

# Çelik ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Makro Lif Takviyeli Betonların Kırılma Davranışları\*

Sümer Sertkaya<sup>1</sup>, Hakan Erdoğın<sup>2</sup>, Fatih Özalp<sup>3</sup>, Burcu Akçay<sup>4</sup>

## Özet

Bu çalışmada, farklı su/bağlayıcı oranlı betonlarda çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro lif kullanımının mekanik ve kırılma parametrelerine etkileri incelenmiştir. Su/çimento oranı 0,50 olan referans betonuna 3 kg/m<sup>3</sup> yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ilavesiyle betonların eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi referans betona göre sırasıyla %12 ve %18 oranında artmıştır. Bu beton da makro çelik lif ilavesiyle kırılma enerjisinde yaklaşık 40 kat artma olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan betona hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lifler katılmıştır. Karma makro lif kullanımı ile yüksek performanslı betonun özgül kırılma enerjisi 24 kat artarken eğilme dayanımı %92 artmıştır. Diğer yandan su/bağlayıcı oranı 0,28 olan diğer bir seriye %2 oranında polietilen makro lif katıldığında özgül kırılma enerjisi 14 kat artmış, yarmada çekme dayanımında ise %10 artış görülmüştür. Tüm üretilen betonların mekanik ve kırılma özellikleri yanında serbest rötire ölçümleri de yapılmıştır. Sonuçlar, beklenildiği gibi, lifli betonların kuruma rötresinin referans betona göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, yüksek yoğunluklu makro liflerin rötreyi önlemede özellikle erken yaşlarda çelik liflere göre daha etkili olduğu gösterilmiştir.

## Fracture Behavior of Steel and High Density Polyethylene Macro Fiber Reinforced Concrete

In this paper, the effects of the use of steel and high density polyethylene macro fibers on mechanical and fracture properties of concrete with varying water to binder ratios were investigated. Addition of 3 kg/m<sup>3</sup> of high density polyethylene macro fibers to the concrete with water to cement ratio of 0,50 resulted in a 12% increase in flexural strength and 18% increase in fracture energy compared to the reference concrete. There was an almost 40 times increase in the fracture energy of this concrete with the addition of steel macro fibers. 1% steel and 1% polyethylene macro fibers in volumetric basis were added to concrete with water to binder ratio of 0,35. With the use of hybrid fibers the fracture energy of the high strength concrete was increased 24 times, while the flexural strength increased 92% compared to the plain concrete. However, in other series with water to binder ratio of 0,28, the addition of 2% polyethylene macro fibers was resulted in 14 times increase in the fracture energy, while 10% increase was seen in the splitting tensile strength compared to the plain concrete.

## 1. GİRİŞ

Lif takviyeli betonlar, rastgele ve üniform dağılılı süreksiz çeşitli malzemeden olabilen lifleri içermektedir. Bu kompozit malzemeler, normal betonda kullanılan bileşenlerin (ince ve kaba agrega, çimento, kimyasal ve/veya mineral katkı) yanı sıra ilave edilen lifler sayesinde normal betondaki yarı gevrek davranışı değiştirir. Beton, çekme dayanımı zayıf olan bir malzeme olduğu için plastik ve sertleşmiş halde birçok çatlak içerir. Zamanla ve gerilmelerle bu çatlakların boyutları ve biçimleri değişerek betonun içerisine doğru ilerler ve betonun geçirirliliğini azaltarak beton ve gömülü donatıda dırabilite problemlerine yol açar. Bu çatlakları önleminin bir yolu da betonun içerisine süreksiz lifler katarak çekme dayanımını ve çekme şekil değiştirme kapasitesini artırmaktır [1]. Yeterli bir karıştırma ve uygun beton bileşenleri oranları ile lifler beton içerisinde homojen olarak her yönde dağılır [2]. Taze halde iyi dağılmış bu lifler betonun plastik rötire çatlaklarını önler. Sertleşmiş halde ise lifler mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engeller [3]. Bunun yanı sıra lifler köprülenerek mevcut makro çatlakları bir arada tutarak betonun dağılıma ve ayrılmasını azaltırlar. Beton lif donatısı olarak metal, polimer, cam, mineral ve doğal malzeme kullanılabilir. Sıkça

<sup>1)</sup> sertkaya1001@yahoo.com, Kocaeli Üniversitesi <sup>2)</sup> hakan.erdogan@kocaeli.edu.tr, Kocaeli Üniversitesi <sup>3)</sup> fatih.ozalp@iston.istanbul, İSTON AŞ, İstanbul

<sup>4)</sup> burcu.akcay@kocaeli.edu.tr, Kocaeli Üniversitesi

<sup>(\*)</sup> Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

kullanılan çelik liflerin yanı sıra polimer liflerden polipropilen kullanım oranı arttığı gibi naylon ve yüksek dayanımlı polietilen lifler de kullanılmaktadır [4]. Yüksek yoğunluklu polietilen liflerin %1-1,5 oranlarında kullanımı ile çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitler elde edilmiştir [5, 6]. Bunun yanı sıra çelik liflerle beraber karma olarak kullanılan bu lifler sayesinde üstün dayanım ve tokluk değerleri elde edilmiştir [7]. Beton dökümü esnasındaki imalat kolaylığı sağlaması ve ekonomik olması sebeplerinden ötürü polimer lifler betonarme temellerde [8], prefabrik elemanlarda [9] ve püskürtme beton uygulamalarında [10] kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle polimer liflerin erken yaşlardaki çatlakları önleme amacı ile kullanılması yaygınlaşmaktadır [11]. Makro polimer lifler yalnızca plastik rötre çatlaklarını önlemede değil aynı zamanda kuruma rötresini önlemek amacıyla da kullanılmaktadır [12]. Makro polimer liflerin

betondaki toplam nem kaybına veya nem kayıp hızına herhangi bir etkisi yokken, taze haldeki betonun bütünlüğünü arttırarak plastik rötre çatlaklarını kontrol etmektedir [13]. Özellikle erken yaşlardaki rötreyi önlemede uzun makro liflerin kısa makro liflerden daha etkili olduğu çalışmalar da literatürde mevcuttur [14].

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1 Malzemeler ve Karışım Oranları

Bu çalışmada toplam 5 beton karışımı hazırlanmıştır. Tüm betonlarda CEM 42,5R çimentosu kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,28 olan karışımlarda çimentonun ağırlıkça %16'sı metakaolin ile yer değiştirilmiştir. Kullanılan çimento ve metakaolinin yoğunlukları sırası ile 3,17 ve 2,50 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Kireçtaşı kökenli kırma taşlar ile kuvert kumu

karışımlarda kullanılmıştır. Yıkamış kırma taş No I, kırma kum ve doğal kumun birim ağırlıkları DYK halde sırası ile 2.720, 2.610 ve 2.400 kg/m<sup>3</sup> iken su emme değerleri ise sırasıyla %1,1, 1,2 ve 2,1 olarak belirlenmiştir (ASTM C127 -C128 1994). Taze betonların işlenebilirliğini yalın betona benzer tutabilmek için ticari olarak bulunan polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton karışımlarında özellikleri Tablo 1'de verilen kanca uçlu çelik liflerin yanı sıra yüksek yoğunluklu (1,1 g/cm<sup>3</sup>) polietilen makro lifler kullanılmıştır.

**Tablo1.** Kullanılan liflerin boyut ve dayanım özellikleri.

|                                     | Çelik lif | Yüksek yoğunluklu polietilen lif |
|-------------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Boy (L) mm                          | 60        | 60                               |
| Çap (d) mm                          | 0.90      | 0,90                             |
| Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) | 1.100     | 2.000                            |

Su/çimento oranı 0,50 olan referans betonuna 20kg/m<sup>3</sup> (%0,26) çelik makro lif ve diğer bir seride 3 kg/m<sup>3</sup> (%0,33) yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ilave edilmiştir. Yüksek performanslı betonlarda makro lif kullanımının etkisini belirleyebilmek için su/bağlayıcı oranı 0,35 olan ve çimento ağırlığının %16 oranında metakaolin içeren betona hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lifleri katılmıştır. Son olarak su/bağlayıcı oranı 0,28 olan ve çimento ağırlığının %16 oranında metakaolin içeren seriye de %2 oranında polietilen makro lif katılmıştır. Üretilen betonların karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Beton üretiminde çimento ve varsa metakaolin kuru olarak karıştırılmış, daha sonra agregalar ilave edilerek beraber karıştırılmıştır. Su ve süperakışkanlaştırıcının yarısı ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcının kalan yarısı homojenliği sağlamak için dereceli olarak ilave edilmiştir. Lifler karışımı düzgün dağılacak şekilde yayılmış ve karıştırmaya devam edilmiştir. Tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı miktarı yayılma deneyi sonuçları benzer olacak şekilde (43±2 cm) belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Üretilen betonların karışım oranları (1m<sup>3</sup>).

| Beton içeriği   | REF 0,50 | 0,50<br>20kg/m <sup>3</sup> (%0,26) st | 0,50<br>3kg/m <sup>3</sup> (%0,33) PE | 0,35<br>1% st+1%PE | 0,28 2%PE |
|-----------------|----------|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------|
| Beton Kodu      | N        | NS                                     | NP                                    | YSP                | CYP       |
| Çimento (kg)    | 421      | 444                                    | 440                                   | 424                | 459       |
| Su (kg)         | 210      | 222                                    | 220                                   | 176                | 153       |
| Metakaolin (kg) | 0        | 0                                      | 0                                     | 81                 | 87        |
| Doğal Kum (kg)  | 341      | 359                                    | 357                                   | 325                | 331       |
| Kırma Kum (kg)  | 601      | 634                                    | 629                                   | 573                | 583       |

| Beton içeriği                   | REF 0,50 | 0,50<br>20kg/m <sup>3</sup> (%0,26) st | 0,50<br>3kg/m <sup>3</sup> (%0,33) PE | 0,35<br>1% st+1%PE | 0,28 2%PE |
|---------------------------------|----------|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------|
| Kırma Taş (kg)                  | 773      | 815                                    | 809                                   | 737                | 750       |
| Çelik lif (kg)                  | 0        | 20                                     | 0                                     | 73                 | 0         |
| Polietilen lif (kg)             | 0        | 0                                      | 3,07                                  | 8,49               | 17,28     |
| Kimyasal Katkı (kg)             | 6,89     | 8,99                                   | 9,63                                  | 31,92              | 34,99     |
| Hava (%o)                       | 14,01    | 37,40                                  | 30,15                                 | 32,04              | 29,65     |
| Birim ağı. (kg/m <sup>3</sup> ) | 2.352    | 2.459                                  | 2.442                                 | 2.322              | 2.336     |

### 2.3 Deney Düzenekleri

Kırılma enerjisini saptamak için yapılan deneyler RILEM 50-FMC Teknik Komitesinin önerilerine göre yapılmıştır [15]. Standartta öngörülen 50 mm'lik çentiğin yerine daha çok iri agreganın etkin alanda bulunmasını sağlamak amacıyla kiriş numuneler elmas testere ile kesilerek 40 mm derinlikte bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının 60×100 mm olması sağlanmıştır. Kiriş numunelerde maksimum kapasitesi 100 kN olan kapalı çevrimli çatlak ağız açılma kontrollü deney makinesi ile eğilme deneyi yapılmıştır. Kirişin ortasına yerleştirilen bir adet sehim ölçer (LVDT) ve çatlak ağız açılma ölçer (CMOD) ile sırasıyla sehim ve çatlak ucu açılması ölçülmüş, her bir kiriş numune için yük-kiriş ortasındaki sehim ve yük-çatlak ağız açılması eğrileri elde edilmiştir.

Kiriş numuneler ile net eğilme dayanımı, silindirik numuneler (Ø100 mm×200 mm) ile elastisite modülü ve basınç dayanımı, eğilme deneyinde kırılan kiriş parçaları ile yarma çekme

dayanımı belirlenmiştir. Tüm mekanik deneyler örneklerin pozolan içermesinden dolayı 50. günden sonra yapılmıştır.

Mekanik deneylerin yanı sıra kuruma rötresi 70×70×280 mm boyutundaki prizmalarda lineer ölçümlerle belirlenmiştir. Dökümden bir gün sonra kalıptan çıkarılan örneklerle çelik pimler yapıştırılmış ve numunelerde oluşan boy değişimleri ASTM C41'e göre 0,001 mm/m hassasiyetinde ölçülmüştür. Numuneler laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Her bir seri için 2 adet prizmadan alınan ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Test edilen beton serilerinin mekanik özellikleri ile bazı kırılma parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Tüm beton serilerinde lif kullanımı ile mekanik dayanımın arttığı görülmektedir.

**Tablo 3.** Üretilen beton karışımlarının mekanik özellikleri ile kırılma parametreleri.

| Beton kodu | $f_c$ , MPa | $W_o$ , Nmm | $G_F$ , N/m | $\delta_o$ , mm | $f_b$ , MPa | $f_{st}$ , MPa |
|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|----------------|
| N          | 44,9        | 214,2       | 35,7        | 0,37            | 5,0         | 7,6            |
| NS         | 65          | 8311,2      | 1385,2      | 12,75           | 4,9         | 8,2            |
| NP         | 56,6        | 253,2       | 42,2        | 2,63            | 5,6         | 7,7            |
| YSP        | 96,1        | 9995,5      | 1665,9      | 4,51            | 11,3        | 11,7           |
| CYP        | 95,2        | 5202,4      | 867,1       | 16,19           | 4,7         | 7,8            |

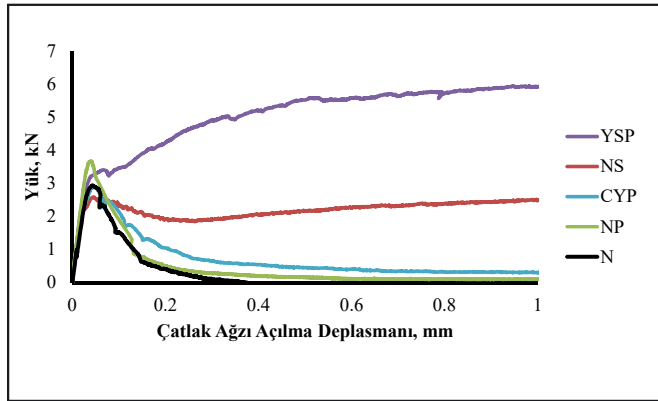
$f_c$ : basınç dayanımı;  $W_o$ : yük deplasman eğrisinin altında kalan alan;  $G_F$ : kırılma enerjisi;  $\delta_o$ : son çatlak ağız açılması;  $f_b$ : net eğilme dayanımı;  $f_{st}$ : yarma çekme dayanımı.

Benzer taze beton özellikleri göstermesi istendiği için lif içeren karışımlarda yüksek oranlardaki süperakışkanlaştırıcıların kullanılması nedeniyle büyük boşluk miktarları düşük olmuş ve böylece üretilen tüm betonlar yüksek basınç dayanımlarına sahip olmuştur. Yerleştirmedeki bu etkinin, su/bağlayıcı oranı 0,50 olan N serisine çelik lif katıldığı zaman (NS kodlu beton) süperakışkanlaştırıcı miktarının arttırılmasıyla Tablo 2'de görülen beton birim ağırlığındaki artmaya ve

Tablo 3'te verilen basınç dayanımdaki artmaya neden olduğu görülmektedir. Bu durum yerleştirme işlemlerinin beton kalitesi üzerindeki etkisinin belirleyici olduğunu bir kere daha göstermiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,50 olan betonda, kullanılan çelik lif ilavesiyle polietilen lif ilavesine göre daha yüksek yarmada çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir.

Her bir seriyi temsil eden örneklerin seçilerek farklı tür ve miktarlardaki liflerin değişik su/bağlayıcı oranlı betonların

yük-çatlak ağız açılması eğrileri üzerindeki etkisinin 0,5 mm çatlak ağız açılma değerine kadar olan bölümü Şekil 1'de görülmektedir. Eğilme altında sehim yapabilme yeteneğini gösteren çatlak ağız açılmasının son değeri su/çimento oranı 0,50 olan N betonunda 0,37 mm iken polietilen lif içeren betonda 2,63 mm olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere su/bağlayıcı oranı 0,50 olan betonlarda (N serisi) makro polietilen lif ilavesi ile (NP serisi) çatlak ağız açılma değeri dolayısıyla sehim yapabilme kapasitesi 7 kat artarken çelik lif ilavesi ile (NS serisi) yaklaşık 35 kat artmıştır. Bu betonlarda çelik lif ilavesi ile tepe yükünde önemli bir değişiklik görülmez iken polietilen lif ilavesi ile eğilme dayanımında %12 artış görülmüştür (Tablo 3). Diğer yandan çelik lif kullanımı ile tepe yükü sonrasında eğrinin kademeli olarak azaldığı ve böylelikle eğri altında kalan alanın ve dolayısıyla kırılma enerjisinin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir.



**Şekil 1.** Her bir beton serisini temsil eden örneklerin üç noktalı eğilme altındaki yük -0,5 mm'ye kadar çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

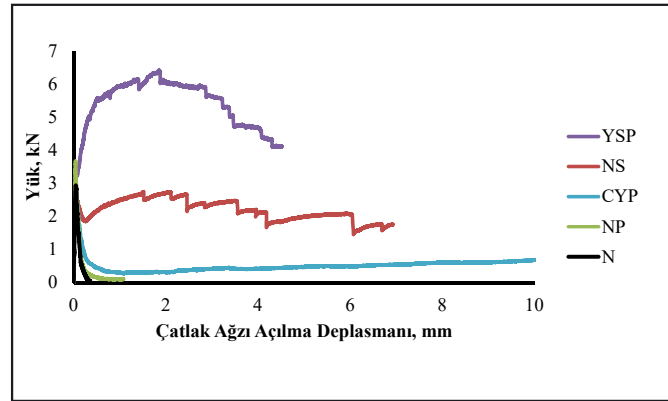
Üretilen tüm numuneler üzerinde daha önce belirtildiği gibi serbest rötire ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,50 olan betonlarda lif ilavesi ile kuruma rötresi azalmış ve bu etki polietilen makro lif kullanımında daha belirgin olmuştur. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça toplam serbest rötire artmıştır. Beton karışımında su miktarı azalmasına rağmen sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısındaki boşlukların küçülmesi ile ortamdan çıkan suyun rötreye etkisi daha büyük olmaktadır. Yüksek dayanımlı bu betonlarda da lif kullanımı ile kuruma rötresinin büyüklüğünün azaldığı ve yüksek yoğunluklu makro liflerin rötreyi önlemede özellikle erken yaşlarda çelik liflere göre daha etkili olduğu görülmüştür.

**Tablo 4.** Üretilen betonların toplam serbest rötire ölçüm sonuçları.

| Beton içeriği | REF 0,50                                   | 0,50<br>20kg/m <sup>3</sup> st | 0,50<br>3kg/m <sup>3</sup> PE | REF<br>0,35 | 0,35<br>1% st+1%PE | REF<br>0,28 | 0,28 2%PE |
|---------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------|-------------|-----------|
| Beton Kodu    | N                                          | NS                             | NP                            |             | YSP                |             | CYP       |
| Beton yaşı    | toplam serbest rötire (×10 <sup>-6</sup> ) |                                |                               |             |                    |             |           |
| 3             | 0                                          | 0                              | 0                             | 0           | 0                  | 5           | 0         |
| 7             | 147                                        | 121                            | 78                            | 176         | 122                | 183         | 101       |
| 28            | 390                                        | 377                            | 231                           | 437         | 240                | 451         | 232       |
| 90            | 541                                        | 522                            | 381                           | 603         | 399                | 634         | 341       |
| 180           | 610                                        | 593                            | 474                           | 683         | 451                | 701         | 399       |

Üretilen betonlardan yük-çatlak ağız açılması eğrilerinin 10 mm'ye kadar olan bölümü Şekil 2'de verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan ve çelik ile polietilen lifin karma olarak kullanıldığı YSP serisinde diğer serilere göre çok yüksek tepe yükü görülürken su/bağlayıcı oranı 0,28 olan ve %2 polietilen lif içeren CYP serisinde ise çatlak ağız açılma deplasmanı belirgin bir şekilde artmıştır.

YSP ve CYP serilerinin yalın betonları daha önce başka bir çalışmada üretilmiştir [16]. Bu betonların özgül kırılma enerjileri sırasıyla 65,7 ve 58 N/m, eğilme dayanımları ise 5,9 ve 6,6 MPa olarak bulunmuştur. Eğilme deneyinde kullanılan kirişlerden kalan parçalar ile bulunan yarma çekme dayanımları ise sırasıyla 6,8 ve 7,1 MPa olarak belirlenmiştir. Karma makro lif kullanımı ile (YSP) yüksek performanslı betonun özgül kırılma enerjisi 24 kat artarken eğilme dayanımı %92 artmıştır. Diğer yandan toplam %2 lif hacminin tamamının polietilen makro lif olarak kullanıldığı su/bağlayıcı oranı 0,28 olan seride ise yalın betonuna göre özgül kırılma enerjisi 14 kat artmış, yarmada çekme dayanımında ise %10 artış görülmüştür.



**Şekil 2.** Her bir beton serisini temsil eden örneklerin üç noktalı eğilme altındaki yük - çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

#### 4. SONUÇLAR

Çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro lif kullanılarak tamamlanmış deneysel çalışmalar ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Su/bağlayıcı oranı 0,50 olan normal dayanımlı betonlarda 3 kg/m<sup>3</sup> yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ilavesiyle betonların eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi referans betona göre sırasıyla %12 ve %18 oranında artmıştır. Aynı betona 20 kg/m<sup>3</sup> çelik makro lif ilavesi ile kırılma enerjisinde yaklaşık 40 kat artma olmuştur.
- Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan ve çimento ağırlığının %16 oranında metakaolin içeren betona hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lif katılarak elde edilen karma lif takviyeli betonların özgül kırılma enerjisi lif içermeyen yalın betonuna göre 24 kat artarken eğilme dayanımı %92 artmıştır.
- Su/bağlayıcı oranı 0,28 olan ve çimento ağırlığının %16 oranında metakaolin içeren betona %2 oranında polietilen makro lif katıldığında özgül kırılma enerjisi lif içermeyen yalın betonuna göre 14 kat artmış, yarmada çekme dayanımında ise %10 artış görülmüştür.
- Serbest rötre ölçümleri lifli betonların kuruma rötresinin referans betona göre daha düşük olduğunu ve yüksek yoğunluklu makro liflerin rötreyi önlemede özellikle erken yaşlarda çelik liflere göre daha etkili olduğu görülmüştür.

#### Kaynaklar

1. Grzybowski, M., S.P. Shah, S.P., "Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete", **ACI Mater. J.**, 87(2), pp. 138-148, 1990.
2. Akcay, B., Tasdemir, M.A., "Mechanical Behaviour and Fibre Dispersion of Hybrid Steel Fibre Reinforced Self-compacting Concrete", **Constr Build Mater**, 28(1), pp. 287-293, 2012.
3. ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, Committee 544, 2002.
4. Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C., "Strength Properties of Nylon and Polypropylene Fiber Reinforced Concretes", **Cem. Concr. Res.**, 35, pp. 1546-1550, 2005.
5. Kong, H.J., Bike, S.G., Li, V.C., "Development of a Self-consolidating Engineered Cementitious Composite Employing Electrosteric Dispersion/stabilization" **Cem Concr Compos**, 25(3), pp. 301-9, 2003.
6. Zhang, J., Li, V.C., Nowak, A.S., Wang, S., "Introducing Ductile Strip for Durability Enhancement of Concrete Slabs", **J Mater Civ Eng**, 14(3), pp. 253-61, 2002.
7. Ahmed, S.F.U., Maalej, M., Paramasivam P., "Flexural Responses of Hybrid Steel Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites Containing High Volume Fly Ash", **Constr Build Mater**, 21(5), pp.1088-97, 2007.
8. Alani, A.M., Beckett, D., "Mechanical Properties of a Large Scale Synthetic Fibre Reinforced Concrete Ground Slab", **Constr Build Mater**, 41, pp. 335-44, 2013.
9. Peyvandi, A., Soroushian, P., Jahangirnejad, S., "Enhancement of the Structural Efficiency and Performance of Concrete Pipes Through Fiber Reinforcement", **Constr Build Mater**, 45, pp. 36-44, 2013.
10. Kaufmann, J., Frech, K., Schuetz, P., Munch, B., "Rebound and Orientation of Fibers in Wet Sprayed Concrete Applications", **Constr Build Mater**, 49, pp. 15-22, 2013.
11. Pelisser, F., Barros da A.S., Neto S., La Rovere H.L., Caldas de R., Pinto, A., "Effect of the Addition of Synthetic Fibers to Concrete Thin Slabs on Plastic Shrinkage Cracking", **Constr. Build. Mater.**, 24, pp. 2171-2176, 2010.
12. Chavooshi, A., Madhoushi, M., "Mechanical and Physical Properties of Aluminum Powder/MDF Dust/polypropylene Composites", **Constr Build Mater**, 44, pp. 214-20, 2013.
13. Kim, J.H.J., Park, C.G., Lee, S.W., Lee, S.W., Won, J.P., "Effects of the Geometry of Recycled PET Fiber Reinforcement on Shrinkage Cracking of Cement-based Composites", **Compos Part B Eng**, 39(3), pp. 442-50, 2008.
14. Najm, H., Balaguru, P., "Effect of large-diameter Polymeric Fibers on Shrinkage Cracking of Cement Composites", **ACI Mater J**, 99(4) pp. 345-51, 2002.
15. RILEM Technical Committee 50-FMC, "Draft Recommendation: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams", **Materials and Structures**, Vol. 18, pp. 287-291, 1985.
16. Akcay, B., Sengul, C., Tasdemir, M.A., "Fracture Behavior and Pore Structure of Concrete with Metakaolin", **Adv. Concr, Constr.**, 4(2), pp. 71-88, 2016.