesine inmiştir. Epoksi ile yapıştırılan UYPB plaka kiriş yüzeyinden ayrılmamış ve 66,45 mm'ye kadar deplasman yapmaya devam etmiştir.

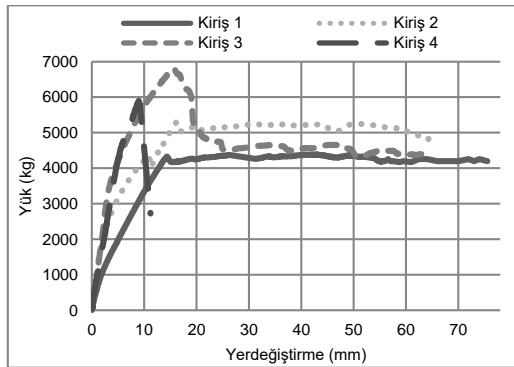


Şekil 10. 50 mm kalınlıklı UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı

Kiriş-4, 70 mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş test numunesidir. Deney elemanı 70mm kalınlığa sahip UYPB plaka yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney elemanında ilk eğilme çatlağı 5612,11 kg yük seviyesinde gelişmiştir. Bu yük seviyesinde orta mesnette 8,20 mm deplasman ölçülmüştür. Bu değer maksimum yükün yaklaşık %95'i kadardır. Bu esnada liflerden ses gelmeye başladığı anda (lifler devereğe girdiği anda) maksimum yük olan 5896,22 kg, 8,97 mm deplasman seviyesinde ani ve sesli olarak 70 mm kalınlıklı UYPB plaka kirişin arayüzünden ayrılmıştır. 11,21 mm deplasman ve 2723,71 kg seviyesinde diğer elemanlara göre gevrek davranış göstermiş ve göçme meydana gelmiştir.

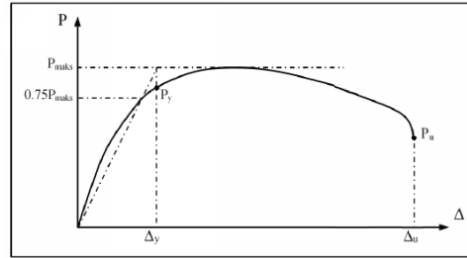


Şekil 11. 70 mm kalınlıklı UYPB ile güçlendirilmiş betonarme kiriş



Şekil 12. UYPB ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin 4 yük-deplasman eğrileri

UYPB kalınlık değişiminin süneklik üzerindeki etkisini belirleyebilmek için deney elemanlarının deplasman süneklikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak akma yükü (P_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) ve maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) değerleri yük deplasman eğrisinden elde edilmiştir. Akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde, ideal elasto-plastik davranıştaki akmayı esas alan azaltılmış rijitlik yaklaşımı kullanılmıştır [28-30]. Bu yaklaşımda akma yerdeğiştirmesi (Δ_y), kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin (P_{maks}) %75'ine karşılık gelen nokta ile yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç noktasını birleştiren bir doğrunun yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi [28].

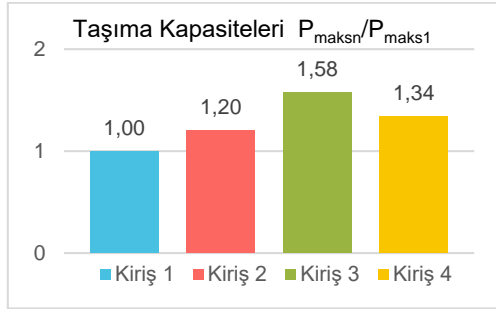
Tablo 2. Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler

Kiriş No	P_{cr} (kg)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kg)	Δ_y (mm)	P_{maks} (kg)	P_u (kg)	Δ_u (mm)	Δ_u / Δ_y	P_u / P_{maks}	E (kgmm)	E_n / E_1
Kiriş-1	1072,74	1,98	4406,19	14,31	4391,28	4278,73	75,53	5,28	0,97	269500,74	1,00
Kiriş-2	2350,45	2,74	5361,67	16,29	5285,79	4947,66	65,22	4,00	0,94	315989,60	1,17
Kiriş-3	3785,19	3,91	6931,01	15,81	6931,01	4484,71	66,45	2,68	0,65	287243,80	1,07
Kiriş-4	5612,11	8,20	5132,42	7,08	5896,22	2723,71	11,21	1,58	0,46	39842,95	0,15

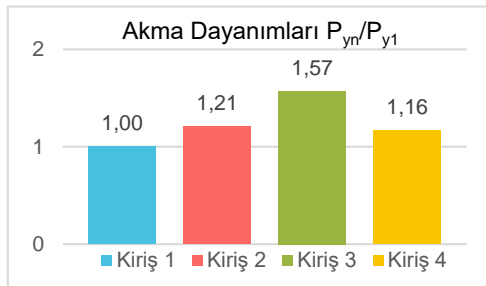
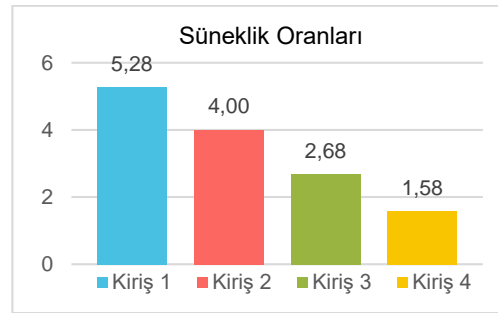
Uygulanan lifli UYPB plaklar sayesinde kirişlerin önemli deplasman yapar hale geldikleri gözlenmiştir. Maksimum yerdeğiştirme ve akma yerdeğiştirmesi kullanılarak her bir kiriş için yerdeğiştirme sünekliğini ifade eden (Δ_u/Δ_y) değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Farklı kalınlıkta UYPB plaka uygulanan kirişlerin süneklik değerleri ile referans kirişin süneklik değerleri Şekil 16'da karşılaştırılmıştır.

Kiriş 2, Kiriş 3 ve Kiriş 4'ün akma dayanımları sırasıyla 1,21, 1,57 ve 1,16'dır. Elemanların plastik şekil değiştirmeye başladığı gerilme, akma dayanımıdır. UYPB plaka uygulaması betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesini arttırmış ve bu durum akma dayanımlarının da artmasına sebep olmuştur. UYPB plaka uygulaması ile referans elemana göre sırasıyla %21, %57 ve %16 oranında artış meydana gelmiştir.

**Şekil 14.** UYPB kalınlıklarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

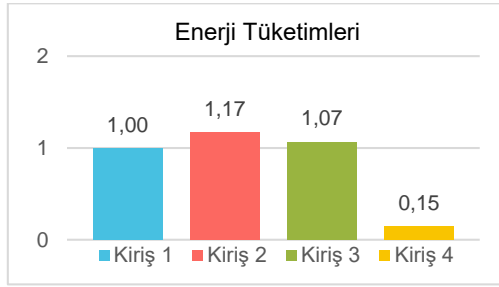
Şekil 14'te UYPB plaka uygulaması ile dayanım açısından elde edilen katkı sunulmuştur. Kiriş 3 referans elemana göre taşıma kapasitesinde %58 oranında artış sağlanmıştır. Bu değer çalışmada elde edilen en büyük dayanım artışıdır. Kiriş 4 %34'lük ve Kiriş 2 %20'lik artış sağlamıştır.

**Şekil 15.** UYPB kalınlıklarının akma dayanımlarının karşılaştırılması**Şekil 16.** UYPB kalınlıklarının süneklik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

Süneklik oranı; maksimum yerdeğiştirme değeri ile akma anına karşılık gelen yerdeğiştirme değerinin oranlanması ile hesaplanmıştır. Referans kiriş olan Kiriş 1'in yaptığı en fazla yerdeğiştirme 75,53 mm ile deneysel programda da elde edilen en yüksek yerdeğiştirme değeridir. Buna uygun olarak süneklik oranı da 5,28 ile en yüksek süneklik oranıdır. Kiriş 2, Kiriş 3 ve Kiriş 4'ün deplasman süneklikleri sırasıyla 4,00, 2,68 ve 1,58'dir. UYPB plaka uygulaması ile referans elemana göre %76, %51 ve %30 süneklik oranlarında azalma meydana gelmiştir. UYPB plaka betonarme kiriş ile birlikte çalışarak yük taşıma kapasitesini arttırmış ve elemanlardaki kalınlık değişimi referans kirişe göre deplasman yapma kapasitelerinde azalmaya sebep olmuştur. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla eleman daha rijit hale gelmiştir. Eğilme dayanımı yetersiz kirişe yapıştırılan bu plakalar, eğilme

bölgesinde rijit bir levha gibi davranarak kirişin deplasman yapma kapasitesini azaltmıştır.

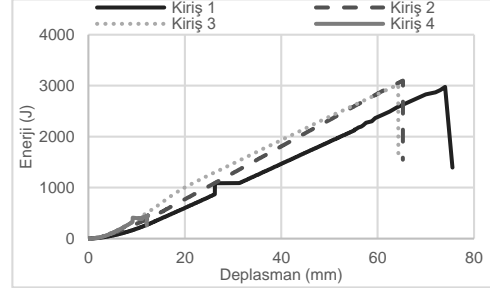
Süneklik genel olarak kırılmadan önce büyük plastik deformasyonlara uğrayabilme özelliği olarak tanımlanabilir. Ancak eğer deprem yükleri altında yapının taşıma kapasitesi yeterli değilse, süneklik miktarı bu enerjiyi sönmlemede yeterli olmayacaktır. Bu yapının dayanımını önemli ölçüde azaltan bir sorundur. Yapının deprem yükleri altında yeterli dayanıma sahip olabilmesi için hem sünek hem de taşıma kapasitesinin yeterli olması gereklidir. Deney elemanlarının donatı miktarı kesme dayanımına yeterli olacak şekilde tasarlandığı için akma dayanımına ulaşmaları beklenmektedir. Bu nedenle elemanların sünekliğini değerlendirirken sadece süneklik oranını karşılaştırmak yeterli olmayacaktır. Elemanların süneklik miktarını değerlendirirken süneklik oranına ek olarak enerji tüketimlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 17. UYPB kalınlıklarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması

Enerji tüketimi; deney elemanlarına uygulanan yük sonucunda çizilen yük-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Deney elemanlarının enerji tüketimleri göçmede hesaplanmıştır (Tablo 2). Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim oranları Şekil 17'de sunulmuştur. Deney elemanlarında süneklik oranlarının azalmasına rağmen taşıma kapasiteleri arttığı için enerji yutma kapasiteleri de artmıştır. En fazla enerjiyi Kiriş 2 tüketmiştir. Kiriş 2; 310703,03 kgmm enerji tüketmiştir. Deney elemanı referans elemanından 1,17 kat fazla enerji tüketmiştir. Bunu 1,07 kat ile Kiriş 3 takip etmiştir. Deney programında en az enerjiyi Kiriş 4 tüketmiştir. Deney elemanı referans elemandan %85 daha az enerji tüketmiştir. 70 mm kalınlığa sahip UYPB plaka betonarme kirişe yapıştırıldığında, deney

elemanının deplasman yapma kapasitesini sınırlandırmış bu nedenle eleman 39842,95 kgmm enerji tüketerek ani ve sesli olarak göçmüştür.



Şekil 18. UYPB kalınlıklarına göre enerji-deplasman grafiği

Deney elemanlarının enerji-deplasman grafiği Şekil 18'de sunulmuştur. UYPB kalınlığının artmasıyla dayanımı artan deney elemanlarında bu artışa paralel bir enerji yutma kapasitesi artışı gözlenmemiştir. Kiriş 3 Kiriş 2'ye göre daha az enerji tüketmiştir. Kiriş 4'te UYPB plaka kalınlığının artmasıyla rijitlik artmakta ve elemanların deplasman yapma kapasiteleri azalmaktadır. Bu da elemanların enerji yutma kapasitelerini azaltmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda UYPB plakalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme testleri yapılmış ve kalınlık değişiminin eğilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- %3 oranında lifli UYPB ile eğilme dayanımı 40 MPa ve basınç dayanımı 200 MPa değerini aşan, optimum işlenebilirlik sağlayan UYPB üretilmiştir.
- Gerçekleştirilen deneylerde UYPB plakalar eğilme dayanımı yetersiz kirişlere yapıştırılmıştır. Referans elemana göre taşıma kapasitesinde en düşük %20, en yüksek %58 oranında artış sağlanmıştır.
- Yerdeğiştirme sünekliğinde referans elemana göre en fazla %80 ve en az %30 oranında azalma meydana gelmiştir. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla eleman daha rijit hale gelmiştir.
- Güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırmış ve bu durum

akma dayanımlarının da artmasına sebep olmuştur. Referans elemana göre en fazla %57 oranında artış sağlanmıştır. UYPB plaka kalınlığının artması ile akma dayanımı artmıştır.

- Enerji yutma kapasitesi en fazla olan eleman Kiriş 2'dir. Referans elemana göre %17 oranında artış sağlanmıştır. Kiriş 4'te UYPB plaka kalınlığının artması ile eleman daha rijit davranış göstermiş ve akabinde UYPB plakanın beton yüzeyinden ayrılmasıyla enerji yutma kapasitesinde azalma gözlenmiştir.

Teşekkür

114M2257 numaralı araştırma projesi ile çalışmaya destek olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve betonarme elemanların üretilmesi sürecinde sundukları destekler için Yeni Prefabrik Beton İnşaat San. Ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Tanarşlan H.M., Alver N., Jahangiri R., Yalçınkaya Ç., Yazıcı H. 2017. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Construction and Building Materials* DOI:155 (2017) 45–55
- [2] Tanarşlan H.M. 2017, Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates, *Engineering Structures* DOI:151 (2017) 337–348
- [3] Oehlers D.J., Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits, *J.Struct. Eng.* 118 (1992) 2023–2038, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:8\(2023\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:8(2023)).
- [4] Souza R.H.F., Appleton J., Flexural behaviour of strengthened reinforced concrete beams, *Mater. Struct.* 30 (1997) 154–159, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02486387>.
- [5] Yurdakul Ö., Avsar Ö., Strengthening of substandard reinforced concrete beamcolumn joints by external post-tension rods, *Eng. Struct.* 107 (2016) 9–22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.004>.
- [6] Altun F., An experimental study of the jacketed reinforced-concrete beams under bending, *Constr. Build. Mater.* 18 (2004) 611–618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.005>.
- [7] Alhadid M.M.A., Youssef M.A., Analysis of reinforced concrete beams strengthened using concrete jackets, *Eng. Struct.* 132 (2017) 172–187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.014>.
- [8] Tetta Z.C., Koutas L.N., Bournas D.A., Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, *Compos. Part B Eng.* 77 (2015) 338–348, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055>.
- [9] Spadea G., Bencardino F., Swamy R.N., Structural behavior of composite rc beams with externally bonded CFRP, *J. Compos. Constr.* 2 (1998) 132–137, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:3\(132\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:3(132)).
- [10] Lamanna A.J., Bank L.C., Scott D.W., Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips, *J. Compos. Constr.* 8 (2004) 203–210, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(203\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(203)).
- [11] Al-Saidy A.H., Saadatmanesh H., El-Gamal S., Al-Jabri K.S., Waris B.M., Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets, *Mater. Struct.* 49 (2016) 3733–3747, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0751-y>.
- [12] Brühwiler, E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III* – Alexander et al. (eds), 2008.
- [13] Kang S.-T., Ryu G.-S., The effect of steel-fiber contents on the compressive stress-strain relation of ultra high performance cementitious composites (UHPCC), *J. Korea Concr. Inst.* 23 (2011) 67–75, <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.1.067>.
- [14] Ghafari E., Costa H., Júlio E., RSM-based model to predict the performance of selfcompactingUHPCC reinforced with hybrid steel micro-fibers, *Constr. Build.Mater.* 66 (2014) 375–383, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.064>.
- [15] Ghafari E., Arezoumandi M., Costa H., Júlio E., Influence of nano-silica addition in the durability of UHPCC, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 181–188, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.009>.
- [16] Ghafari E., Costa H., Júlio E., Portugal A., Durães L., The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete, *Mater. Des.* 59 (2014) 1–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>.
- [17] Yalçınkaya Ç., Yazıcı H., Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPCC with high-volume mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 252–259, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.198>.
- [18] Mahmud G.H., Yang Z., Hassan A.M.T., Experimental and numerical studies of size effects of ultra high performance steel fibre reinforced concrete (UHPFRC) beams, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 1027–1034, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.061>.
- [19] Hassan A.M.T., Mahmud G.H., Jones S.W., Whitford C., A new test method for investigating punching shear strength in ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) slabs, *Compos. Struct.* 131 (2015) 832–841, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.044>.
- [20] Singh M., Sheikh A.H., Mohamed Ali M.S., Visintin P., Griffith M.C., Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams, *Constr. Build. Mater.* 138 (2017) 12–25,

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.002>.
- [21] Prem P.R., Murthy A.R., Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 481–492, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.033>.
- [22] M.A. Al-Osta, M.N. Isa, M.H. Baluch, M.K. Rahman, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 134 (2017) 279–296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>.
- [23] Mohammed T.J., Abu Bakar B.H., Bunnori N.M., Strengthening of reinforced concrete beams subjected to torsion with UHPFC composites, *Struct. Eng. Mech.* 56 (2015), <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2015.56.1.123>.
- [24] Meda A., Mostosi S., Rinaldi Z., Riva P., Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket, *Mater. Struct.* 49 (2016) 1967–1978, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0627-1>.
- [25] Abdullah M.A.H., Mohd Zahid M.Z.A., Abu Bakar B.H., Nazri F.M., Ayob A., UHPFRC as repair material for fire-damaged reinforced concrete structure – a review, *Appl. Mech. Mater.* 802 (2015) 283–289, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.802.283>.
- [26] Yalçınkaya Ç., Yazıcı H., Effect of early-age freeze-thaw exposure on the mechanical performance of self-compacting repair mortars, *Sci. Eng. Compos.Mater.* 23 (2016) 335–344, <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2014-0006>.
- [27] Beglarigale A., Yalçınkaya Ç., Yigiter H., Yazıcı H., Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature, *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 99–108, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.034>.
- [28] Park R. 1988. Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto, 8, 605-616.
- [29] Türker, K., Birol, T., Yavas, A. ve Hasgül, U., Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirislerde Etkin Çelik Lif Tipi İncelemesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 776-785, (2016).
- [30] Türker, K., Birol, T., Yavas, A., Hasgül, U. ve Yazıcı H., Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Üretilmiş Betonarme Kirislerin Eğilme Davranışı, *Teknik Dergi*, 2019 8777-8801, Yazı 523, DOI:10.18400/tekderg.287116.
- [31] Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. Yerlikaya M., Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, *TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri* Sayı:426 - 2003/4