



Uzun ve kısa çelik lif takviyeli tam ölçekli kirişlerin aderans dayanımı

Bond strength of full-scale beams with blended short and long steel fiber

Kazım TÜRKİ¹ , Mahmut BAŞSÜRÜCÜ² 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye.

kazim.turk@inonu.edu.tr

²İnşaat Teknolojisi Programı, Darende Bekir Ilıcak Meslek Yüksekokulu, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye.

mahmut.bassurucu@ozal.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.03.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 14.07.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.34846

Kabul Tarihi/Accepted: 19.08.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, tek ve karma lif takviyesinin aderans dayanımına etkisini incelemek için altı adet tam ölçekli 200x300x2000 mm boyutlarında betonarme kiriş numunesi dört noktali eğilme altında test edilmiştir. Bu amaçla, betonarme kiriş numuneleri lif takviyesiz, tek lif (%1 makro çelik lif) ve karma lif (%0.8 makro ve %0.2 mikro çelik lif) takviyeli olarak döküldü. Her bir kiriş numunesi, çekme bölgesinde iki adet donatı çeliğinin açıklık ortasında bindirmeli ekli olarak tasarlanmıştır. Bindirme boyu donatının akma dayanımına ulaşmadan önce bindirme bölgesinde beton örtüsünün yarılmasıyla aderans geçmesi gösterecek şekilde seçilmiştir. Deneysel çalışmada, donatı çapı, bindirme boyu ve donatı detayları sabit tutulurken, lif tip ve kombinasyonları değişken olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, lif takviyeli tüm betonarme kiriş numunelerinin beton ve çelik donatı arasındaki aderans dayanımı, lif takviyesiz kiriş numunelerine göre artış gösterirken, karma lif takviyeli kiriş numunelerinin aderans dayanımı ise en yüksek bulunmuştur. Karma lif takviyeli kiriş numunelerinde sünek göçme gözlemlenmiş ve çoklu çatlak davranışı sonucu genişliği daha az fakat daha fazla sayıda çatlak oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, lif takviyeli kiriş numunelerinden elde edilen aderans dayanımına ait deneysel verilerin, analitik bulgularla çok iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Aderans dayanımı, Bindirme boyu, Karma lif takviyeli beton, Tam ölçekli betonarme kiriş, Lif kombinasyonu.

Abstract

In this study, six reinforced concrete (RC) beams with the sizes of 200x300x2000 mm were tested under four-point bending to investigate the effect of single and hybrid fiber reinforced on the bond strength of reinforcing bar. For this purpose, the reinforced beams were cast as no fiber, single fiber (1% macro steel fiber) and hybrid fiber (0.8% macro and 0.2% micro steel fiber) reinforced. Each beam was designed to include two bars in tension, spliced at the center of the span. The splice length was selected so that bars would fail in bond, splitting the concrete cover in the splice region, before reaching the yield point. In experimental work, the diameter of bars, splice length and bar details was selected as constant while the fiber type and combination was variable. Finally, it was found that all beams with steel fiber reinforced had higher bond strength between concrete and steel bar than the beams without steel fiber while the beams with hybrid steel fiber reinforced had highest bond strength. A ductile failure was observed in the hybrid fiber reinforced beam specimens and it was determined that the result of multiple-crack behavior less crack width but more numbers cracked. Moreover, experimental data related to the bond strength obtained from RC beams with steel fiber were in very good agreement with analytical results.

Keywords: Bond strength, Splice length, Hybrid-Fiber reinforced concrete, Full-Scale RC beams, Fiber combination.

1 Giriş

Bilindiği üzere, çelik donatı ve betondan oluşan kompozit yapı malzemesi betonarme olarak tanımlanmaktadır. Betonarme elemanlar tasarlanırken, betonun basınç ve çelik donatının ise çekme gerilmelerini karşılaması prensibi esas alınır. Bunun yanında, çelik donatı ve betondan oluşan kompozit malzemeye betonarme denilebilmesi için, bu iki malzeme arasındaki aderansın şartnamelerin belirlediği düzeyde sağlanması gerekmektedir. Betonarme yapı elemanlarının yüke maruz kalması durumunda, yük adezyon ve mekanik kenetlenme vasıtasıyla asal donatı ve onu saran beton arasında aktarılmaktadır. Bu yük aktarımı için gerekli olan çelik donatı ve beton arasındaki yeterli aderans donatının beton tarafından yeterince sarılması ile sağlanabilir. Nervürlü donatı kullanıldığında, mekanik kenetlenme, donatıyı saran betona karşı donatı nervürlerinin kamalanması şeklinde oluşur. Bu mekanik kenetlenme durumu, donatı nervürleri tarafından oluşturulan çevresel basınç sebebiyle donatıyı saran betonun yarılmasının sonucu olarak ortaya çıkan ve genelde betonarme elemanlar için yaygın olarak kabul edilen bir yük aktarım mekanizmasıdır [1]. Çekme donatısı bindirmeli ekleri, dört

noktalı eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numunelerinin sabit moment bölgesinde yapılır. Tüm durumlar için, deforme olmuş donatı çeliğinin etrafında bulunan beton üzerindeki kama hareketleri, aderans geçmesine yol açan yarılmaya neden olurlar [2]. Bu tip bir aderans geçmesi, eğilme elemanları olan betonarme kiriş ve döşemelerde yaygın olarak görülebilmektedir. Aderans geçmesi, betonun malzeme özelliklerinin yanı sıra çekme donatısı oranı ve konumu gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, beton ve donatı çeliği arasındaki bu mekanizmayı etkileyen bütün faktörlerin araştırılması gerekmektedir.

Normal betonda geleneksel donatı yerine veya ek olarak lif kullanımı ile ilgili çalışmalar uzun zamandır yürütülmektedir. Bunun yanında, betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi ve yapı elemanlarının davranışını önemli ölçüde iyileştirmek için de çelik lif takviyesi tercih edilmektedir [3]-[6]. Betona çelik liflerin takviye edilmesiyle, betonarme bir yapı elemanının çatlak sonrası davranış, çatlak kontrolü, süneklik ve aderans açısından ciddi iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir [7],[8]. Birden fazla lif tipinin karışımı ile beton matrisinin birleşiminden oluşan lif takviyeli betona

*Yazışılan yazar/Corresponding author

karma lif takviyeli beton adı verilmektedir [9]. Beton karışımlarında karma çelik lif takviyesi görüşü ilk olarak Rossi ve diğ. [10] tarafından önerilmiştir. Karma lif takviyeli betonda, mikro çatlakların başlaması ve yayılımını kontrol eden küçük mikro lifler ile makro çatlakların kontrolü üzerinde etkili olan büyük ve güçlü liflerin birlikte kullanımı mühendislik açısından çok önemli avantajlar sunar [11].

Türk ve Yıldırım [12] tarafından yapılan çalışmada, donatı ve beton arasındaki aderans dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Büyük ölçekli dokuz adet kiriş numunesi üretilerek, dört noktalı eğilme yüklemesi altında test edilmiştir. Çalışma sonucunda donatı çapı arttıkça, aderans dayanımı ve sünekliğin azaldığı ancak rijitliğin arttığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise, yükleme koşulları ve donatı çapının aderans dayanımına etkisi incelenmiştir. 1900x270x180 mm boyutlarına sahip dokuz adet tam ölçekli kiriş numunesi dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Çalışmada üç farklı donatı çapı (12, 16 ve 22 mm) değişken olarak kullanılmış ve iki çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirme ekli olarak tasarlanmıştır. Yüklemede üç kiriş eksenel yükleme olmadan (pozitif moment), diğer altı kiriş ise eksenel yükü olarak (bileşik yükleme) test edilmiştir. Sonuçta, bileşik yüklemede aderans dayanımı ve rijitliğin donatı çapına bağlı olmaksızın arttığı belirlenmiştir [13]. Karatas ve diğ. [14] tarafından yapılan çalışmada ise, geleneksel beton ile çimento yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı içeren kendiliğinden yerleşen betondan üretilmiş büyük ölçekli kiriş numuneleri test edilerek, silis dumanı miktarının aderans dayanımına etkisi incelenmiştir. Yapılan araştırmada, çimento yerine %5 ve %10 silis dumanı kullanımının en yüksek aderans dayanımı sağladığı belirlenmiştir.

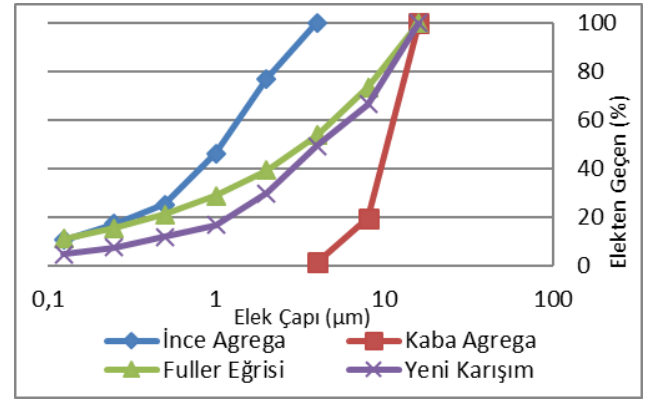
Son zamanlarda, betona lif ilave edilmesinin betonun çekme dayanımındaki iyileşmenin yanı sıra, aderans dayanımında iyileşmeye sebep olup olmayacağı araştırmacılar tarafından merak konusu haline gelmiştir. Çatlaklardaki liflerin köprüleme etkisinden dolayı aderans dayanımını önemli miktarda arttırdığına dair birçok çalışma bulunmaktadır. Lagier ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada, ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonda lif takviyesinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gelişen aderans dayanımının çatlak öncesinde ve sonrasında betonun gelişen çekme kapasitesiyle ilgili olduğu belirtilmiştir. Çelik yapılarıdaki kompozit döseme sisteminde kullanılan çelik sac ile beton arasındaki aderansın geliştirilmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalarda [16],[17] ise, hacimce %1 ve %1.5 oranında betona çelik lif takviyesinin boyuna kayma dayanımını ve sünekliği arttırdığı bulunmuştur.

Literatürde genelde donatı aderans dayanımının belirlenmesinde küçük ölçekli çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri mevcutken, bu çalışmada, aderans dayanımının daha gerçekçi belirlenmesi için karma lif takviyeli geleneksel betondan üretilmiş büyük ölçekli kirişlerin dört noktalı pozitif eğilme altında test edilmesi önemli özgünlüklerdendir. Ayrıca, beton teknolojisindeki inovatif gelişmelerin sonucu olarak geleneksel betona karma lif ilavesinin betonarme kiriş elemanlardaki donatının aderans dayanımına etkisinin araştırılması ve bu alandaki literatüre katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, kiriş numuneleri lif takviyesiz, tek lif ve karma lif takviyeli olarak, çekme bölgesinde iki adet çelik donatının açıklık ortasında bindirme ekli şekilde tasarlanmıştır. Deneyler sonucunda kiriş numunelerinin aderans dayanımları, deney bulgularının ampirik formülle karşılaştırılması, göçme modu ve çatlak yapıları incelenmiştir.

2 Deneysel program

2.1 Malzemeler ve beton karışım oranları

Bu çalışmada, tüm beton karışımlarında bağlayıcı olarak CEM I 42.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Karışımların hazırlanmasında iki farklı grup agrega kullanılmıştır. Birinci grup agregaların dane boyutları 0-5 mm, özgül ağırlığı ve su emme oranı sırasıyla 2.53 ve %1.90'dır. İkinci grup agregaların dane boyutları ise 5-15 mm olup, özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi sırasıyla 2.62 ve %0.50'dir. Agregaların maksimum dane boyutu 16 mm olup dane dağılımına ait granülometri eğrileri Şekil 1'de sunulmuştur.

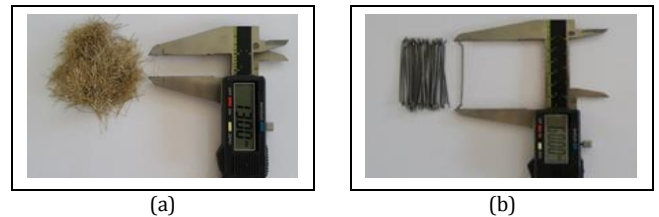


Şekil 1. Beton karışımlarında kullanılan agrega yığınlarının granülometri eğrileri.

Figure 1. Grading curve of aggregate used in concrete mixtures.

Granülometri eğrilerinden de görüleceği üzere agrega yığını, iri malzeme miktarının daha fazla olduğu bir dane dağılımına sahiptir. Bu sebeple, karışımlara ilave edilen çelik liflerin daha uniform dağılımını sağlamak ve kaba agreganın işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için, beton karışım tasarımında, 0-5 mm ince agrega yığınından %60 ve 5-15 mm kaba agrega yığınından ise %40 oranında karışıma dahil edilerek yeni agrega karışımına ait graülometri eğrisi elde edilmiştir. Tüm karışımlarda benzer işlenebilirlik özelliklerini elde etmek için, Sika yapı kimyasalları firmasından temin edilen ve özgül ağırlığı 1.09 olan polimer esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Ayrıca, beton karışımlarının çekme ve eğilme dayanımları ve dolayısıyla çelik donatının aderans dayanımını arttırmak amacıyla makro (uzun) ve mikro (kısa) çelik lifler tekli ve karma olarak beton karışımlarına katılmıştır. Kullanılan makro (Dramix 65/60) ve mikro (OL 13/.16) çelik liflerinin formu Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan çelik liflerin mekanik ve geometrik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Beton karışımlarında kullanılan makro ve mikro çelik lif formu.

Figure 2. Macro and micro steel fiber form used in concrete mixtures.

Tablo 1. Beton karışımlarında kullanılan portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri (%).

Table 1. Physical and chemical properties of Portland cement used in concrete mixes.

Kompozisyon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
PC	19.41	5.58	3.67	58.85	2.12	3.16	0.69	0.61	3.15

Tablo 2. Makro ve mikro lif özellikleri.

Table 2. Macro and micro fiber properties.

Lif	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (kg/m ³)
Makro (Dramix 65/60)	0.92	60	65	2300	210	7850
Mikro (OL 13/.16)	0.15	13	87	3000	200	7200

Çalışmada, üç tip beton karışımı tasarlanmış olup, lif takviyesiz kontrol betonu, yalnızca %1.00 makro lif takviyesi içeren tek tip lif takviyeli beton karışımı ve %0.80 makro ile %0.20 mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli beton karışımları kullanılmıştır. Karışımların etiketlenmesinde MAK ve MİK sırasıyla, makro ve mikro çelik lifi temsil etmekte olup, önündeki değer ise yüzde hacim cinsinden lif takviyesi miktarını göstermektedir. Örneğin, MAK0.80_MİK0.20 kısaltması %0.80 makro (uzun) ve %0.20 mikro (kısa) çelik lif içeren karışımı belirtmektedir. Beton karışım oranları ile karışımlara ait taze beton çökme değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

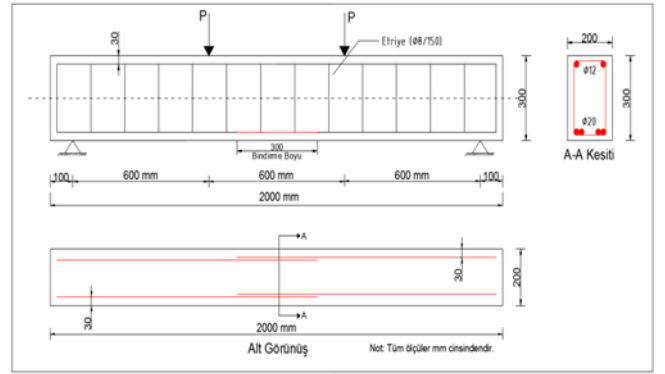
2.2 Büyük ölçekli kiriş numuneleri

Bu çalışmada, lif takviyesiz kontrol, tek lif takviyeli ve karma lif takviyeli beton karışımlarından üretilen toplam altı adet tam ölçekli bindirme ekli betonarme kiriş numunesi (200x300x2000 mm) dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Karma lif etkisinin donatının aderans dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için bindirme boyu tüm kiriş numunelerinde donatı çapının katı olarak 15Ø (300 mm) şeklinde belirlenmiştir. Bu değer, tüm kiriş numunelerinde çelik donatının akma dayanımına ulaşmadan aderans göçmesi gösterecek şekilde seçilmiştir. Deneysel çalışmada, donatı çapı, bindirme boyu ve donatı detayları sabit tutulurken, lif kombinasyonları (lifsiz, tek lif ve karma lif takviyeli) değişken olarak belirlenmiştir. Betonarme kiriş numune detayları Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te görüleceği gibi, kiriş numuneleri çekme etkisinde ve açıklık ortasında üst üste bindirilmiş Ø20 asal donatı, 2 adet Ø12 montaj donatısı ve Ø8/150 mm etriye donatısı yerleştirilmesiyle tasarlanmıştır. Her bir kiriş numunesinin değişkenlerini göstermek için iki kısmı notasyon sistemi kullanılmıştır. Notasyonun birinci kısmı, kiriş numunesini göstermektedir. İkinci kısım ise lif takviyesi kombinasyonunu temsil etmektedir. Örneğin, K-KRLF notasyonu kiriş numunesinin karma çelik lif takviyeli olarak üretildiğini göstermektedir.



Şekil 3. Büyük ölçekli betonarme kiriş numuneleri hazırlanması. (a): donatı teşkili, (b): Beton dökümü.

Figure 3. Production of full-scale reinforced concrete beam specimens. (a): Reinforcement detail. (b): Concrete casting.



Şekil 4. Kiriş numune detayları ve yükleme durumu.

Figure 4. The details of beam specimens and loading condition.

Tüm kiriş numunelerinin uzunluğu 2000 mm ve mesnetler arası açıklık ise 1800 mm olarak belirlenmiştir. Uygulanan iki yük arasındaki mesafe ya da sabit moment bölgesinin uzunluğu 600 mm'dir. Çekme donatısı çapı 20 mm ve donatı detayları tüm kiriş numuneleri için aynı alınmıştır. Tüm kiriş numunelerinde kesme göçmesini engellemek için etriye donatısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, tüm kiriş numunelerinde 482.1 MPa akma dayanımına sahip 20 mm çapında çekme donatısı kullanılmıştır.

Şekil 3'te gösterildiği gibi, teşkil edilen kiriş donatıları, çelik kalıplar içerisine yerleştirilmiştir. Beton karışımları, Yapı Laboratuvarı'nda bulunan 350 l kapasiteli betoniyer kullanılarak hazırlanmıştır. Beton karışımları hazırlanırken öncelikle ince agreg, kaba agreg, makro çelik lif ve karışım suyunun üçte ikisi eklenerek karıştırılmıştır. Daha sonra, betoniyer döndüğü esnada, üniform dağılım sağlamak için mikro çelik lifler karışıma azar azar eklenerek toplamda 4 dk. boyunca karıştırma işlemi devam etmiştir. Ardından, çimento ile birlikte farklı bir kaptaki karıştırılmış süperakışkanlaştırıcı ve karışım suyunun üçte birlik kısmı betoniyer içerisine katılmış ve 8 dk. daha karıştırma işi yapılmış olup, tüm karışımlar toplamda 12 dk. karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan karışımlar iki aşamada sıkıştırılma işlemine tabi tutulmuş olup, önce beton kiriş kalıplarının yarısına kadar doldurularak sıkıştırma işlemi yapıldıktan sonra ikinci aşamada tüm kiriş kalıbı doldurularak sıkıştırma işlemi tamamlanmıştır. Sıkıştırma işlemi, betonun kiriş kalıplarına yerleştirildikten sonra bütün numunelerde eşit aralıklı aynı sürede vibrasyon işlemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Betonarme kiriş numuneleri 24 sa. sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca ıslak çuval bezlerle sarılı bir şekilde naylon örtü altında kür edilmiştir. Tüm numuneler 28 günlük kür periyodu sonunda test edilmiştir.

Tablo 3. Beton karışım oranları (kg/m³).

Table 3. Concrete mixtures proportions (kg/m³).

Karışım Adı	Çimento	Su	Çelik Lif		Agrega		Normal Akışkanlaştırıcı	Çökme (mm)
			Makro	Mikro	0-5 mm	5-15 mm		
KONTROL	350	200	0	0	1025	684	8	12
MAK1.00	350	200	78.5	0	1004	670	12	12
MAK0.80_MİK 0.20	350	200	62.8	14.4	1001	668	12	9

Tablo 4. Betonarme kiriş numune özellikleri.

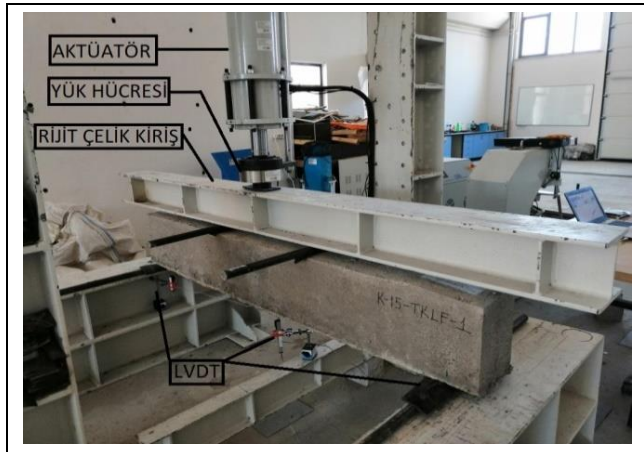
Table 4. The properties of reinforced concrete beam specimens.

Kiriş Numune Adı	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Kiriş Uzunluğu L (mm)	Kiriş Genişliği b (mm)	Kiriş Yüksekliği h (mm)	Donatı Çapı (Φ) (mm)	Bindirme Boyu (mm)	Lif Oranı (%)	
							Makro	Mikro
K-LFSZ	41.05		200	300	20	300	-	-
K-TKLF	38.30	2000	200	300	20	300	1.00	-
K-KRLF	43.51	2000	200	300	20	300	0.80	0.20

2.3 Deney düzeneği

Deplasman kontrollü dört noktalı eğilme yüklemesi düzeneğine ait çelik yük çerçevesi sistemi Şekil 5'te gösterilmiştir. Kiriş numuneleri 1800 mm açıklıklı ve basit mesnetli olarak göçme meydana gelene kadar test edilmiştir. 800 kN kapasiteli yüklem çerçevesi sisteminde yüklem hızı tüm numuneler için 1.2 mm/dk. olarak belirlenmiş ve testler yaklaşık 20 dk. sürmüştür. Aktüatör'den gelen yük, rijit bir çelik kiriş yardımıyla kiriş numunelerine iki eşit yük şeklinde aktarılmıştır.

Yapılan tüm kiriş numunesi deneylerinde, düşey yük değeri yük hücresi ve deplasmanlar ise LVDT yardımıyla ölçülmüştür. Ayrıca kiriş ön yüzlerinde oluşan çatlaklar, test sonrası işaretlenmiştir.



Şekil 5. Kiriş numunesi test düzeneği.

Figure 5. Beam specimens test setup.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Aderans dayanımı

Büyük ölçekli bindirmeli ekli kiriş numunelerinin aderans dayanımının tespiti amacıyla gerçekleştirilen testler

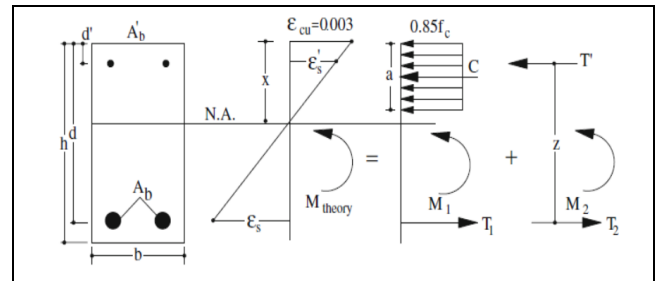
sonucunda elde edilen bulgular Tablo 5'de özetlenmiştir. Test sonucu elde edilen moment (M_{max}), göçme anındaki her bir kiriş numunesinin sabit moment bölgesinde elde edilen maksimum moment değerini ifade etmektedir. Tüm kiriş numunelerinde göçme modu, bindirme ekinin maksimum kapasitesine ulaştığını gösteren yarıлма şeklindedir. Bu nedenle aderans dayanımı, bindirme ekli donatı çeliğinde oluşan gerilme (f_s) aracılığıyla belirlenebilmektedir. Çünkü Denklem (1)'de bindirme ekli donatı çeliğinin sürekli olduğu göz önünde bulundurularak, donatı çeliğinde göçme anında oluşan çekme gerilmesi hesaplanabilir (Şekil 6).

$$f_s = \frac{(0.85f_{cd}ab + T'A'b)}{A_b} \quad (1)$$

$$T' = E_s \varepsilon_{cu} \frac{x - d'}{x}, x = \frac{a}{k_1}, k_1 = 0.85 - (f'_c - 25)0.006 \quad (1a)$$

$$u_t = \frac{(A_b f_s)}{\pi d_b l_s}; u_t = \frac{f_s d_b}{4 l_s} \quad (2)$$

Aderans dayanımı Denklem (2) ile elde edilmiştir. Burada d_b donatı çapı ve l_s ise bindirme boyudur.



Şekil 6. Betonarme kirişlerde gerilme-şekil değiştirme dağılımı

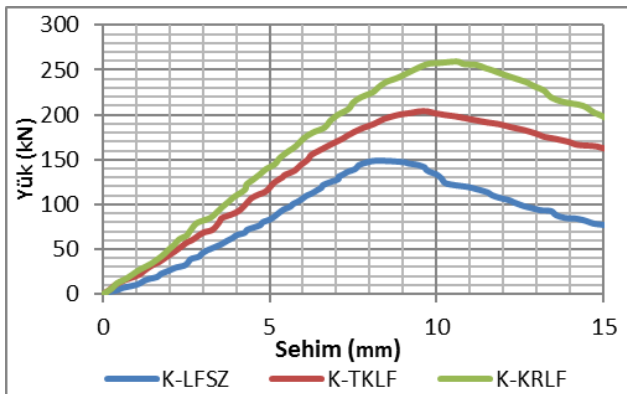
Figure 6. Stress-strain distribution in reinforced concrete beams.

Tablo 5. Kiriş numuneleri deney sonuçları.

Table 5. The test results of beam specimens

Kiriş Numunesi	fc' (MPa)	P _{max} (kN)	δ (mm)	M _{max} (kN.m)	c (mm)	f _s (MPa)	u _t (MPa)	Göçme Modu
K-LFSZ	41.05	148.51	8.39	44.55	28.82	269.95	4.49	Yarılma
K-TKLF	38.30	203.38	9.49	61.01	37.88	375.80	6.26	Yarılma
K-KRLF	43.51	240.66	10.60	72.20	41.40	445.68	7.42	Yarılma

Tablo 5'den görüleceği üzere, lif takviyesiz kontrol ve lif takviyeli kiriş numuneleri karşılaştırıldığında, lif takviyeli kiriş numunelerinin aderans dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, liflerin etkin köprüleme sağlayarak çatlak başlaması ve büyümesini önlemesine ve böylece donatı çeliği ile beton arasındaki aderansın devam etmesini sağlayan bir mekanizma oluşturmaya dayandırılabilir. Lif kombinasyonunun aderans dayanımı üzerindeki etkileri incelendiğinde, en yüksek aderans dayanımı karma lif takviyeli kiriş numunelerinde elde edilirken, tek lif takviyeli K-TKLF kiriş numunelerinin aderans dayanımı kontrol kiriş numunelerine kıyasla %39, karma lif takviyeli K-KRLF kiriş numunelerinin ise aderans dayanımı ise %65 artış göstermiştir. Betona lif ilavesinin donatının aderans dayanımını arttırdığı ile ilgili benzer sonuçlar, bazı araştırmacılar [18]-[23] tarafından yürütülen çalışmalarda da tespit edilmiş olup bu çalışmalar genelde tek lif takviyeli betondan üretilmiş kiriş numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile üretilmiş büyük ölçekli kirişlerdeki donatı aderansının belirlenmesi ile ilgili yapılan bir doktora çalışmasında [7], tüm lif takviyeli KYB kirişlerin donatı aderansının lif takviyesiz kirişlerinkine kıyasla, arttığı bulunurken, diğer bir çalışmada [24] ise karma lif takviyeli geleneksel betondan üretilmiş küp numuneler üzerinde yapılan çekip-çıkarma (pull-out) deneyi sonucunda betona karma lif ilavesinin aderans dayanımını olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. Lif takviyesiz kontrol, tek lif ve karma lif takviyeli kiriş numunelerinin yük-sehim grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Lif takviyesiz kontrol kiriş numunesinin hem göçme yükü hem de göçme anında ulaştığı açıklık ortası deplasman değeri düşük çıkmıştır. Bununla beraber, ulaşabildiği maksimum yük değerinden sonra yük taşıma kapasitesini önemli miktarda kaybetmiştir. Çelik lif takviyeli kiriş numunelerinin tamamında ulaşılan maksimum yük değeri ve bu yüke karşılık ölçülen deplasman değerlerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Kiriş numunelerine ait yük-sehim grafikleri.

Figure 7. Load-deflection curves for beam specimens.

3.2 Deneysel bulgularının ampirik formüllerle karşılaştırılması

Bu çalışmada, liffsiz ve tek tip ile karma çelik lif takviyeli büyük ölçekli kirişlere ait dört noktalı eğilme deneylerinden elde edilen aderans dayanım değerleri, Harajli ve diğ. [25] tarafından lif takviyesiz ve tekli çelik lif takviyeli betonarme elemanlar için geliştirilmiş olan ve Denklem (3)'te verilen ampirik aderans dayanımı formülü ile hesaplanan analitik bulgularla karşılaştırılmıştır.

Tablo 6'daki bulgular, bu çalışmadan elde edilen deneysel bulguları kullanarak geliştirilen Denklem (3) ve (3a) yardımıyla liffsiz, tek lif ve karma lif takviyeli betonarme elemanlar için hesaplanan donatı aderans dayanım değerlerinin, Denklem (2) yardımıyla analitik olarak hesaplanan aderans dayanım değerleri ile lif takviyeli ve özellikle de karma lif takviyeli kiriş numuneler için çok iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Kiriş numunelerine ait deneysel bulgularının ampirik denklemlerle karşılaştırılması.

Table 6. Comparison of experiment results with empirical equations for beam specimens.

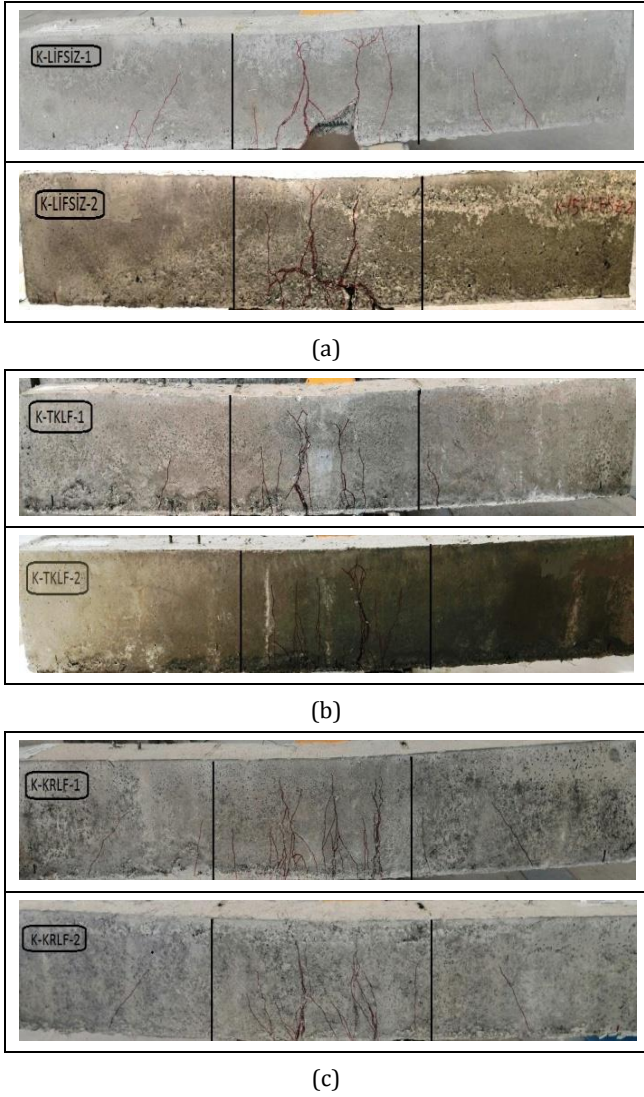
Kiriş Numunesi	fc' (MPa)	P _{max} (kN)	u _t (MPa)	Harajli Denklem (3)	u _t /u _{Harajli}
K-LFSZ	41.05	148.51	4.49	5.97	0.75
K-TKLF	38.30	203.38	6.26	6.64	0.94
K-KRLF	43.51	240.66	7.42	7.15	1.03

$$u_{max} = 0.78 \sqrt{f'_c} \left(\frac{c + K_c}{d_b} \right)^{2/3} \quad (3)$$

$$K_c = 0.45c \frac{V_f L}{d_f}, K_c = \frac{7.0A_{tr}}{s_c n_s} \quad (3a)$$

3.3 Çatlak yapıları ve göçme modu

Lif takviyesinin çelik donatı ile beton arasındaki aderansa etkilerini incelemek amacıyla üretilen büyük ölçekli bindirme ekli numunelerinde dört noktalı eğilme testi sonrasında oluşan çatlak modelleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Tüm kiriş numunelerinde göçme, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra yük azalması ile bindirme bölgesinin altındaki çekme tarafında oluşan yarılma çatlaklarından hemen sonra gerçekleşmiştir. Tüm kiriş numunelerinde ilk eğilme çatlakları pozitif momentin olduğu sabit moment bölgesinde meydana gelmiştir. Yük arttıkça, sabit moment bölgesinde çatlak sayısı artmaya başlamıştır. Lif takviyesiz kontrol kiriş numunesinde, deney sonrasında bindirme bölgesinde büyük genişlikli az sayıda çatlak oluştuğu ve kiriş numunesinin alt yüzeyinde donatı çeliğinin bindirmeli ekli bölgesinde yüzey betonunun tamamen kırıldığı görülmüştür. Bununla beraber, donatı akmadan önce bu kiriş numunelerinde ani, gevrek ve yarılma şeklinde aderans kırılması gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Kiriş numuneleri çatlak modelleri. (a): Lifsiz kiriş numuneleri. (b): Tek lif takviyeli kiriş numuneleri. (c): Karma lif takviyeli kiriş numuneleri.

Figure 8. The crack patterns of beam specimens. (a): Control beam specimens without fiber. (b): Single fiber reinforced beam specimens. (c): Hybrid fiber reinforced beam specimens.

Tek lif ve karma lif takviyeli kiriş numunelerinde sabit moment bölgesinde çok sayıda dikey eğilme çatlakları gözlemlenirken, karma lif takviyeli kiriş numunelerinde ise tüm kiriş numunelerine kıyasla en fazla sayıda ve küçük genişlikli dikey eğilme çatlakları oluştuğu tespit edilmiştir. Kına [7] tarafından lif takviyesinin aderans dayanımına etkisi ile ilgili 2019 yılında yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, lifsiz ve tek tip ile karma lif takviyeli tam ölçekli betonarme kiriş deney numuneleri dört noktali eğilme altında test edilerek lif tip ve kombinasyonunun aderans dayanımına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm betonarme kirişlere ait aderans dayanımı değerleri incelendiğinde, karma lif takviyeli kiriş numunelerinin en yüksek aderans dayanımı değerine

sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında, lif takviyesiz kontrol kiriş numunelerine kıyasla, sadece makro çelik lif içeren tek tip lif takviyeli kiriş numunelerine ait aderans dayanımı değerinin %39, hem makro hem de mikro çelik içeren karma lif takviyeli kiriş numunelerine ait aderans dayanımı değerinin ise %65 oranında daha fazla olduğu bulunmuştur,

- Aynı zamanda, donatıdaki gerilmenin hesap edilmesine esas olan maksimum yük değeri ve bu yük değerine karşılık gelen sehim değerinin, karma lif takviyeli kiriş numunelerinde en yüksek olduğu görülürken, lif takviyesiz kiriş numunelerinde ise en düşük sehim değeri elde edilmiştir,
- Ampirik formül tarafından tahmin edilen analitik bulguların, lif takviyeli kiriş numunelerinden elde edilen aderans dayanımına ait deneysel verilerle çok iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur,
- Tüm lif takviyeli kiriş numuneleri, lif takviyesiz kontrol kiriş numunelerine kıyasla sünek bir geçme sergilemiştir. Özellikle, karma lif takviyeli kiriş numunelerinde, çoklu çatlak davranışının sonucu olarak, genişliği daha az ancak daha fazla sayıda çatlak oluştuğu belirlenmiştir.

5 Conclusions

In this study, the effect of fiber type and combination on the bond strength of full-scale beams with single/hybrid and without fiber subjected to four-point bending were investigated. Based on experimental results, the following conclusions can be drawn:

- It was seen that hybrid fiber reinforced beam specimens had highest bond strength value compared to the bond strength of all beams. Besides, the bond strength values of beam specimens with steel fiber were higher than that of beam specimens without steel fiber while it was 39% for single type fiber reinforced beams and 65% macro and micro steel fiber reinforced beams,
- Also, maximum load, which is considered to calculate the stress of reinforced bar, and deflection corresponding to maximum load were highest for hybrid fiber reinforced beam specimens while the beam specimens without steel fiber had lowest deflection value corresponding to maximum load,
- Analytical results predicted by empirical formulation were very good agreement with experimental data related to the bond strength of the beam specimens with steel fiber,
- All steel fiber reinforced beam specimens exhibited ductile behavior compared to the control beam specimens without steel fiber. Especially, in hybrid steel fiber reinforced beam specimens, it was determined that a lot of cracks with narrow width occurred as result of multiple crack behavior.

6 Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından, FBA-2017-776 No.lu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Çalışmada katkısı bulunanlara teşekkür ederiz.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Kazım Türk fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Mahmut Başsürücü literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, sonuçların incelenmesi ve yazım denetimi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Tepfers R. "Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars". *Magazine of Concrete Research*, 31, 3-12, 1979.
- [2] Tepfers R. A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. PhD Thesis, Chalmers University Technology, 1973.
- [3] Turk K, Nehdi ML. "Coupled effects of limestone powder and high-volume fly ash on mechanical properties of ECC". *Construction and Building Materials*, 164, 185-192, 2018.
- [4] Turk K, Demirhan S. "Effect of limestone powder on the rheological, mechanical and durability properties of ECC". *European Journal of Environmental Civil Engineering*, 21, 1151-1170, 2017.
- [5] Bassurucu M, Turk K. "Effect of curing regimes on the engineering properties of hybrid fiber reinforced concrete". *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, 4(2), 26-42, 2019.
- [6] Turk K, Oztekin E, Kına C. "Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019. doi.org/10.1080/19648189.2019.1686069.
- [7] Kına C. Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2019.
- [8] Türk K, Kına C. "Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 671-678, 2017.
- [9] Ding Y, You Z, Jalali S. "Hybrid fiber influence on strength and toughness of RC beams". *Composite Structures*, 92, 2083-2089, 2010.
- [10] Rossi P, Acker P, Malier Y. "Effect of steel fibres at two different stages: The material and the structure". *Materials and Structures*, 20, 436-439, 1987.
- [11] Mobasher B, Li CY. "Mechanical properties of hybrid cement-based composites". *ACI Materials Journal*, 93, 284-292, 1996.
- [12] Turk K, Yildirim MS. "Bond strength of reinforcement in splices in beams". *Structural Engineering and Mechanics*, 16, 469-478, 2003.
- [13] Turk K, Caliskan S, Yildirim MS. "Influence of loading condition and reinforcement size on the concrete/reinforcement bond strength". *Structural Engineering and Mechanics*, 19, 337-346, 2005.
- [14] Karatas M, Turk K, Ulucan ZC. "Investigation of bond between lap-spliced steel bar and self-compacting concrete: The role of silica fume". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 420-428, 2010.
- [15] Lagier F, Massicotte B, Charron JP. "Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension". *Cement and Concrete Composites*, 74, 26-38, 2016.
- [16] Başsürücü M. Çelik Sac-Beton Kompozit Döşeme Sistemlerinin Boyuna Kayma Dayanımının Deneysel Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2013.
- [17] Başsürücü M, Türker H. "Profillenmiş çelik sac-beton kompozit döşeme sistemlerinin boyuna kayma dayanımının deneysel olarak belirlenmesi". *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2, 17-26, 2013.
- [18] Hameed R, Turatsinze A, Duprat F, Sellier A. "Bond stress-slip behaviour of steel reinforcing bar embedded in hybrid fiber-reinforced concrete". *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 17, 1700-1707, 2013.
- [19] Harajli MH. "Effect of confinement using steel, FRC, or FRP on the bond stress-slip response of steel bars under cyclic loading". *Materials and Structures*, 39, 621-634, 2006.
- [20] Yazici Ş, Arel HŞ. "The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRCs". *Construction and Building Materials*, 40, 299-305, 2013.
- [21] Huang L, Xu L, Chi Y, Deng F, Zhang A. "Bond strength of deformed bar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete." *Construction and Building Materials*, 218, 176-192, 2019.
- [22] Bae B, Choi K, Choi S. "Bond stress between conventional reinforcement and steel fibre reinforced reactive powder concrete". *Construction and Building Materials*, 112, 825-835, 2016.
- [23] Rossi C, Oliveira C, Picanço S, Pompeu B, Oliveira M. "Development length and bond behavior of steel bars in steel fiber-reinforced concrete in flexural test". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002979).
- [24] Huang L, Chi Y, Xu L, Chen P, Zhang A. "Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading". *Construction and Building Materials*, 103, 77-92, 2016.
- [25] Harajli M, Hamad B, Rteil A. "Effect of confinement of bond strength between steel bars and concrete". *ACI Structural Journal*, 101, 595-603, 2004.