



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Çelik Liflerin Hibritlenmesinin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi

Necim KAYA<sup>1</sup>, Berfin RAMAZANOĞLU\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

<sup>2</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

Necim KAYA, ORCID No: 0000-0003-1478-761X,

Berfin RAMAZANOĞLU, ORCID No: 0000-0001-5263-1531

\*Sorumlu yazar e-posta: berfinramazanoglu@gmail.com

#### Makale Bilgileri

Geliş: 02.11.2023  
Kabul: 31.01.2024  
Online Nisan 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1385342

#### Anahtar Kelimeler

Beton,  
Çelik lif donatılı beton,  
Hibrit lif,  
Mekanik özellikler

**Öz:** Lif takviyeli betonlar, yapının dayanımını arttırmak için tasarlanmaktadır. Bu çalışmada farklı narinlikteki çelik liflerin hibritlenmesinin betonun mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda geleneksel betonu temsil eden referans numunemizle beraber toplamda 4 farklı karışım içeriğe sahip seriler üretilmiştir. Karışımlarda, CEM I 42.5 N Portland tipi çimento, Mikro lif Dramix OL 6 /.16, Makro lif Dramix 3D 45/35, kalker esaslı 0-4, 4-8, 4-16 mm dane dağılımına sahip agregalar ve yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi kullanılmıştır. Üretilen numunelere basınç, eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre; tekil ve karma lif kullanımının basınç dayanımı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı üzerinde ise pozitif etkilerinin olduğu görülmüştür. Eğilmede çekme dayanımında tekil lif kullanımıyla 28 günlük yaşta %15.71, 90 günlük yaşta %16.42 oranında maksimum artış gözlemlenirken, yarmada çekme dayanımında 28 günlük yaşta hibrit lif takviyesiyle %76.4, 90 günlük yaşta tekil lif takviyesiyle %44 oranında artış gözlemlenmiştir. Kullanılan liflerin şeklinin, narinliğinin, dağılımının ve açılarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi açıkça görülmüştür.

### Effect of Hybridization of Steel Fibers on the Mechanical Behavior of Concrete

#### Article Info

Received: 02.11.2023  
Accepted: 31.01.2024  
Online April 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1385342

#### Keywords

Concrete,  
Hybrid fiber,  
Mechanical properties,  
Steel fiber reinforced concrete

**Abstract:** Fiber-reinforced concretes are designed to increase the strength of the structure. In this study, the effect of hybridization of steel fibers of different slenderness on the mechanical properties of concrete was examined experimentally. For this purpose, a series with four different mixture contents was produced, together with our reference sample representing traditional concrete. In the mixtures, CEM I 42.5 N Portland type cement, Microfiber Dramix OL 6 /.16, Macro fiber Dramix 3D 45/35, limestone-based aggregates with 0-4, 4-8, 4-16 mm grain distribution and new generation superplasticizer concrete. Additive material was used. The produced samples were subjected to pressure, flexural tensile strength and splitting tensile strength tests. According to the results of the experimental study, It has been observed that the use of single and mixed fibers has a limited effect on compressive strength but has positive effects on, flexural tensile strength and splitting tensile strength. While the maximum increase in bending tensile strength was observed at 15.71% at 28 days of age with the use of single fiber and 16.42% at 90 days of age, a 76.4% increase in splitting tensile strength was observed at 28 days of age with hybrid fiber reinforcement and 44% at 90 days of age with single fiber reinforcement. The effect of the shape, slenderness, distribution, and angle of the fibers used on the mechanical properties was seen.

## 1. Giriş

İnsanoğlunun barınmaya olan ihtiyacının giderek artması ile yapı malzemeleri zaman içinde gelişim göstererek, günümüzde inşaat sektöründe oldukça yaygın kullanılan betonu ortaya çıkarmıştır. Dünya nüfusunun sürekli artması, beraberinde kaynak tüketimini doğrudan etkilediğinden kaynak ve kalkınmaya olan ihtiyacı da artmıştır. Hızla artan nüfusun beslenme barınma, enerji ve suya olan ihtiyacının karşılanması için insanoğlunun ihtiyacı olan hemen hemen her yapı betondan meydana gelmektedir (Kozak, 2013; Açıkgeç, 2015; Arslan & Sarıkaya, 2021). Beton; çimento, agrega, su ile gerekli durumlarda mineral ve kimyasal katkıları kullanılarak hazırlanan kompozit bir yapı malzemesi olup, inşaat sektöründe ise yüksek basınç dayanım ve düşük maliyetinden dolayı en yaygın kullanılan yapı malzemesidir (Tittelboom & De Belie, 2013; Jiao ve ark., 2017; Arslan & Sarıkaya, 2021). Beton, yüksek basınç dayanımlarını karşılayabilmesine rağmen çekme ve eğilme dayanımında düşük dayanım özelliği gösteren gevrek kompozit malzeme kategorisinde yer almaktadır (Tittelboom & De Belie, 2013; Yavuz ve ark., 2016; Badugea ve ark., 2021). Beton, sahip olduğu üstün birçok özelliğinden dolayı sıklıkla tercih edilirken, gevrek özelliğe sahip olması, yapılardan istenilen performansların artmasıyla yapılar için oldukça önemli bir problem haline gelmiştir (Tittelboom & De Belie, 2013; Khalilpour ve ark., 2019; Sidiq ve ark., 2019; Badugea ve ark., 2021). İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olan betondan beklenen performans günden güne artmaktadır. Yapı inşa hızının arttırılmak istenmesi, narin taşıyıcı elemanların daha büyük açıklıklarda kullanılmak istenmesi ve daha birçok nedenle ortaya çıkan ihtiyaçların geleneksel beton ile karşılanması mümkün olamamaktadır. Ortaya çıkan bu ihtiyaçları karşılayan beton türleri özel betonlar olarak adlandırılmaktadır. Çelik lif donatılı beton (ÇLDB), geleneksel betonun gevreklik probleminin iyileştirildiği özel beton türlerinden biridir. Beton yüksek basınç dayanımına sahip iken çekme dayanımında oldukça sınırlı bir kapasiteye sahip olduğundan, bünyesinde bulundurduğu mikro çatlaklar sebebiyle, yük altında basınç dayanımına ulaşmadan önce gevrek bir şekilde göçmektedir (Neville, 1991; ACI 544.1R-96, 2002; Mehta & Monteiro, 2006; Kızıllırmak ve ark., 2019). Çelik lif donatılı betonlarda ise çimento matrisi içerisinde rastgele yayılan lifler, beton bünyesinde bulunan mikro çatlakların yayılmasına engel olmakta ve çatlak genişlemesine direnerek kırılma dayanımını artırarak sünekliği arttırmakta ve gevrek kırılmanın önüne geçmektedir. Çelik liflerin kullanım alanı oldukça geniş olup birçok farklı beton türünde kullanılabilmektedir (Topçu & Boğa, 2005; Yalçın ve ark., 2009)

Liflerin yapı malzemelerinde kullanılması eskilere dayanmaktadır. At kılı, saman ve bazı bitki lifleri kerpiç gibi yapı malzemelerinde tarih boyunca kullanılmıştır (ACI 544.1R-96, 2002; Brandt, 2008). Ülkemizde Mimar Sinan'ın yapmış olduğu eserlerinde, Horasan Harcı içerisinde saman ve hayvan kılı kullanılmıştır (Yardımcı, 2007). Eserlerde bu liflerin kullanılmasının esas amacı taze haldeki harcın kuruma esnasında bünyesinde meydana gelebilecek çatlakların azaltılarak geçirimsiz bir malzeme elde edilmesidir. Böylece yapı elemanlarının sünekliği iyileşmekte ve yapı ömrü uzamaktadır. Çelik liflerin beton bünyesine dahil edilmesinde esas amaç, bünyesinde birçok mikro çatlak bulduran betonun sünekliğini arttırarak gevrek yapısının iyileştirilmesidir. Çelik lifler, sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı gerilmeler altında betonda çatlak oluşumunun ve yayılımının önüne geçmektedirler. Çelik liflerin bu etkisi malzemenin gevrek yapısını iyileştirerek süneklik ve çekme dayanımına katkı sağlamaktadır (Mehta & Monteiro, 2006). Çekme dayanımı geleneksel betona göre daha yüksek olan çelik lif donatılı betonun deformasyon yapabilme kapasitesi ve dolayısıyla tokluğu da artmaktadır (Gopalaratnam & Gettu, 1995; Nataraja ve ark., 1999; Banthia & Sappakittipakorn, 2007). Lifli betonlarda liflerin asıl etkisi ilk çatlamlardan sonra olmaktadır. Yapıda meydana gelen ilk çatlak oluşumundan sonra lifler, çatlaklar arası köprüleme görevi görmekte ve çatlak boyunca gerilimi aktarma yeteneğine sahip olduklarından çatlama sonrası betonun davranışını ve betonun tokluğunu iyileştirmektedirler. Dolayısıyla lifler betonun çekme dayanımını arttırır demek yerine, çelik lif donatılı betonun nihai çekme dayanımının geleneksel betona göre daha fazla olduğunu söylemek doğru bir ifade olacaktır (Taşdemir ve ark., 2006).

Uygulamalarda kullanılan geleneksel lif takviyeli beton, genellikle tek tip lif kullanılarak üretilmektedir. Lif takviyeli betonun karakteristikleri, lifin özelliğine bağlıdır ve her bir lif tipi bazı özel işlevsellikler bakımından etkili olabilmektedir. Betonda meydana gelen göçme aşamalı ve çok ölçekli bir süreçtir. Yük etkisi altında olan betonun bünyesinde, önceden var olan mikro çatlaklar büyümekte ve makro çatlak oluşumu için birleşmektedir. Oluşan makro çatlaklar, kararlı bir hızda yayılarak ani göçmeye neden olmaktadır. Betondaki kırılma mekanizması aşamalı ve çok ölçekli olduğundan tek tip

lif sadece bir seviyede ve şekil değiştirmelerin olduğu sınırlı bir bölge içinde etkili olabilmekte ve malzemeden beklenen en uygun performansa ulaşamamaktadır. Bu nedenle, betona daha üstün mekanik özellikler kazandırmak için çimento esaslı kompozitlerde her birinin kendisine has özellikleri olan lif kombinasyonları kullanmaya başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda iki veya daha fazla lif türünün kombinasyonu üretilen lif takviyeli beton, hibrit lif takviyeli beton olarak adlandırılmıştır (Türk & Kına, 2017; Türk ve ark., 2022). Liflerin hibrit olarak tasarlandığı sistemlerde, lifler arasında pozitif yönde bir etkileşim meydana gelmekte ve her lif türünün kendine has özelliklerinden faydalanarak üstün özellikli ve amaca uygun özel betonlar üretilmektedir. Farklı özellikteki liflerin kombinasyonu ile oluşan bu pozitif etkileşimin neticesi olarak hibrit lif donatılı betonların mekanik performansı daha dengeli olmaktadır. Bu sayede hem mukavemette hem de deformasyon kapasitesinde önemli ölçüde iyileşmeler gözlemlenmektedir (Çivici & Güngör, 2016; Demirhan, 2017; Türk ve ark., 2022).

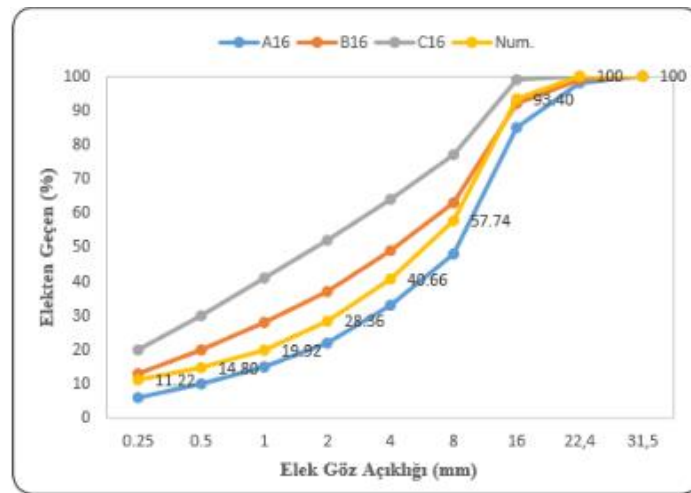
Verilen bu bilgiler doğrultusunda yapılacak çalışma ile farklı boyutsal özelliklerdeki çelik liflerin hibritlenmesinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

DeneySEL çalışmada, TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 N Portland tipi çimento, kalker esaslı 0-4, 4-8, 4-16 mm dane dağılımına sahip agregalar, polikarboksilik eter esaslı, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi, mikro lif olarak ASTM A820, EN 14889-1 standartlarına uygun şekilde üretilen Mikro lif Dramix OL 6/16 (6 mm uzunluk / 0,16 mm çap) parlak, yüksek karbonlu tel, makro lif olarak ASTM A820, EN 14889-1 standartlarına uygun şekilde üretilmiş Makro lif Dramix 3D 45/35 (45 mm narinlik / 35 mm uzunluk) parlak, suda çözünen tutkalla yapıştırılmış tel olarak tanımlanan lif kullanılmıştır. Üretilen betonlarda su/çimento oranı 0.40 alınmış ve çelik lifler hacimce %1 oranında betona katılmıştır.

Çizelge 1. CEM-I 42,5 N tipi portland çimentosu özellikleri

Kimyasal Bileşenler	(%)	Fiziksel özellikler	Mekanik özellikler	N/mm <sup>2</sup>	
SiO <sub>2</sub>	19.96	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.06	2 Günlük basınç dayanımı	21.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.03	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3641	7 Günlük basınç dayanımı	42.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.88	0.090 mm elek kalıntısı (%)	0.1	28 Günlük basınç dayanımı	61.5
CaO	63.6	0.045 mm elek kalıntısı (%)	4		
MgO	1.17	Standart kıvam su miktarı	29.6		
K <sub>2</sub> O	0.8	Priz başlama süresi (dk)	190		
Na <sub>2</sub> O	0.27	Priz sona erme süresi (dk)	260		
SO <sub>3</sub>	2.79	Genleşme (mm)	1		
Cl	0.005				
TiO <sub>2</sub>					
Mn <sub>2</sub> O <sub>2</sub>					
K <sup>2</sup> O	3.02				



Şekil 1. Agrega granülometri eğrisi.



Şekil 2. Piringç kaplı mikro çelik lif.



Şekil 3. Tutkallı kancalı 3D makro çelik lif.



Şekil 4. Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı.

Çalışma kapsamında üretilen lifsiz ve lifli betonların 1 m<sup>3</sup> için gerekli olan miktarları Çizelge 2’de verilmiştir. Numune serileri [TS 802 Beton Karışımı Hesap Esasları \(2016\)](#)’na göre Çizelge 2’de verilen karışım oranlarına uygun olarak hazırlanmıştır. R kodu, geleneksel beton karışımını, ÇL1 makro lif türünün kullanıldığı karışımı, ÇL2 mikro lif türünün kullanıldığı karışımı, H kodu ise liflerin hibrit olarak kullanıldığı karışımı temsil etmektedir.

Çizelge 2. Beton serilerine ait 1 m<sup>3</sup> için karışım miktarları (kg)

Malzemeler	R	ÇL <sub>1</sub>	ÇL <sub>2</sub>	H
Çimento	475	475	475	475
Su	190	190	190	190
0-4 Agregası	672.4	661.1	661.1	661.1
4-8 Agregası	419.6	413.2	413.2	413.2
4-16 Agregası	587.5	578.5	578.5	578.5
Akışkanlaştırıcı	2.38	2.38	2.38	2.38
ÇL1		78.5		39.25
ÇL2			71.8	35.9

Numune serileri Çizelge 2’de verilen oranlara uygun olarak Şekil 5’te verilen beton mikserinde hazırlanmıştır. Beton serilerinin hazırlanmasında taze betonun homojen karışması için her seri için üç aşamada beton karışımları hazırlanmıştır.



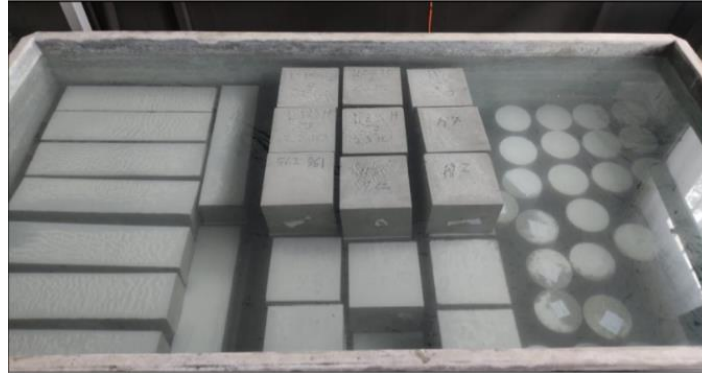
Şekil 5. Beton mikserinde numunelerin hazırlanması.

Hazırlanan taze betonlar, Şekil 6’da görüldüğü gibi önceden hazırlanıp yağlanan ve sarsma tablasına yerleştirilen kalıplara 2 kademede yerleştirilmiştir. Her kademede sarsma tablasında 30 sn sarsma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 6. Sarsma tablası.

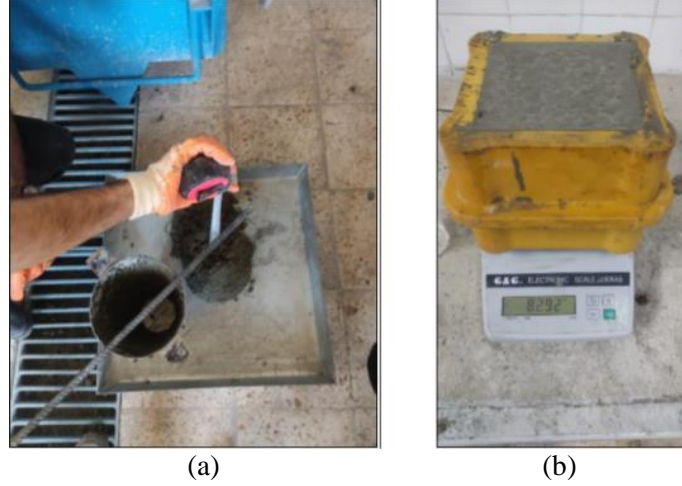
Sarsma tablasından alınan numuneler kalıplarda laboratuvar ortamında 24 saat bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılıp Şekil 7’de verilen standart kür havuzunda istenilen yaşa gelinceye kadar kür işlemine tabi tutulmuşlardır. Daha sonra kür sürelerini tamamlayan numuneler belirlenen beton deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 7. Su kürüne tabi tutulan numuneler.

## 2.1. Çökme (Slump) ve taze beton birim hacim ağırlık deneyi

Karışımların taze beton kıvamını çökme (Slump) deneyi ile belirlemek amacıyla Şekil 8'de verilen huni ile TS EN 12350-2 (2019)'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan betonlarda betonun çökme değeri  $14 \pm 2$  cm 'de sabit tutulacak şekilde süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Ayrıca taze beton birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 8. Taze beton deneyleri (a) çökme (slump) deneyi (b) birim hacim ağırlık deneyi.

## 2.2. Beton basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımları için  $150 \times 150 \times 150$  mm boyutlarındaki numuneler hazırlanmıştır. İstenilen kür yaşlarına ulaşan numunelerin basınç dayanım değerleri, TS EN 12390-3 (2019)'e uygun olarak Şekil 9'da verilen tek eksenli beton basınç presi yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 9. Beton basınç dayanımı testi.

## 2.3. Kiriş eğilmede çekme dayanımı deneyi

Kiriş eğilmede çekme dayanım değerleri için  $100 \times 100 \times 400$  mm boyutlara sahip beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerin eğilme kapasitesini, süneklilik ve eğilme tokluğunu değerlendirmek amacıyla dört noktalı eğilme testi; Şekil 10'da verilen Shimadzu marka test cihazı kullanılarak iki noktadan yükleme ile TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak yapılmıştır.

Cihaz yükleme hızı 165 N/sn olarak seçilmiştir. Deney sırasından yük göstergesinde ulaşılan en büyük yük kaydedilmiştir. Eğilme dayanımı, denklem 1’de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{cf} = F * L/d_1 * d_2^2 \quad (1)$$

Burada;

$f_{cf}$  : Eğilme dayanımı MPa (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  : En büyük yük (N)

$L$  : Mesnet silindir merkezleri arasındaki açıklık (mm)

$d_1, d_2$  : Numunenin en kesit boyutları, mm



Şekil 10. Shimadzu kiriş eğilme cihazı ve eğilme testi.

#### 2.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Üretilen beton serilerinin 28 ve 90 günlük kür yaşlarında yarmada çekme dayanım değerlerinin belirlenmesi amacıyla 100 mm çapında 200 mm uzunluğuna sahip ve her test yaşı için 2 adet silindir numune üretilmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımı Şekil 11’de görüldüğü gibi basınç presi içerisine yerleştirilen yarma dayanımı aparatı yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 11. Yarmada çekme dayanım testi.

Basınç presinden okunan en büyük kuvvet değeri tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanım değeri [TS EN 12390-6 \(2024\)](#) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Yarmada çekme dayanım değeri denklem 2’de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$f_{ct} = 2 * F / (\pi * L * d) \quad (2)$$

Burada;

- $f_{ct}$  : Yarmada çekme dayanım (MPa)  
 $F$  : En büyük yük (N)  
 $L$  : Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm)  
 $d$  : Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm)

### 3. Bulgular

#### 3.1. Çökme (Slump) ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

Numunelerin çökme miktarını belirlemek ve çökme miktarına lif etkisini gözlemlemek amacıyla her seriye TS EN 12350-2 standardı baz alınarak çökme deneyi uygulanmıştır. Lifler, yüksek yüzey alanına sahip olduğundan karışımın vizkozitesini arttırmaktadır. Diğer karışım parametrelerine de bağlı olarak tazen betonun işlenebilirliği, genel olarak liflerin eklenmesiyle azalmaktadır ([Demirhan, 2017](#)). Düz liflerle karşılaştırıldığında kancalı çelik lifin ankraj ve yapışma etkisi daha fazla olduğundan akma gerilmesini daha fazla arttırmaktadır fakat daha yüksek çekme dayanımı sağlamaktadır. ([Akeed ve ark., 2022](#)). Çökme değerlerinin verildiği Çizelge 3 incelendiğinde üretilen betonlarda çökme değerlerinin 12 cm ve 18 cm aralığında değiştiği görülmektedir. Çökme deneyi sonuçlarına bakıldığında R serisinde 18 cm, ÇL1 serisinde 12 cm, ÇL2 serisinde 16 cm, H serisinde ise 14 cm çökme değeri ölçülmüştür. Hedeflenmiş çökme değeri olan 14±2 cm değerinin sağlandığı görülmektedir. Lif takviyesinin betonun vizkozitesini arttırdığı bilindiğinden referans serisinden en fazla çökme değerinin elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. ÇL1 serisinde kancalı lif türünün kullanılması ÇL2 serisine göre daha az çökme yapmasına sebep olmuştur. H serisinde mikro ve makro lifler hibritlendiğinden H serisinde meydana gelen çökmenin ÇL1 ve ÇL2 serilerinin çökme değerlerinin arasında bir değer olması beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 3’te verilen birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde tüm serilerin değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Beton içerisine lif eklenmesiyle birim ağırlıkta düşüş meydana geldiği olduğu, bu düşüşün makro lif eklenen seride mikro lif eklenen seriye göre daha fazla olduğu, liflerin hibritlendiği seride ise bu iki seride elde edilen değerlerin arasında bir değer elde edildiği görülmektedir. Beton karışımına makro lif eklenmesiyle yaklaşık olarak %1.30, mikro lif eklenmesiyle %0.65, hibrit liflerin eklenmesiyle %0.85 oranında birim ağırlıkların düştüğü gözlemlenmiştir. Mikro lifli ÇL2 serisinin işlenebilirliği makro ÇL1 den daha yüksek olduğundan ÇL2 serisinin beton doluluk oranı daha fazla olmakta buna bağlı olarak birim hacim ağırlığı daha yüksek olmaktadır. H serisinin birim ağırlık değerinin ÇL1-ÇL2 değerlerinin arasında bir değer olması beklenen bir sonuçtur ve tüm seriler için işlenebilirlik değerleriyle birim ağırlık değerleri birbirini doğrulamaktadır.

Yazıcı, değişik oranlarda kısa ve uzun çelik kullanımının betonun özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada bu amaçla s/ç oranı 0.50 olan betonlarda uzunlukları 40 mm ve 60 mm olan 0.75 mm çaplı (l/d oranı 40 ve 60) çelik lifler betonlara hacimce %0, %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında katılmıştır. Betona lif eklenmesi ile betonun işlenebilirliğinin azaldığını, bu azalmanın uzun lifli karışımlarda kısa lifli karışımlara kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir ([Yazıcı, 2017](#)).

Bozkurt ve arkadaşları, uçucu kül ile üretilen lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun taze beton ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Bir adet kontrol kendiliğinden yerleşen beton ve 10 adet lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton tasarlandı. Tasarımında farklı uzunluk ve boy/çap oranlarında 3 makro ile 1 mikro çelik lif kullanarak tekil ve karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımları üretildi. Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen karışımları her makro lifin mikro lif ile birlikte ağırlıkça 2 farklı oranda (%50 ve %75) kullanımı ile hazırlandı. Deney sonuçlarında makro fiber kullanımının daha düşük taze beton özellikleri verdiği gözlemlendi ([Bozkurt ve ark., 2013](#)).

Literatürdeki çalışmalarda lif takviyesi ile taze beton özelliklerinde azalmalar tespit edilmiştir ve bu azalma lif içeriği ve geometrisi ile doğru orantılıdır ([Aral, 2006](#)).

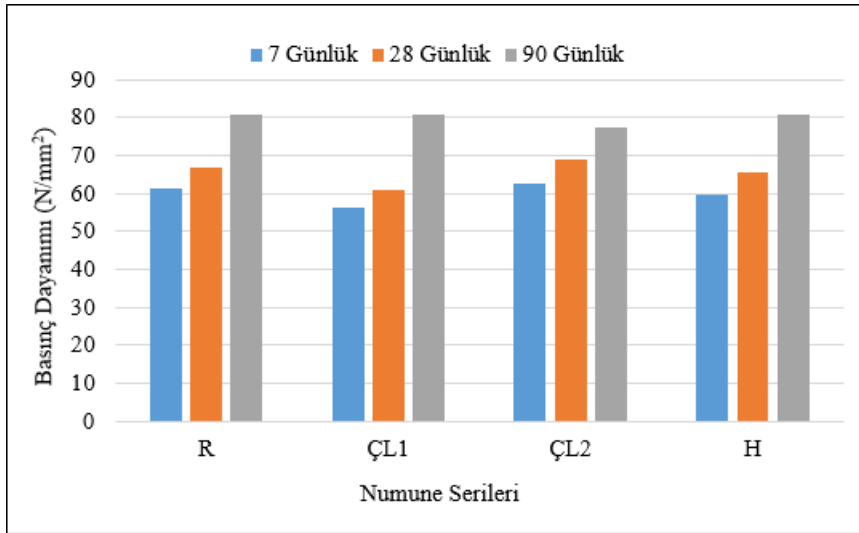


Çizelge 3. Çökme ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

Numune Serileri	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/dcm <sup>3</sup> )
R	18	2.465
ÇL1	12	2.433
ÇL2	16	2.449
H	14	2.444

### 3.2. Beton basınç dayanım değerleri

Çelik lifli betonların mekanik özelliklerinden basınç dayanım değerlerine hibritlenmenin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım ortalama değerleri Şekil 12’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde; 7 günlük değerlerde minimum ve maksimum dayanım değerleri sırasıyla 56.16 ve 62.71 MPa olarak ÇL1 ve ÇL2 serilerinden elde edildiği görülmektedir. 28 günlük yaşlardan elde edilen basınç dayanım değerleri ise en düşük dayanım 60.96 MPa olarak ÇL1’den, en yüksek dayanım ise 69.07 MPa ile ÇL2 serisinden 7 günlük yaşlarda olduğu gibi minimum ve maksimum dayanım değerleri ÇL1 ve ÇL2 serilerinden elde edilmiştir. 90 günlük basınç dayanım değerlerine bakıldığında değerlerde artış gözlemlenirken, ÇL2 serisinde bu değer 77.52 MPa, diğer üç seride elde edilen değerler aynı olup 81 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 12. Çelik lifli betonların basınç dayanım değerleri (MPa).

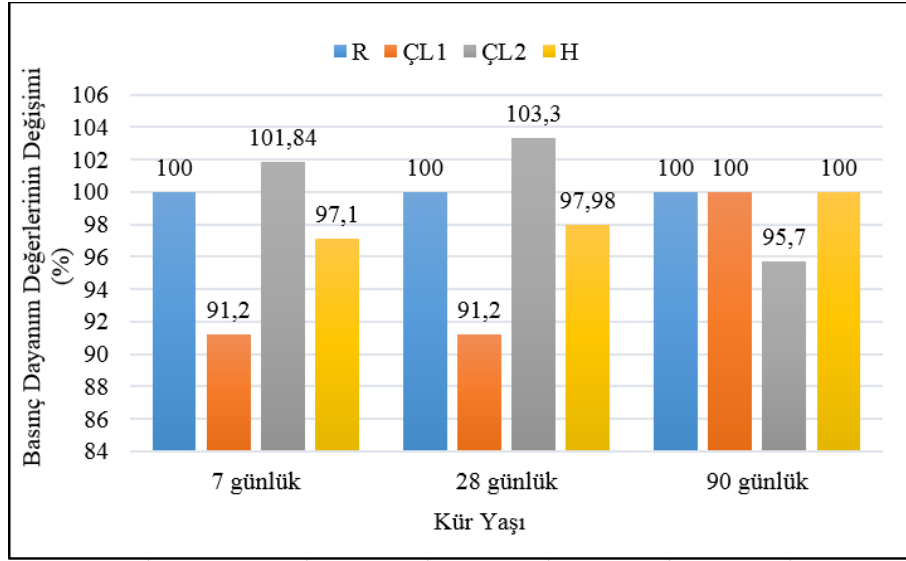
Çelik lifli betonların referansa oranla basınç dayanım değişim değerleri yüzdesel olarak incelendiğinde 7 günlük yaşlarda kontrol numunesine oranla ÇL1 numunesinde yaklaşık %9 dayanımda azalma meydana geldiği ve ÇL2 numunesinde ise %1.8 dayanımda artış olduğu görülmüştür. 28 günlük yaşlarda ise ÇL1 numunesinde 7 günlükte olduğu gibi yaklaşık %9 dayanımda azalma ve ÇL2 numunesinde ise %3.3 oranında dayanımda artış olduğu görülmektedir. 90 günlük yaşlarda kontrol numunesi ve ÇL1 numunesinde aynı değerler elde edildiğinden bu iki seri arasında oransal bir azalma ya da artıştan söz edilememektedir. Diğer yandan ÇL2 serisinde %4 oranında bir azalma gözlemlenmektedir. Hibrit numunelerinin referansa oranla 7 günlük yaşlarda %2.9, 28 günlük yaşlarda %2’lik dayanım kaybı görülürken 90 günlük yaşlarda ise herhangi bir dayanım kaybı ya da artışı görülmemektedir. Bu dayanım farklılıklarının ÇL1 lif türünün 35 mm uzunlukta ve kancalı olması, ÇL2 lif türünün ise 6 mm uzunluğa ve kancasız olması nedenlerinden dolayı karşımda ÇL2 lif türünün daha homojen dağılım gösterdiği ve basınç dayanımına katkı sağladığı düşünülmektedir. Tek tip lif ve karma lif içeren numuneler referans numunesiyle karşılaştırıldığında küçük oranlarda azalma ve artma gösteren değerler bulunmuştur. Genel olarak liflerin tekil veya hibrit olarak kullanımının basınç dayanımı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Türk ve arkadaşlarının benzer işlenebilirliğe sahip farklı boyut (makro ve mikro) ve narinlikteki çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımların mühendislik ve işlenebilirlik

özelliklerini araştırdığı çalışmada, karışıma makro ve mikro çelik liflerin ilave edilmesi basınç dayanımında azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir (Türk ve ark., 2022).

Nusret ve arkadaşlarının, makro ve mikro lif kullanarak tekil ve karma lif olarak tasarladığı lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde yapılan çalışmada, tüm serilerin kendi gruplarında aynı kürlenme yaşlarında benzer basınç dayanımı davranışları gösterdiği gözlemlenmiştir. Hibrit karışımda tekli lif kullanımında lif boyutlarının ve makro lif yoğunluğunun azalması, basınç dayanımı sonuçlarında bir miktar artışa neden olmuştur (Bozkurt ve ark., 2013).

Betona lif katkısı basınç dayanımı üzerinde olumlu veya olumsuz sonuçlar oluşturabilmektedir (Alkayış & Başyigit, 2021). Çelik lif takviyeli betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırma sonuçlarına göre, lifler betonun basınç dayanımına her zaman olumlu etkilememekte, belirli seviyede basınç dayanımında bir artış gösterebileceği gibi bazen de dayanım kaybı ortaya çıkmaktadır (Aral, 2006).



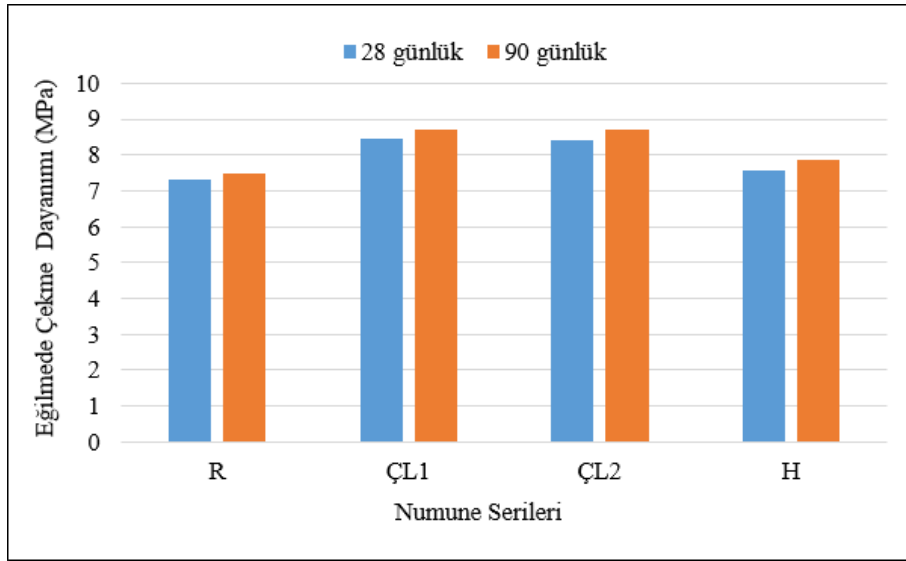
Şekil 13. Çelik lifli betonların basınç dayanım değerlerinin yüzdelik değişimleri (%).

### 3.3. Kiriş eğilmede çekme dayanım değerleri

Çelik lifli betonların eğilme dayanım değerlerine hibritlenmenin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen 28 günlük ve 90 günlük eğilme dayanım ortalama değerleri Şekil 14'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde; 28 günlük değerlerde minimum ve maksimum dayanım değerleri sırasıyla 7.32 ve 8.47 MPa olarak R ve ÇL1 serilerinden elde edilmiştir. 90 günlük değerlerde minimum ve maksimum dayanım değerleri sırasıyla 7.49 ve 8.72 MPa olarak 28 günlük değerlerde de olduğu gibi R ve ÇL1 serilerinden elde edilmiştir. Bunun yanı sıra 28 günlük ve 90 günlük seri sonuçları incelendiğinde tüm serilerde elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Çelik lifli betonların referansa oranla eğilme dayanım değişim değerleri yüzdesel olarak incelendiğinde 28 günlük değerler için en düşük dayanım artışı yaklaşık %3.28 ile H numunesinden, en yüksek dayanım artışı ise %15.71 ile ÇL1 numunelerinden elde edildiği görülmektedir. 90 günlük değerler için en düşük dayanım artışı yaklaşık olarak %5.21 ile H numunesinden, en yüksek dayanım artışı ise %16.42 ile ÇL1 numunelerinden elde edildiği görülmektedir. Genel olarak liflerin tekil ve hibrit kullanımının eğilme dayanımı üzerinde pozitif etkileri olurken, tek tip lif kullanılan serilerde daha yüksek oranda iyileşmeler elde edilmiştir. ÇL1 numunesinin en yüksek dayanıma ulaşmasının nedeni; ÇL1 lifinin kancalı ve daha yüksek narinliğe sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla beraber ÇL1 ve ÇL2 serilerinden elde edilen değerler birbirlerine oldukça yakındır. H serisinde tek tip liflerin kullanıldığı serilere kıyasen istenilen düzeyde iyileşmenin elde edilememesinin sebebinin hibrit lif kullanılmasından kaynaklı meydana gelen bir topaklaşma sorunundan ya da liflerin beton içerisindeki yönelimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir diğer varsayım ise matris içindeki liflerde

meydana gelen sıyrılmalardan kaynaklı liflerden beklenen performansın elde edilememesidir (Aral, 2006).



Şekil 14. Çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanım değerleri (MPa).

Kim ve arkadaşları, çalışmalarında makro ve mikro lifler içeren karma lif takviyeli betonlarda termal gerilmelerle çatlak dayanımını artırmaya çalışmışlardır ve bunun için 6 ve 12 mm'lik mikro lifler ve 30 mm'lik makro lif kullanmışlardır. Aynı lif yüzdesinde karma lifin etkisini açık bir şekilde göstermişlerdir. Mikro lif takviyeli betonun ilk çatlaklara daha fazla direnç gösterdiğini ve bu oluşumun mikro çatlakların mikro lifler tarafından önlenmesiyle açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Diğer taraftan, her ne kadar makro lif takviyeli betonun ilk çatlak dayanımı mikro lif takviyeli betonun ilk çatlak dayanımından biraz az olsa da maksimum yükten sonraki kırılma tokluğu daha fazladır. Karma lif takviyeli betonlar içinde ilk çatlak başlamasına karşı direnç ve tokluk mikro ve makro lif takviyeli betonlara göre dikkate değer bir şekilde artmıştır. Sonuç olarak lif tipi ve yüzdesinin uygun bir kombinasyonu ile çatlama karşı yüksek dirence sahip yüksek performanslı betonların üretilebileceğini belirtmişlerdir (Nam-Wook ve ark., 1999).

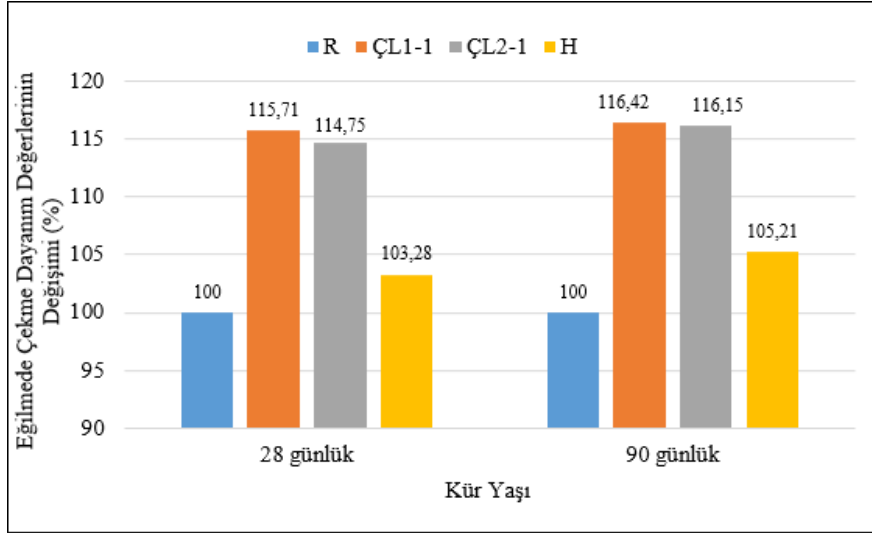
Banthia ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada makro ve mikro çelik liflerin aynı karışımda birlikte kullanımını araştırmışlardır. 3 farklı tip makro lifin karışımdaki kullanım oranı 40 kg/m<sup>3</sup> olarak sabit tutulmuş, bu kompozitler daha sonra çelik mikro liflerle hacimce %1 ve %2 oranlarında karma lifli kompozit üretmek üzere takviye edilmiştir. Bunun sonucunda karma lifli kompozitlerin sadece basınçta güçlü olmadığı aynı zamanda eğilme sırasında daha büyük dayanım ve enerji yutma yeteneği gösterdikleri görülmüştür (Banthia ve ark., 2000).

Bozkurt ve arkadaşları, kontrol kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ve 10 adet lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (LTKYB) tasarlamıştır. LTKYB tasarımında farklı uzunluk ve boy/çap oranlarında 3 makro ile 1 mikro çelik lif kullanarak tekil ve karma LTKYB karışımları üretildi. Karma LTKYB karışımları her makro lifin mikro lif ile birlikte ağırlıkça 2 farklı oranda (%50 ve %75) kullanımı ile hazırlandı. LTKYB serisinin eğilme çekme mukavemetleri kontrol KYB serisine göre oldukça yüksek çıkmıştır. Makro lifler en yüksek eğilme ve çekme dayanımı sonuçlarını vermiştir. Ayrıca karışımdaki lif boyutlarının ve makro lif yoğunluğunun azalması, düşük eğilme çekme mukavemeti değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Makro liflerin mikro liflerle birlikte belirli oranlarda kullanılması daha iyi eğilme-çekme mukavemeti özellikleri sağlamıştır (Bozkurt ve ark., 2013).

Sato ve ark. (2000) uzun ve kısa çelik liflerin bir arada kullanıldığı karma lifli betonların basınç ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için çeşitli deneyler yapmışlardır. Kısa lif olarak 6,13 ve 20 mm uzunluğundaki düz lifler, uzun lif olarak ise 30 mm uzunluğunda kancalı lifler kullanılmıştır. Kısa lif yüzdesi %0 ile %6 arasında, uzun lif yüzdesi ise %0 ile %2 arasında değişmektedir. Lif yüzdesinin 27 artmasıyla beraber kompozitlerin basınç ve çekme dayanımlarının arttığı ve bu dayanım değerlerinin lifin narinlik oranı ile hacim yüzdesinin bir fonksiyonu olduğu, yapılan çalışmalardan görülmüştür.

Ayrıca, uzun lif miktarının artmasının süneklik için kısa liflerden daha iyi olduğu ve uzun lif miktarının, çekme gerilmesi-çatlak açılımı eğrisinde yumuşama rejiminin şeklini büyük ölçüde etkilediği sonuçları da bu çalışmadan elde edilmiştir (Sato ve ark., 2000).

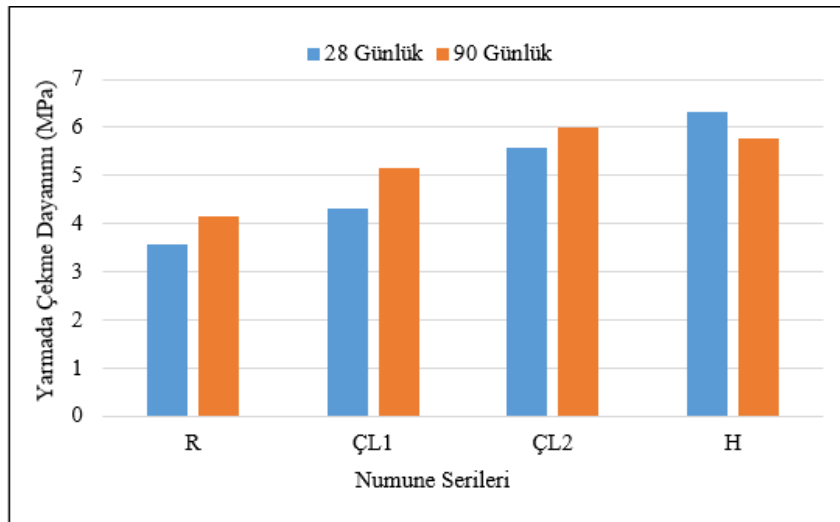
Türk ve arkadaşlarının benzer işlenebilirliğe sahip farklı boyut (makro ve mikro) ve narinlikteki çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımların mühendislik ve işlenebilirlik özelliklerini araştırdığı çalışmada, karışıma makro ve mikro çelik liflerin ilave edilmesi basınç dayanımında azalmaya neden olurken, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Lifli karışımlar içerisinde yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, karma lifli KYB numunelerinde görülürken eğilmede çekme dayanımında ise en fazla artışın sadece makro lif içeren karışımda olduğu tespit edilmiştir (Türk ve ark., 2022).



Şekil 15. Çelik lifli betonların eğilme dayanım değerlerinin yüzdelik değişimleri (%).

### 3.4. Yarmada çekme dayanım değerleri

Çelik lifli betonların yarmada çekme dayanım değerlerine hibritlenmenin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen 28 günlük ve 90 yarmada çekme ortalama değerleri Şekil 16’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde; 28 günlük değerlerde minimum ve maksimum dayanım değerleri sırasıyla 3.58 ve 6.37 MPa olarak R ve H serilerinden elde edildiği görülmektedir. 90 günlük değerlerde minimum ve maksimum dayanım değerleri sırasıyla 4,15 ve 5,99 MPa olarak R ve ÇL2 serilerinden elde edildiği görülmektedir.

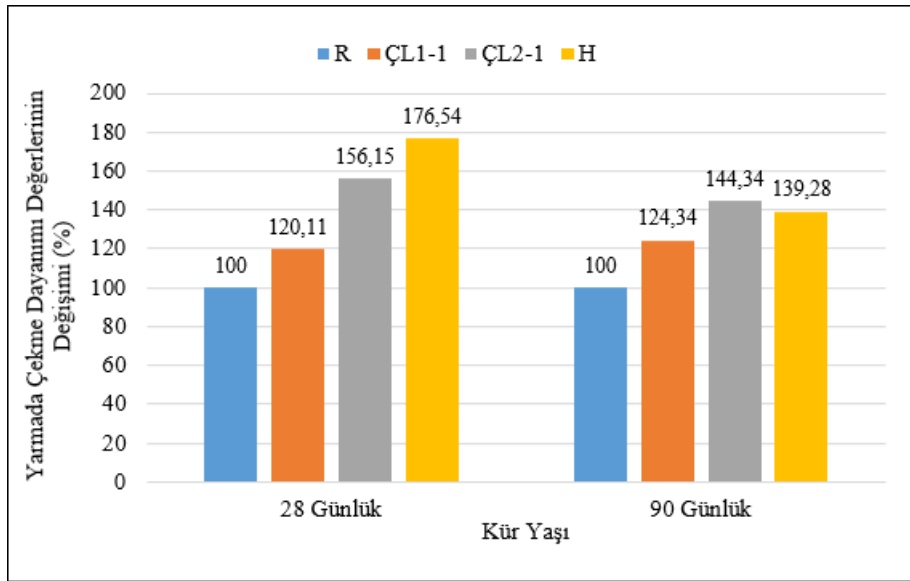


Şekil 16. Çelik lifli betonların yarmada çekme dayanım değerleri (MPa).

Yarmada çekme dayanım değerlerinin referans serisine oranla yüzde değişim değerleri incelendiğinde 28 günlük değerler için minimum yaklaşık %20 artış ile ÇL1 serisinden, maksimum artış ise %76.4 ile H serilerinden elde edildiği görülmektedir. 90 günlük değerler için minimum %24.34 artışla ÇL1 serisinden, maksimum artış ise %44.34 artış ile ÇL2 serilerinden elde edildiği görülmektedir. Bu durumun 28 günlük yarmada çekme değerleri için H serisinde bulunan %0.5 ÇL1 ve %0.5 ÇL2 liflerinin, 90 günlük yarmada çekme değerleri için ÇL2 serisindeki liflerin yarma eksenine dik doğrultuda diğer serilere oranla daha fazla lif olduğu ve yarma dayanım deney numunesinde 200 mm'lik çizgi boyu olmasından kaynaklı çizgi üstün lif yoğunluğunun bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yalçın, yapmış olduğu çalışmada uçları kancalı tip çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanılmasının beton üzerinde etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, tekil ve karma çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda, lif narinliğinin ve hacim oranının artmasıyla daha yüksek yarma çekme dayanımları elde edilmiştir. Matris dayanımı yüksek olan tekli ve karma yüksek dayanımlı çelik lifli karışımlarda, yüksek çelik lif hacim oranına sahip numunelerde daha yüksek yarma çekme dayanımları belirlenmiştir. Bunun, yüksek matris dayanımlı betonlarda daha güçlü lif-matris ara yüzey bağının oluşmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Yalçın, 2009).

Türk ve arkadaşlarının benzer işlenebilirliğe sahip farklı boyut (makro ve mikro) ve narinlikteki çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımların mühendislik ve işlenebilirlik özelliklerini araştırdığı çalışmada, karışıma makro ve mikro çelik liflerin ilave edilmesi basınç dayanımında azalmaya neden olurken, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Lifli karışımlar içerisinde yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, karma lifli KYB numunelerinde görülmüştür (Türk ve ark., 2022).



Şekil 17. Çelik lifli betonların yarmada çekme dayanım değerlerinin yüzdelik değişimleri (%).

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, lif şekli, lif narinliği, tekil ve hibrit lif kullanımının; çelik lifli betonun mekanik performansı üzerine etkilerinin deneysel araştırması sunulmuştur. Yapılan çalışma ile numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde, lif geometrisinin, narinliğinin yanı sıra lif dağılımının ve lif açısının sonuçlar üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Farklı mekanik özellikler için en iyi performansın farklı numunelerden elde edildiği görülmüştür.

Lifler, basınç dayanımı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip iken, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı üzerinde pozitif yönde daha etkili olmuştur.

Basınç dayanımında mikro liflerin pozitif etkisi görülürken, eğilmede çekme dayanımında daha yüksek narinliğe sahip kancalı çelik liflerin pozitif etkileri görülmüştür.

Yarmada çekme dayanımı sonuçları üzerinde en önemli faktörlerin lif yoğunluğu ve lif açısı olduğu sonucuna varılmıştır.

Liflerin homojen dağılımı ve lif açıları performans üzerinde etkili olduğundan literatürdeki konuyla alakalı var olan yöntemler araştırılmalı ya da yenilikçi bir yöntem geliştirilerek bu problemlerin önüne geçilmelidir.

Lif kenetlenme probleminin önüne geçebilmek için farklı narinlikteki liflerin kombinlemesinin performansı incelenmelidir.

## Kaynakça

- ACI 544.1R-96, A. (2002). *State-of-the-art report on fiber reinforced*. USA, American Concrete Institute.
- Açıkgenç, M. (2015). *Çelik lif donatılı betonların tasarımı için grafik tabanlı bir yaklaşım*. (Doktora tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ, Türkiye.
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Emad, W., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Tayeh, B. A., & Azevedo, A. R. G. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part III: fresh and hardened properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01289. doi:10.1016/j.cscm.2022.e01289
- Alkayış, M. H., & Başyigit, C. (2021). Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24, 455-462. doi:10.31590/ejosat.897865
- Aral, M. (2006). *Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım*. (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Arslan, E., & Sarıkaya, H. (2021). Farklı boyutlardaki poliamid, poliester ve jüt liflerin betonun mekanik davranışa etkisi. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1, 30-49. doi:10.47137/usufedbid.853757
- Badugea, S. K., Navaratnam, S., Abu-Zidan, Y., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., Zhang, G., & Aye, L. (2021). Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: a review on material mix design, processing, interlayer bonding and reinforcing methods. *Structures*, 29, 1597-1609. doi:10.1016/j.istruc.2020.12.061
- Banthia, N., Yan, C., & Bindiganaville, V. (2000, September). *Development and application of high performance hybrid fiber reinforced concrete*. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37, 1366-1372. doi:10.1016/j.cemconres.2007.05.005
- Bozkurt, N., Yazıcıoğlu, S., & Gönen, T. (2013). The effect of single and hybrid fibres on fibre reinforced self compacting concrete produced with high level of fly ash usage. *SDU International Technologic Science*, 5(2), 11-21.
- Brandt, A. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86, 3-9. doi:10.1016/j.compstruct.2008.03.006
- Çivici, F., & Güngör, E. (2016). Karma lifli betonların tokluk açısından değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 365-376.
- Demirhan, S. (2017). *Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar*. (Doktora tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Gopalratnam, V., & Gettu, R. (1995). On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Composites*, 17, 239-254. doi:10.1016/0958-9465(95)99506-O
- Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*, 83, 146-159. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016
- Khalilpour, S., BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). A review on concrete fracture energy and effective parameters. *Cement and Concrete Research*, 120, 294-321. doi:10.1016/j.cemconres.2019.03.013

- Kızılırmak, C., Aydın, S., & Yardımcı, M. Y. (2019). Çelik lif kanca geometrisinin yüksek dayanımlı lifli betonların statik ve darbe yükleri altında eğilme özelliklerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1609-1627. doi:10.17341/gazimmfd.570893
- Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), 26-35.
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Nam-Wook, K., Saeki, N., & Horiguchi, T. (2000). Crack and strength properties of hybrid fiber reinforced concrete at early ages. *Transactions of The Japan Concrete Institute*, 21, 241-246.
- Nataraja, M., Dhang, N., & Gupta, A. (1999). Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21, 383-390. doi:10.1016/S0958-9465(99)00021-9
- Neville, A. (1991). *Properties of Concrete*. London: Pitman.
- Sato, Y., Van Mier, J. G. M., & Walraven, J. C. (2000, September). *Mechanical characteristics of multi-modal fiber reinforced cement based composites*. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France.
- Sidiq, A., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2019). Is concrete healing really efficient? a review. *Construction and Building Materials*, 205, 257-273. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002
- Taşdemir, M., Şengül, Ö., Şamhal, E., & Yerlikaya, M. (2006). *Endüstriyel Zemin Betonları*. İstanbul: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Tittelboom, K. V., & De Belie, N. (2013). Self-Healing in cementitious materials-a review. *Materials*, 6(6), 2182-2217. doi:10.3390/ma6062182
- Topçu, İ. B., & Boğa, A. R. (2005). Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2), 1-14.
- TS 802. (2016). *Beton karışım tasarımı hesap esasları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2. (2019). *Beton - taze beton deneyleri - Bölüm 2: çökme (slump) deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. (2019). *Beton - sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5. (2019). *Beton - sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6. (2024). *Beton - sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türk, K., & Kına, C. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671-678.
- Türk, K., Katlav, M., & Turgut, P. (2022). Karma lif takviyeli KYB karışımlarının işlenebilirlik ve mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 400-410. doi:10.17798/bitlisfen.984473
- Yalçın, M. (2009). *Çelik lif donatılı betonların performans dayalı tasarımı ve optimizasyonu*. (Doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye.
- Yalçın, M., Taşdemir, C., & Taşdemir, M. A. (2009). Çelik lif donatılı betonların performans sınıflarının belirlenmesi. *İtüdergisi/d*, 8(6), 97-108.
- Yardımcı, M. (2007). Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı. (Doktora tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Yavuz, D., Güler, S., Korkut, F., & Türkmenoğlu, Z. F. (2016). Çelik lif katkıli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Engineering Sciences*, 11(4), 93-99. doi:10.12739/NWSA.2016.11.4.1A0366
- Yazıcı, Ş. (2017). *Çelik lif boyu ve kullanım oranının çelik lifli betonun özelliklerine etkisi*. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku, Azerbaycan.