

**Atf İçin:** Özalp, F. (2023). Kür Koşullarının Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Betonun (SIFCON) Kırılma Enerjisi ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkileri. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 406-418.

**To Cite:** Ozalp, F. (2023). Effects of Curing Regimes on Fracture Energy and Permeability Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON). *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 406-418.

**Kür Koşullarının Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Betonun (SIFCON) Kırılma Enerjisi ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkileri**

Fatih ÖZALP<sup>1\*</sup>

**Öne Çıkanlar:**

- Etüv kürü SIFCON'un mekanik davranışını geliştirmektedir
- Etüv kürü SIFCON'un geçirimsizliğini arttırmaktadır
- Liflerin kullanılması SIFCON'un kırılma enerjisini arttırmaktadır

**Anahtar Kelimeler:**

- Sifcon
- Lif
- Buhar kürü
- Etüv kürü
- Kırılma enerjisi
- Geçirimsizlik

**ÖZET:**

Bu çalışmada, normal mukavemetli (3D) ve yüksek mukavemetli (5D) çelik lifler ve poliolefin esaslı sentetik lif içeren SIFCON'un 90°C buhar kürü ve 150°C etüv kürü sonrası mekanik davranışı ve özellikle de kırılma enerjisi değerleri incelenmiştir. Ayrıca ısıl kür işlemlerinin SIFCON'un geçirimsizlik özelliklerine etkisi kılcal su emme testleri ile belirlenmiştir. Çelik lifler hacimce %4 ve %8 oranında kullanılmıştır. Bununla birlikte, poliolefin lif sadece %4 oranında kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla lif kullanılmayan referans numunelerde hazırlanmıştır. En yüksek kırılma enerjisi değerleri, 19,7 kN/m olarak 5D tipi yüksek dayanımlı çelik lif içeren numunelerde elde edilmiştir. Lifli karışımlar arasında ise en düşük kırılma enerjisi, poliolefin lifleri içeren numunelerde 5,7 kN/m olarak belirlenmiştir. Geçirimsizlik testlerinde ise etüv kürü uygulanan numunelerin kılcal su emme değerleri buhar kürü uygulanan numunelere göre daha yüksektir. Çalışma sonucunda, daha yüksek sıcaklıkta uygulanan etüv kürünün, SIFCON'un mekanik özelliklerini ve kırılma enerjisi değerlerini buhar kürüne göre daha fazla geliştirdiği tespit edilmiştir. Buna karşın, etüv kürünün SIFCON'un kılcal su emme değerlerini arttırdığı ve buhar kürüne kıyasla geçirimsizliği olumsuz olarak etkilediği belirlenmiştir

**Effects of Curing Regimes on Fracture Energy and Permeability Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)**

**Highlights:**

- Oven curing improves the mechanical behavior of SIFCON
- Oven cure increases the permeability of SIFCON
- Fibers increase the fracture energy of SIFCON

**Keywords:**

- Sifcon
- Fiber
- Steam cure
- Oven cure
- Fracture energy
- Permeability

**ABSTRACT:**

In this study, mechanical behavior and fracture energy values of SIFCON containing normal strength (3D) and high strength (5D) steel fibers and polyolefin-based synthetic fiber after 90°C steam curing and 150°C oven curing were investigated. In addition, the effect of thermal curing processes on the permeability properties of SIFCON was determined by capillary water absorption tests. Steel fibers were used at 4% and 8% by volume. On the other hand, polyolefin fiber was used only 4%. It was prepared in reference samples that did not use fiber for comparison purposes. The highest fracture energy values were obtained in the samples containing 5D type high strength steel fiber as 19,7 kN/m. Among the fibrous mixtures, the lowest fracture energy was found to be 5,7 kN/m in the samples containing polyolefin fibers. The capillary water absorption values of the oven-cured samples in permeability tests are higher than the steam-cured samples. As a result of the study, it was determined that the oven cure applied at higher temperature improved the mechanical properties and fracture energy values of SIFCON more than the steam cure. On the other hand, it was understood that the oven cure increased the capillary water absorption values of SIFCON and negatively affected the permeability compared to the steam cure.

<sup>1</sup>Fatih ÖZALP (Orcid ID: 0000-0001-7179-5873), İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fatih ÖZALP, e-mail: fatih.ozalp@medeniyet.edu.tr

## GİRİŞ

Prekast uygulamalar, darbe dayanımı gerektiren balistik kompozitler, dinamik yüklere maruz yapısal elemanlar ve onarım işleri gibi birçok alanda çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonun (SIFCON) kullanımı sürekli olarak artmaktadır (Rao, 2010; Gulkan ve Korucu, 2011; Tuyan ve Yazıcı, 2012; Balamuralikrishnan, 2015; Azoom, 2017; Rattan ve Singh 2019; Soylu ve Bingöl, 2019; Akçaözoğlu ve Kılılı, 2021).

SIFCON ile ilgili ilk çalışmalar 1979 yılında Lankard tarafından yapılmıştır. Lankard, çok yüksek miktarda çelik lif içeren malzemeye çimento bulamacı emdirmiş ve böylece üstün mekanik özelliklere sahip ultra yüksek performanslı bir kompozit geliştirmeyi başarmıştır (Lankard, 1984). SIFCON, çelik veya sentetik liflerin ayrı veya hibrit olarak birlikte kullanılabilmesi, son derece yüksek eğilme ve çekme dayanımlarına sahip, ultra yüksek kırılma enerjisi ve tokluk değerlerine ulaşabilen, lif takviyeli çimento esaslı bir kompozit türüdür (Yalçınkaya ve Beglarigale, 2014; Ali ve Riyad, 2018; Salih, 2018; Mohan ve ark., 2020).

SIFCON, yüksek hacimli lif oranı ile geleneksel lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerden ayrılmaktadır (Farnam ve ark., 2010; Dagar, 2012; Chun ve ark., 2013). Konvansiyonel lif takviyeli betonda (CFRC) belirli oranlardan daha fazla lif kullanılması işlenebilirlik açısından önemli sorunlar oluşturur. Hacmi %2'yi aşan lif içeriklerinde CFRC'nin karıştırılması ve yerleştirilmesi zorlaşır. SIFCON, önceden hazırlanmış ve kalıba yerleştirilmiş lifler üzerine çimento bulamacının emdirilmesini içeren ve geleneksel lif takviyeli betonlara kıyasla çok daha yüksek lif kullanılmasına izin veren bir üretim tekniğidir (Lankard, 1984).

SIFCON'un yapısal elemanlarda kullanılabilirliği ile ilgili bazı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, SIFCON'un kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, betonarme, Fiber Donatılı Beton (FRC) ve SIFCON ile üretilen yapısal elemanlar karşılaştırılmıştır. Toplam yirmi bir adet kiriş numune dökülmüş ve çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve sünekliği gibi parametreler değerlendirilmiştir. Sonuçlar, betonarme kirişlerde SIFCON kullanımının, ilk çatlak yükünde önemli bir artışa ve çatlama davranışında belirgin iyileşmeye neden olduğunu göstermiştir (Balaji ve Thirugnanam, 2018). Başka bir çalışmada, SIFCON'un yapısal güçlendirme işlemlerinde kullanılabilirliği FRP sistemi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, SIFCON'un iyi bilinen FRP yöntemine kıyasla rekabetçi bir yöntem olarak kullanılabilmesini göstermiştir (Abdollahi ve ark., 2012).

İpek ve ark.(2015) farklı dayanım ve geometrilere sahip liflerin SIFCON'un fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu kapsamda numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, schmidt test çekici, ultrasonik ses dalgası hızı ve kırılma tokluğu testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, çelik liflerin mekanik özellikler açısından polipropilen liflere göre daha iyi olduğu, maliyet dikkate alındığında dalgalı geometrili çelik liflerin daha ekonomik olduğu görülmüştür. Korozyon riskinin yüksek olduğu alanlarda çelik liflere kıyasla polipropilen liflerin tercih edilebileceğini belirtmişlerdir.

İpek ve Aksu (2019), yaptığı başka bir çalışmada farklı lif türlerinin SIFCON özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda farklı kalıp yüksekliklerinde çelik ve polimer liflerin hibrit kombinasyonunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda çelik liflerin polipropilen liflerle hibrit kullanılması eğilme mukavemetini artırmıştır. En yüksek eğilme mukavemeti, çelik lifler ve polipropilen liflerin kombinasyonu ile elde edilmiştir. Böylece polipropilen elyaf kullanımı ile hem dayanıklı hem de daha ekonomik SIFCON yapı elemanları üretilebileceğini belirtmişlerdir.

Canbaz ve Çelikten (2020), SIFCON üretiminde atık kırılmış araç lastiklerinin farklı bağlayıcılarla birlikte kullanımını araştırmışlardır. Bu kapsamda bağlayıcı olarak farklı çimento türleri kullanılarak SIFCON kompozitleri üretilmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik ses geçiş hızları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, atık kırılmış araç lastikleri kullanılarak 50 MPa basınç dayanımına sahip SIFCON'un üretilebileceği belirlenmiştir.

Çelik liflerin sentetik liflerle karşılaştırıldığı çalışmalar dışında çekme dayanımı ve kanca uç geometrileri farklı olan 3D, 4D ve 5D çelik liflerin kendi aralarında performansının incelendiği çok sayıda çalışmada gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, daha yüksek çekme dayanımı ve daha fazla sayıda kancalı uç yapısı ile 5D çelik liflerin 3D ve 4D çelik liflere kıyasla eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi beton özelliklerinde belirgin bir gelişme sağladığını göstermektedir (Venkateshwaran ve ark., 2018; Gao ve ark., 2021; Chen ve ark., 2022).

Lif türündeki değişikliklerin yanı sıra, farklı kür koşullarının ve özellikle ısı kürleme rejimlerinin SIFCON özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için de birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Aygörmez ve ark., (2020) CEM I 52.5 R (Beyaz Çimento), metakaolin ve uçucu kül kullanarak bazı SIFCON numuneleri üretmiş ve bu numunelerin basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti ve ultrases geçiş hızı (UPV) özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada 5 seri numune hazırlanmış ve tüm serilerde %5 çelik lif kullanılmıştır. Çalışmada 200°C, 400°C ve 600°C'de yüksek sıcaklık testlerinden sonra eğilme ve basınç dayanımları, UPV ve ağırlık kaybı sonuçları incelenmiştir. Ca(OH)<sub>2</sub>'den CaO'ya dönüşümün yaklaşık 400°'de başladığı ve 600°C sıcaklığa yaklaştıkça C-S-H yapısının hızla bozulduğu, ancak 300°C'den sonra bile numunelerin mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Araştırmacılar bu artışın C-S-H yapısının henüz bozulmamış olması ve matrisin kuruma büzülmesi ile ilgili olabileceğini belirtmişlerdir.

Beglarigale ve ark. (2016), standart veya buharla kürlenmiş SIFCON numunelerini 300 °C, 600 °C, 750 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bıraktılar. Çalışma sonucunda, numunelerin 300 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında mekanik performansın arttığını ancak daha yüksek sıcaklıkların zararlı etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkların SIFCON kompozitlerinde C-S-H yapısının bozulması ve çelik liflerin kesitinde azalma gibi olumsuz etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Al-mashhadani (2021), farklı lif türleri kullanarak SIFCON numuneleri ürettiği çalışmada, yüksek sıcaklık uygulamaları sonrasında çelik lif kullanılan numunelerde diğer tüm lif türlerine göre mukavemet kayıplarının daha az olduğunu tespit etmiştir.

Güler ve Akbulut (2022), 3D, 4D ve 5D çelik lif donatılı betonun oda koşullarında ve yüksek sıcaklık etkileri sonrasında basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk kapasitelerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yüksek sıcaklık etkileri altında 5D çelik liflerin, üstün kanca geometrisi ve daha yüksek çekme mukavemetleri ile betonun kalan dayanım kapasitesini iyileştirmek için 3D ve 4D çelik liflerden daha etkili olduğunu belirlediler.

Yazıcı ve ark., (2006) uçucu kül içeren SIFCON numunelerine otoklav kürlenme uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, otoklav kürlenme ile mekanik özelliklerin normal kür işlemlerine göre mekanik özellikleri iyileştirilebileceğini belirlemişlerdir.

Ali ve ark. (2022), SIFCON numunelerini hızlandırılmış bir kür işlemi olarak kaynar suda bekletmişlerdir. Çalışma sonucunda hızlandırılmış kürlenme işleminin SIFCON numunelerinin eğilme ve yarmada çekme mukavemetini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, farklı ısı kür rejimlerinin SIFCON'un mekanik dayanımları, kırılma davranışı ve kılcal su emmesi üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu kapsamda numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve kılcal su emme testleri

gerçekleştirilmiştir. Bu testlere ek olarak, kırılma enerjilerini hesaplamak için tüm numunelerin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, normal dayanımlı (3D) ve yüksek dayanımlı (5D) çelik lifler ve poliolefin esaslı sentetik lif kullanılarak laboratuvar ortamında SIFCON beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlardan küp ve kırış numuneleri üretilmiş ve bazı numunelere 90 °C sıcaklıkta buhar kürü bazı numunelere ise 150 °C'de etüv kürü uygulanmıştır. Poliolefin liflerin erime sıcaklığı 150 °C olduğundan liflerin zarar görmemesi için etüv kürü sıcaklığı bu değer olarak belirlenmiştir. Farklı ısıl kür işlemlerine tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen SIFCON numunelerinin kırılma enerjisine ısıl kür koşullarının etkisi de araştırılmıştır. Beton numunelerin geçirimsizliği için ise kılcal su emme testleri yapılmıştır. Böylece ısıl kür işlemlerinin farklı lif türleri içeren SIFCON betonun mekanik davranışı ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

### Malzemeler ve Karışım Oranları

Çalışmada kullanılan çimento CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosudur. Çimentonun özgül ağırlığı 3.16 gr cm<sup>-3</sup>, özgül yüzey alanı 3892 cm<sup>2</sup>/g, kızdırma kaybı %3.4 ve çözünmeyen kalıntı oranı %0.4'tür. Kullanılan agrega, maksimum tane boyutu 1 mm olan silis esaslı agregadır. Agreganın özgül ağırlığı 2,62 gr cm<sup>-3</sup> ve kızdırma kaybı %0.2'dir. Çalışmada kullanılan çimento ve silis agreganın bazı kimyasal özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.** Çimento ve agreganın kimyasal analizi

	SiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Çimento (%)	20.1	63.5	2.7	4.2	3.2	1.3	0.9	0.2
Agrega (%)	98.1	0.3	0.2	0.7	0.3	0.02	0.01	0.04

Karışımlarda normal ve yüksek dayanımlı 2 adet farklı çelik lif ve 1 adet poliolefin kökenli sentetik lif kullanılmıştır. Normal dayanımlı çelik lifin çekme mukavemeti 1100 MPa'dır ve yüksek dayanımlı çelik lifin çekme mukavemeti 2250 MPa'dır. Çalışmada kullanılan sentetik lif, 590 MPa çekme mukavemetine sahip poliolefin bazlıdır. Çelik lifler 60 mm ve sentetik lif 50 mm uzunluktadır. Çelik lifler 80 boy/çap (narinlik) ve sentetik lif ise 100 narinlik değerindedir. Çelik lifler 7,85 kg/dm<sup>3</sup> ve poliolefin lif 0.91 kg/dm<sup>3</sup> özgül ağırlığa sahiptir. Çelik lifler EN 14899-1 standardına uygun üretilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik liflerde, normal dayanımlı liflerden farklı olarak, kanca uçları betonla daha iyi ankraj oluşturacak biçimde şekillendirilmiştir. Bir çelik lifin çekme mukavemetinin ankrajının mukavemetine paralel olarak artması gereklidir. Aksi takdirde, ankrajın mukavemeti arttırılırsa dahi çelik liflerin çekme mukavemeti yeterli olmazsa çelik lifler kırılacaktır (Anonim, 2021). Kullanılan normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı çelik liflerin geometrisi ve poliolefin lifin görüntüsü Şekil 1'de verilmektedir.



**Şekil 1.** Normal dayanımlı (3D), yüksek dayanımlı (5D) çelik lifler ve poliolefin lif görüntüsü (Rasheed ve ark., 2018; Lee ve ark., 2021).



### Karışım tasarımı

Çalışmada normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı olmak üzere 2 farklı dayanıma ve kanca geometrisine sahip çelik lifler kullanılmıştır. Normal dayanımlı çelik lifin çekme mukavemeti 1100 MPa'dır ve yüksek dayanımlı çelik lifin çekme mukavemeti 2250 MPa'dır. Çalışmada kullanılan sentetik elyaf, 590 MPa çekme mukavemetine sahip poliolefin bazlı bir elyaftır. Çalışmada normal dayanımlı çelik lif, yüksek dayanımlı çelik lif ve poliolefin sentetik elyaf hacimce %4 miktarda aynı oranda kullanılmıştır. Çelik lif miktarının artırılmasının mekanik özellikler ve geçirimsizlik üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla normal dayanımlı çelik lifin hacimce %8 oranında kullanıldığı bir karışım da hazırlanmıştır. Ayrıca lif içermeyen yalın (referans) bir karışım da karşılaştırma amacıyla hazırlanmıştır. SIFCON performansını iyileştirmek için çok yüksek su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı çimentoya ağırlıkça %3 oranında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcının katı madde oranı %30'dur. Su/çimento oranlarının hesaplanmasında katkı maddesinden gelen %70 ilave su miktarı dikkate alınmıştır. Böylece, karışımlardaki nihai su/çimento oranı 0.27'dir. Silis, kuvars veya bazalt esaslı agregalar rijitlikleri ve yüksek dayanımları nedeniyle yüksek performanslı betonlarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan agrega, maksimum tane boyutu 1 mm olan silis kökenli bir agregadır. Tüm karışımlarda, 750 mm yayılma çapında akıcı kıvamlı bir bulamaç kullanılmıştır. SIFCON karışımı; çimento: silis dumanı: ince silis agregası (0-1 mm): su: süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi 1: 0.25: 0.27: 0.82: 0.03 şeklindedir. Karışımlardaki çimento miktarı 1000 kg m<sup>-3</sup> değerindedir.

Karışımların kodlanmasında, yalın beton karışımı (REF), hacimce %4 normal dayanımlı çelik lif içeren karışım (3D-4), hacimce %4 yüksek dayanımlı çelik lif içeren karışım (5D-4), hacimce %4 poliolefin lif içeren karışım (PE-4) ve hacimce %8 normal dayanımlı çelik lif içeren karışım (3D-8) olarak isimlendirilmiştir. Karışımların sonunda yer alan (S) buhar kuru uygulamasını (O) ise etüv kuru uygulamasını göstermektedir.

Tüm numuneler çelik kalıplar kullanılarak dökülmüştür. Numuneler 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 günlük test yaşına kadar su dolu kür tankında bekletilmiştir.

### Numunelerin hazırlanması

Karışımların hazırlanmasında öncelikle kuru malzemeler homojen hale gelinceye kadar kuru olarak karıştırılmıştır. İkinci aşamada, kuru malzemelere karışım suyunun bir kısmı ilave edilmiş ve 1 dakika süre ile karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ve kalan su bir kaptaki karıştırılarak birlikte ilave edilmiştir. Böylece, kuru malzemelerin katkının suyunu emmesi ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkinliğini azaltması önlenmiştir. Son aşamada önceden lifler yerleştirilerek hazırlanan çelik kalıplara SIFCON bulamacı dökülmüştür. Çalışmada her bir SIFCON karışımından 100x100x500 mm boyutlarında 6 adet kiriş numunesi eğilme testleri için hazırlanmıştır (Şekil 2).



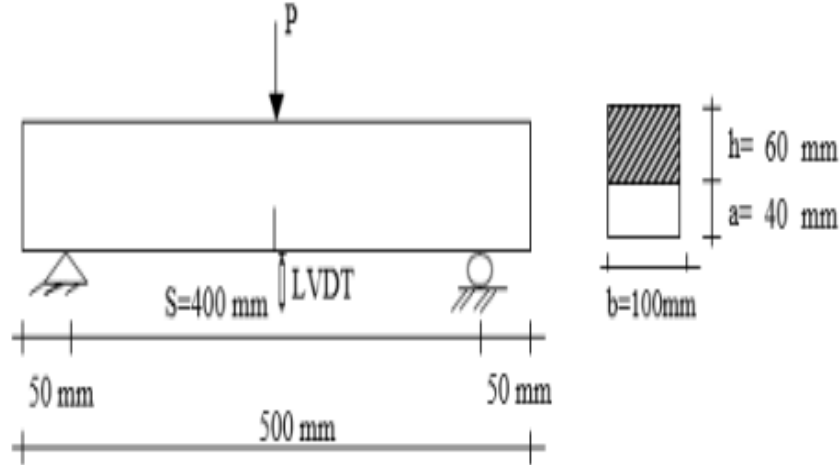
Şekil 2. SIFCON karışımı ve kiriş numunelerin hazırlanması

Eğilme testlerinden kalan numuneler üzerinde basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca, bazı kiriş numuneleri üzerinde kılcal su emme testleri yapılmıştır. Kiriş numuneleri üzerinde üç nokta eğilme testleri deplasman kontrollü bir test cihaz yardımı ile gerçekleştirilerek numunelerin yük-sehim eğrileri elde edilmiştir.

### Deney Tekniği

100x100x500 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Yükleme 200 kN kapasiteli kapalı çevrimli deplasman kontrollü bir cihaz ile gerçekleştirilmiş ve iki Lineer Değişken Yer Değiştirme Transdüseri (LVDT) ile eş zamanlı olarak sapmalar ölçülmüştür. Yükleme düzeneğinin test kurulumu Şekil 3'te verilmiştir. Yalın SIFCON karışımında kirişin orta noktasındaki yer değiştirme hızı 0.01 mm /dk olarak sabit tutulmuştur. Lif içeren kirişlerde test, 0.5 mm saptmaya kadar 0,0175 mm /dk bir yer değiştirme hızı ile ve sonrasında 10 mm'ye saptmaya kadar 0.1 mm /dk ile gerçekleştirilmiştir.

Her kiriş için yük-deplasman eğrileri, kiriş orta noktasından alınan iki ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Betonların kırılma enerjisi ( $G_F$ ), RILEM TC 50-FMC tarafından önerilen "Eşitlik 1." ile yük-sehim eğrisi altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada lif içeren SIFCON karışımlarının kırılma enerjisini hesaplamak için 10 mm sehim seçilmiş ve bu sehime kadar olan enerjiler belirlenmiştir.



Şekil 3. Eğilme deney düzeneği test kurulumu

$$\frac{W_0 + mg \frac{S}{L} \delta s}{B(D - a)} \quad (1)$$

Burada, B, D (a + h), L, m, a, S ve  $W_0$  sırasıyla, kiriş numunenin genişliği, derinliği, uzunluğu, ağırlığı, çentik derinliği, mesnetler arası açıklık ve yük-sehim eğrisinin altındaki kalan, g yerçekimi ivmesi,  $\delta s$  ise açıklığın ortasında ölçülen sehimdir.

### BULGULAR VE TARTIŞMA

100x100x500 mm boyutlarındaki kiriş numuneleri üzerinde deplasman kontrollü bir yükleme cihazı kullanılarak 3 noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Böylece numunelerin eğilme mukavemetleri ve kırılma enerjileri belirlenmiştir. Ayrıca eğilme testi sonrası kiriş numunelerinden elde edilen 100x100x100 küp numuneler üzerinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Bazı kiriş numunelerinde ise kılcal su emme testleri yapılarak karışımların geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Tüm mekanik davranış test sonuçları ve kılcal su emme yüksekliği değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Yalın ve lif takviyeli SIFCON karışımlarının mekanik davranış ve geçirimsizlik özellikleri

	Basınç dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Kırılma enerjisi (N /m)	Kılcal su emme (mm)
REF-S	101.1	9.55	10.48	61	0.047
REF-O	112.8	10.19	11.97	72	0.066
3D-4-S	121.3	19.11	30.53	12840	0.063
3D-4-O	128.5	21.02	41.11	17597	0.097
5D-4-S	124.5	21.66	47.94	18551	0.075
5D-4-O	133.6	24.84	50.75	19694	0.092
3D-8-S	113.4	18.47	35.51	17350	0.101
3D-8-O	118.8	21.02	40.92	18598	0.118
PE-4-S	67.8	12.74	13.20	5690	0.102
PE-4-O	74.9	13.01	13.34	5862	0.132

\*Varyasyon katsayısı (C.O.V.) %1.3 ile %5.8 arasında değişmektedir.

### Basınç dayanımı

EN 12390-3 standardına göre bir kenarı 100 mm olan küp numuneler üzerinde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Çelik lif içeren SIFCON karışımlarının basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, hem buhar kürü uygulanan hem de etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanım değerleri, yalın beton karışımına göre (referans) daha yüksektir. Ancak bu durumun aksine poliolefin lifleri içeren karışımların basınç dayanımları referans karışım ve diğer tüm karışımlara göre oldukça düşüktür. Bu sonuç, poliolefin liflerinin, oldukça akışkan kıvamdaki bulamacının lifler arasındaki ağ içine yeterince ve homojen bir şekilde akmasını engellemesiyle açıklanmaktadır. Poliolefin liflerin kullanıldığı karışımlarda, referans karışıma göre buhar kürü uygulanan numunelerde %39, etüv kürü uygulanan numunelerde ise %34 basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, hacimce %8 normal dayanımlı çelik lif içeren numunelerin basınç dayanımı da hacimce %4 oranında normal dayanımlı çelik lif içeren numunelere göre daha düşüktür. Bu sonuçlar, poliolefin liflerin ve belirli oranların üzerinde çelik liflerin kullanılmasının SIFCON'da yerleşme ve homojenlik sorunlarına sebep olabileceğini göstermektedir.

Isıl kür rejimleri uygulamaları değerlendirildiğinde ise, SIFCON numunelerine etüv kürü rejimi uygulanmasının buhar kürüne göre basınç dayanımını arttırdığı anlaşılmaktadır. Çelik lif içeren numunelere etüv kürü uygulanarak, buhar kürü uygulanan numunelere göre %5 ile %12 arasında basınç dayanımı artışı sağlanmıştır.

### Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı testleri EN 12390-6 standardına göre yapılmıştır. Tüm ısıl kür rejimlerinde, referans karışıma kıyasla en düşük artışlar poliolefin lifleri içeren numunelerde gözlemlenmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri, kancalı geometrisi ile betona daha iyi aderans sağlayan yüksek dayanımlı 5D tipi çelik lif içeren SIFCON numunelerinde elde edilmiştir. Hacimce %4 oranında 5D tipi yüksek dayanımlı çelik lif içeren numuneler, hacimce %8 oranında 3D tipi normal dayanımlı çelik lif içeren numunelerden daha yüksek yarma çekme mukavemetine sahiptir.

Isıl kür rejimi uygulamaları değerlendirildiğinde ise, etüv kürü uygulanmasının, buhar kürü rejimine göre yarmada çekme dayanımını arttırdığı anlaşılmaktadır. Yalın ve lifli numunelere etüv

kürü uygulanarak, buhar kürü uygulanan numunelere kıyasla yarmada çekme mukavemetinde %2 ile %15 arasında bir artış sağlanmıştır. Sadece poliolefin lifleri içeren numunelerde, etüv küründen sonra numunelerin yarma çekme mukavemetinde daha az bir artış (%2) gözlenmiştir. Çelik lif içeren SIFCON numunelerinde, buhar kürü uygulanan numunelere göre etüv kürü uygulaması ile daha belirgin (%15'e varan) mukavemet artışları elde edilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada benzer olarak ıslık kür işlemleri ile SIFCON'un yarma çekme dayanımları artmaktadır (Ali ve ark., 2022). Poliolefin lif içeren karışımlarda etüv kürü sonrası daha az oranda oluşan dayanım artışı, poliolefin liflerinin düşük erime sıcaklığına sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Etüv kürü işlemi 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş olup, çalışmada kullanılan poliolefin lifin erime sıcaklığı da bu değerdedir. Bazı liflerin etüv kürü işleminden zarar görmüş olabileceği değerlendirilmiştir.

### Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı testleri EN 12390-5 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Tüm ıslık kür rejimlerinde lif içeren SIFCON karışımları arasında en düşük eğilme mukavemeti değerleri poliolefin lifi içeren numunelerde elde edilmiştir. Poliolefin lifler, çelik liflere kıyasla daha düşük çekme mukavemetine sahiptir. Bu lifler ayrıca sıvı bulamacının lif ağına homojen dağılımını da engellemektedir. Bu nedenle poliolefin lif içeren numunelerin eğilme mukavemeti çelik lif içeren numunelere göre daha düşüktür. Bununla birlikte, lif içeren tüm numunelerin eğilme dayanımları, yalın numunelere göre önemli ölçüde yüksektir. En yüksek eğilme mukavemeti değerleri, kancalı geometrisi ile betona daha iyi aderans sağlayan ve daha yüksek çekme dayanımına sahip 5D tipi çelik lif içeren SIFCON numunelerinde elde edilmiştir. Hacimce %4 oranında 5D tipi yüksek dayanımlı çelik lif içeren numuneler, hacimce %8 oranında 3D tipi normal dayanımlı çelik lif içeren numunelerden daha yüksek eğilme mukavemetine sahiptir. Yapılan birçok çalışmada benzer olarak hem ıslık kür işlemlerinin hem de 5D tipi liflerin kullanılması ile SIFCON'un eğilme dayanımlarının arttığı belirtilmektedir (Venkateshwaran ve ark., 2018; Gao ve ark., 2021; Güler ve Akbulut, 2022).

Islık kür rejimi uygulamaları değerlendirildiğinde ise etüv kürü uygulanmasının buhar kür rejimine kıyasla eğilme dayanımlarını arttırdığı anlaşılmaktadır. Etüv kürü uygulanarak, buhar kürü uygulanan numunelere göre %1 ile %15 arasında eğilme mukavemetinde artış sağlanmıştır. Ancak bu artış poliolefin lifleri içeren numunelerde daha az (%1) olarak gerçekleşmiştir. Çelik lif içeren SIFCON numunelerinde, buhar kürü uygulanan numunelere göre etüv kürü uygulanmasıyla eğilme mukavemetinde daha belirgin (%15'e varan) artışlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yarmada çekme dayanımı test sonuçlarına benzerlik göstermektedir.

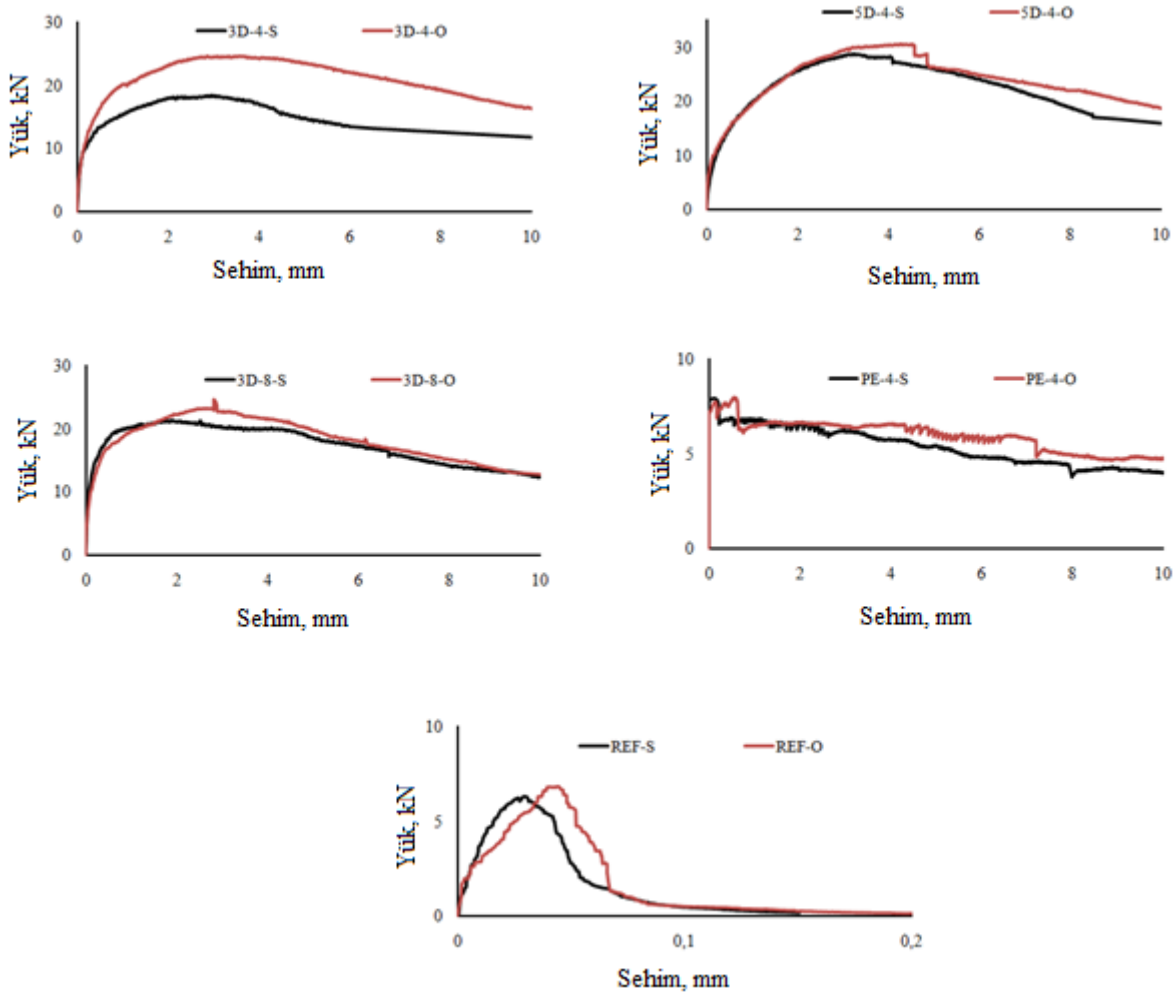
### Kırılma Enerjisi

Çalışmada üretilen lif içeren ve yalın SIFCON numunelerinin yük-deplasman eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. 5D tipi yüksek dayanımlı lif içeren SIFCON beton numunelerinin kırılma enerjisinde buhar kürü ve etüv küründe yalın betona kıyasla sırasıyla 304 ve 273 kat artış olmuştur. Tüm ıslık kür rejimlerinde lif içeren SIFCON karışımları arasında en düşük kırılma enerjisi değerleri poliolefin lifi içeren numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yarmada çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti sonuçlarına benzerdir. Poliolefin lif içeren numunelerin kırılma enerjisi, çelik lif içeren numunelere göre daha düşüktür. Bununla birlikte, lif içeren tüm numunelerin kırılma enerjisi, yalın numunelerden önemli ölçüde daha yüksektir. Hacimce %4 oranında poliolefin lif kullanılarak buhar kürü ve etüv kürü uygulamalarında yalın SIFCON numunelerine göre sırasıyla 93 ve 81 kat daha yüksek kırılma enerjisi değerleri elde edilmiştir. Çalışmada en yüksek kırılma enerjisi değerleri, kancalı geometrisi ile betona daha iyi aderans sağlayan yüksek dayanımlı 5D tipi çelik lif içeren SIFCON numunelerinde



elde edilmiştir. Hacimce %4 oranında 5D tipi yüksek dayanımlı çelik lif kullanılan numuneler, hacimce %8 oranında 3D tipi normal dayanımlı çelik lif kullanılan numunelerden daha yüksek kırılma enerjisine sahiptir. Böylece lif dayanımı ve geometrisinin kırılma davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Diğer bazı çalışmalarda da benzer olarak 5D liflerin kullanılması ile 3D ve 4D liflere kıyasla daha yüksek kırılma enerjisi değerleri elde edildiği belirlenmiştir (Güler ve Akbulut, 2022; Chen ve ark., 2022).

Isıl kür rejimi uygulamaları değerlendirildiğinde ise, etüv kürü uygulanmasının buhar kürüne göre betonların kırılma enerjilerini arttırdığı tespit edilmiştir. Yalın ve lifli numunelere etüv kürü uygulanarak, buhar kürü uygulanan numunelere göre %3 ile %37 arasında kırılma enerjisinde artış sağlanmıştır. Sadece poliolefin lifleri içeren numunelerde etüv küründen sonra numunelerin kırılma enerjisinde daha az bir artış (%3) gözlenmiştir. Bu sonuçlar, yarma çekme ve eğilme mukavemeti test sonuçlarına benzer olup, 150 °C'de ısı kür işlemlerinin poliolefin liflere zarar verme olasılığı ile açıklanmaktadır. Çelik lif içeren SIFCON numunelerinde, buhar kürü uygulanan numunelere göre etüv kürü uygulanması ile kırılma enerjisinde çok daha belirgin (%37'ye varan) artışlar elde edilmiştir. Çelik lif içeren bazı SIFCON numunelerinin eğilme testi sonrası görüntüleri Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 4. Kırılma enerjisi test sonuçları



Şekil 5. Çelik lif içeren bazı SIFCON numunelerinin eğilme testi sonrası görüntüleri

### Kılcal Su Emme

Kılcal su emme testleri ASTM C 1585 standardına göre yapılmış ve 6 saat sonra kapiler yolla emilen suyun yüksekliği belirlenmiştir. Hem buhar kürü uygulanan hem de etüv kürü uygulanan tüm lif takviyeli SIFCON numunelerinin kılcal su emme değerleri, lif içermeyen yalın numunelerden daha yüksektir. Bulamacın lifler arasındaki ağa yeterli ve homojen bir şekilde akamaması, SIFCON içinde bir takım boşluklara neden olur. Bu nedenle lifli SIFCON numunelerinin kılcal su emme değerleri yalın numunelere göre artmaktadır. Lif içeren numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde, poliolefin içeren numunelerin kılcal su absorpsiyonu diğerlerine göre daha yüksektir. Bu sonuç, basınç dayanımı test sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Basınç dayanımı testlerinde, bulamacın poliolefin lifleri arasında yeterli düzeyde akamaması nedeniyle dayanımlar düşmektedir. Ayrıca hacimce %8 oranında 3D tipi çelik lif içeren numunelerin kılcal su emme değerleri de hacimce %4 oranında çelik lif içeren numunelere göre daha yüksek tespit edilmiştir. Sonuç olarak, poliolefin liflerin veya yüksek oranlarda çelik lif içeriğinin kullanılmasının kılcal su emme değerlerini artırdığı anlaşılmaktadır.

Isıl kür rejimi uygulamaları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, etüv kürü uygulanmasının buhar kürüne kıyasla betonların kılcal su emme değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Yalın ve lifli numunelere etüv kürü uygulandığında, buhar kürü uygulanan numunelere kıyasla kılcal su absorpsiyonunda %17 ile %41 arasında bir artış meydana gelmiştir. Yüksek performanslı betonlar üzerine yapılan bazı çalışmalarda, yüksek sıcaklığın betonda mikro çatlaklara neden olduğu ve bunun da betonda geçirimsizlik artışına neden olduğu belirtilmektedir (Özalp, 2016). Etüv kürü uygulanan numunelerin kapiler su emme değerinin daha yüksek olması, numunelerin yüksek sıcaklıktan zarar görmeleri ile ilişkilendirilmiştir.

### SONUÇ

Araştırmanın sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- Çelik lifler içeren SIFCON numuneleri, hem buhar kürü hem de etüv kürü rejimlerinde lif içermeyen yalın numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Çelik lif kullanımı basınç dayanımını geliştirmektedir. Isıl kür uygulamaları değerlendirildiğinde, poliolefin lif kullanılan karışım hariç, etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerleri buhar kürü uygulanan numunelere göre %5 ile %12 arasında daha yüksektir. Etüv kürü SIFCON'un basınç dayanımını daha da artırmaktadır. Ancak dikkat çekici bir sonuç olarak poliolefin lifi içeren numunelerin basınç dayanımı yalın SIFCON numunelerine kıyasla %34 ile %39 arasında daha düşüktür. Poliolefin lifleri, sıvı bulamacının lif ağları arasında homojen bir şekilde akmasını engellemektedir.

- SIFCON numunelerinin eğilme ve yarmada çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, tüm kür uygulamalarında lif kullanımı ile yalın SIFCON numunelerine göre eğilme mukavemetlerinde ve

yarma çekme mukavemetlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. En önemli gelişme, çekme dayanımı yüksek ve kancalı geometrisi ile betona daha iyi aderans sağlayan 5D tipi çelik lif içeren numunelerde elde edilmiştir. Kür uygulamaları kendi aralarında değerlendirildiğinde, etüv kürü uygulanan numunelerin eğilme dayanımlarında buharla kürü uygulanan numunelere kıyasla %1 ile %15 arasında bir artış yarmada çekme dayanımlarında ise %2 ile %15'lik bir artış elde edilmiştir. Lif içeren numunelerde en düşük artış poliolefin lifi içeren numunelerde gözlenmiştir.

- Lif içeren SIFCON numunelerinin kırılma enerjileri, yalın SIFCON numunelerinden önemli ölçüde daha yüksektir. Hem buhar kürü hem de etüv kürü uygulamalarında kırılma enerjisinde en yüksek değerler 5D tipi yüksek dayanımlı çelik lif içeren numunelerde elde edilmiştir. 5D tipi yüksek mukavemetli çelik lifler, normal mukavemetli 3D tipi liflerin hacimce %50'si oranında kullanıldığında dahi, kırılma enerjisi değerlerinde yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece lif çekme mukavemeti ve kanca geometrisinin kırılma enerjisini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır. Isıl kür uygulamaları değerlendirildiğinde, etüv kürü uygulanan numunelerin kırılma enerjisinde buhar kürü uygulanan numunelere kıyasla %3 ile %37 arasında bir artış elde edilmiştir.

- Isıl kür rejimlerinin kılcal su absorpsiyon değerlerine etkisi incelendiğinde, buhar kürü uygulanan numunelerin kılcal su emmesinin, etüv kürü uygulanan numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Yalın ve lifli numunelere etüv kürü uygulandığında, buhar kürü uygulanan numunelere göre kılcal su emme değerlerinde %17 ile %41 arasında bir artış meydana gelmiştir.

Tüm bu çalışma sonucunda daha yüksek sıcaklıkta uygulanan etüv kürünün buhar kürü uygulamasına kıyasla SIFCON'un mekanik özelliklerini geliştirdiği belirlenmiştir. Ancak, bu durumun tam aksine SIFCON'un geçirimsizlik özelliklerini ise buhar kürü ile karşılaştırıldığında olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar SIFCON ve Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB) ile ilgili yapılmış literatür çalışmaları ile uyumludur. SIFCON'da çeşitli liflerin kullanılması değerlendirildiğinde ise en etkili sonuçlar, çekme mukavemeti daha yüksek ve kanca geometrisi ile betona daha iyi aderans sağlayan 5D tipi çelik liflerle elde edilmektedir. Benzer şekilde literatürde lif takviyeli betonlarda 5D çelik lifler kanca geometrisi ve yüksek dayanımı ile 3D ve 4D çelik liflerden çok daha yüksek mekanik performans göstermektedir.

Bu çalışmada betonun mikro yapısı incelenmemiştir. Yüksek sıcaklığın betonda oluşturduğu ve özellikle geçirimsizliğe yönelik elde edilen sonuçlar literatür ile açıklanmaya çalışılmıştır. İleri bir çalışma olarak yüksek sıcaklık etkilerinin SIFCON mikro yapısında oluşturduğu etkilerin iç-yapı incelemeleri ile desteklenmesi faydalı olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Çalışmada yer alan SIFCON numuneleri yazar tarafından İSTON'da görev yaptığı dönemde üretilmiştir. Yazar, katkılarından dolayı İSTON Ar-Ge birimi çalışanlarına teşekkür eder.

## Çıkar Çatışması

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Yazar Katkısı

Yazar makalenin tamamına katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Abdollahi B, Bakhshi M, Mirzaee Z, Shekarchi M, Motavalli M, 2012. SIFCON Strengthening of concrete cylinders in comparison with conventional GFRP confinement method. *Construction and Building Materials*, 36, 765-778.
- Akçaözoglu K, Kılılı A, 2021. The effect of curing conditions on the mechanical properties of SIFCON. *Revista de la construcción*, 20(1), 37-51.

- Ali AS, Riyadh, Z, 2018. Experimental and numerical study on the effects of size and type of steel fibers on the (SIFCON) concrete specimens. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(2), 1344-1353.
- Ali MH, Atiş CD, Al-Kamaki, YSS, 2022. Mechanical properties and efficiency of SIFCON samples at elevated temperature cured with standard and accelerated method. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01281.
- Al-mashhadani MMM, 2021. Strength behavior of geopolymer based SIFCON with different fibers. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Special Issue 2021 (ICAENS), 1342-1347.
- Anonim, 2021. Environmental Product Declaration Type III ITB No. 215/202, <https://www.bekaert.com> (Erişim Tarihi: 22.20.2022)
- ASTM C1585, 2020. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.
- Aygormez Y, Al-mashhadani MM, Canpolat O, 2020. High-temperature effects on white cement-based slurry infiltrated fiber concrete with metakaolin and fly ash additive. *Revista de la construcción*, 19(2), 324-333.
- Azoom KT, Pannem RM.R, 2017. Punching strength and impact resistance study of sifcon with different fibres. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4), 1123-1131.
- Balaji S, Thirugnanam GS, 2018. Behaviour of reinforced concrete beams with SIFCON at various locations in the beam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 161-166.
- Balamuralikrishnan R, 2015. Cyclic behavior of reinforced concrete beams retrofitted with externally bonded SIFCON laminates. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16, 1063-1075.
- Beglarigale A, Yalçınkaya Ç, Yiğiter H, Yazıcı H, 2016. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, 104, 99-108.
- Canbaz M, Çelikten S, 2020. Kırılmış atık taşıt lastiklerinin SIFCON üretiminde farklı bağlayıcılarla değerlendirilmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 9-15.
- Chen G, Zhao L, Gao D, Yuan J, Bai J, Wang W, 2022. Flexural tensile behavior of single and novel multiple hooked-end steel fiber-reinforced notched concrete beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022077.
- Chun PJ, Lee SH, Cho SH, Lim YM, 2013. Experimental study on blast resistance of SIFCON. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11(4), 144-150.
- Dagar K, 2012. Slurry infiltrated fibrous concrete (SIFCON). *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 2(2), 99-100.
- EN 12390-3, 2019. Testing hardened concrete compressive strength of test specimens
- EN 12390-6, 2009. Testing hardened concrete tensile splitting strength of test specimens
- Farnam Y, Moosavi, M, Shekarchi, M, Babanajad, SK, Bagherzadeh A, 2010. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression. *Cement and Concrete Research*, 40(11), 1571-1581.
- Gao D, Ding C, Pang Y, Chen G, 2021. An inverse analysis method for multi-linear tensile stress-crack opening relationship of 3D/4D/5D steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 309, 125074.
- Guler S, Akbulut ZF, 2022. Residual strength and toughness properties of 3D, 4D and 5D steel fiber-reinforced concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 327, 126945.
- Gulkan P, Korucu H, 2011. High-velocity impact of large caliber tungsten projectiles on ordinary Portland and calcium aluminate cement based HPSFRC and SIFCON slabs. Part II: numerical simulation and validation. *Structural Engineering and Mechanics*, 40(5), 617-636
- İpek M, Canbay M, Yılmaz, K, 2015. Çelik ve polipropilen liflerin yalın ve kombinasyonlu olarak kullanılmasının SIFCON'un mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 19(1), 41-52.
- İpek M, Aksu M, 2019. The effect of different types of fiber on flexure strength and fracture toughness in SIFCON. *Construction and Building Materials*, 214, 207-218.

- Lankard DR, 1984. Slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON): Properties and applications. *MRS Online Proceedings Library*, 42(1), 277-286.
- Lee SJ, Yoo DY, Moon DY, 2019. Effects of hooked-end steel fiber geometry and volume fraction on the flexural behavior of concrete pedestrian decks. *Applied Sciences*, 9(6), 1241.
- Mohan A, Karthika S, Ajith J, Tholkapiyan M, 2020. Investigation on ultra high strength slurry infiltrated multiscale fibre reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, 22, 904-911.
- Özalp F, 2016. Kür Koşulları ve Yalıtımın Yüksek Dayanımlı Betonların Geçirimsizlik, İç-Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış).
- Rasheed MA, Prakash SS, 2018. Behavior of hybrid-synthetic fiber reinforced cellular lightweight concrete under uniaxial tension—Experimental and analytical studies. *Construction and Building Materials*, 162, 857-870.
- Rao HS, Ghorpade VG, Ramana NV, Gnaneswar K, 2010. Response of SIFCON two-way slabs under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37(4), 452-458
- Rattan A, Singh J, 2018. Development of Ultra High Strength SIFCON. In *International Conference on Sustainable Waste Management through Design* (pp. 178-186). Springer, Cham.
- RILEM 50-FMC, 1985. Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, Vol. 18, pp. 285-290.
- Salih SA, Frayyeh QJ, Ali MAAW, 2018. Flexural behavior of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) containing supplementary cementitious materials. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 22(2), 35-48.
- Schneider B, 1992. Development of SIFCON through applications. In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* (pp. 177-194).
- Sengul O, 2018. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 186, 1082-1091.
- Soylu N, Bingöl AF, 2019. Research on effect of the quantity and aspect ratio of steel fibers on compressive and flexural strength of SIFCON. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 5(1), 29.
- Sun G, Tong S, Chen D, Gong Z, Li Q, 2018. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 636-651.
- Tuyan M, Yazıcı H, 2012. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix. *Construction and Building Materials*, 35, 571-577.
- Venkateshwaran A, Tan KH, Li Y 2018. Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. *Structural Concrete*, 19(2), 352-365.
- Yalçınkaya Ç, Beglarigale A, 2014. The effect of metakaolin and end type of steel fiber on fiber-SIFCON matrix bond characteristics. *Usak University Journal of Material Sciences*, 3(1), 97-105.
- YAZICI H, Yiğiter H, Aydın S, Baradan B, 2006. Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase. *Cement and concrete research*, 36(3), 481-486.
- YAZICI H, Aydın S, Yiğiter H, Yardımcı MY, Alptuna G, 2010. Improvement on SIFCON performance by fiber orientation and high-volume mineral admixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11), 1093-1101