# YÜKSEK SICAKLIĞIN SIFCON'UN DİRENCİNE ETKİSİ

#### EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE RESISTANCE OF SIFCON

Çağlar Yalçınkaya, Ahsanollah Beglarigale

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

Halit Yazıcı, Hüseyin Yiğiter Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

## Özet

Bu çalışmada yüksek sıcaklığın cüruf katkılı olarak üretilmiş SIFCON (slurry infiltrated fiber concrete) kompozitlerin eğilme performansına etkisi incelenmiştir. Bağlayıcı fazında %50 oranında yüksek firin cürufu kullanılmış olup, kompozitler hacimce %20 oranında yönlendirilmiş çelik lif içermektedir. Kür işlemi (buhar kürü veya standart kür) tamamlandıktan sonra örnekler doygun veya kuru halde yüksek sıcaklık etkisine (300, 600°C) maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmamış olan kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre 300°C sonrasında lifli numunelerde eğilme dayanımı ve tokluk artışı olduğu görülmüştür. 600°C uygulanmış numunelerde ve çelik liflerde ise önemli oranda dayanım kaybı oluşmuştur. Numunenin nem durumu, yüksek sıcaklık dayanıklılığını önemli derecede etkilememiştir.

#### Abstract

In this study, effects of high temperature on the flexural performance of SIFCON composites containing GGBFS were investigated. These composites include GGBFS at the replacement ratio of 50% and oriented steel fiber at the volume fraction of 20%. Specimens were exposed to high temperature (300, 600°C) after steam or standard water curing. The results were compared with the results of non-exposed specimens. It was shown that 300°C exposure caused the flexural strength and toughness to increase while exposure to 600°C temperature decreased the strengths. Tensile strength of steel fibers was also affected by 600°C temperature dramatically. Moisture contents of specimens did not affect the high temperature resistance significantly.

# 1. GİRİŞ

Çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton (Slurry Infiltrated Fiber Concrete – SIFCON), yüksek oranda çelik lif içeren yüksek performanslı kompozit malzemelerdir. Bu kompozitler çok yüksek oranda çelik lif içeriğiyle üretilebilmektedir (%5 ila %30). Yüksek lif dozajının sağladığı yüksek tokluk özelliği ve düktilitesi sayesinde güçlendirme işlerinde, endüstriyel zeminlerde, patlamaya ve rokete dirençli askeri yapılarda kullanılabilmektedir [1].

SIFCON üretiminde çelik lifler kalıba yerleştirilmekte, çimento esaslı akıcı hamur kalıba dökülmekte veya pompalanmaktadır. Bu sebeple kullanılacak hamurun reolojik özellikleri tam doluluk sağlamak açısından önem kazanmaktadır. Ayrıca hamurun çimento dozajını azaltabilmek için puzolanik katkılar ve mikro agregalar kullanılabilmektedir. Böylelikle çimento dozajı, akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı, büzülme mertebeleri azaltılabilmektedir. SIFCON'un lif dozajı, türü ve hamurun karışım oranları kompozitin mekanik özelliklerini amaca uygun şekilde tasarlamada ana faktörlerdir.

Gerek güçlendirme amacıyla gerekse askeri amaçlarla kullanılabilen SIFCON kompozitler yangın ve patlama gibi sebeplerle yüksek sıcaklığa maruz kalabilir. Çalışma kapsamında buhar ve standart su kürü görmüş SIFCON kompozitlerinin ve harcının kuru yüzey doygun ve kuru halde yüksek sıcaklık dayanıklılıkları araştırılmıştır. Araştırmada, 300 ve 600°C sıcaklık uygulanmış numunelerdeki eğilme performansı değişimi değerlendirilmiştir.

# 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. Kullanılan Malzemeler ve Karışım Oranları

Deneysel çalışmada kullanılan CEMI 42,5/R tipi çimentonun (C) fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ile yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanının (SD) üreticileri tarafından verilen kimyasal analizleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimento, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	SD	YFC	Fiziksel Özellikler	
CaO	64,25	0,51	33,30	Çimento	
SiO <sub>2</sub>	18,52	92,25	39,60	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3860
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	0,88	11,50	Özgül ağırlık	3,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,24	1,98	1,50	SD	
MgO	0,93	0,96	7,60	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)*	210800
Na <sub>2</sub> O	0,35	0,45	-	Özgül ağırlık	2,2
K <sub>2</sub> O	0,80	0,12	-	YFC	
SO <sub>3</sub>	3,03	0,33	-	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	4100
Kızdırma Kay.	3,17	3,0	-	Özgül ağırlık	2,9
Serbest CaO	1,9	-	-		

\*Azot adsorpsiyonu değeridir.

Agrega olarak 0-0,125 mm arası ve 0-1 mm arası iki farklı tane büyüklüğüne sahip kireçtaşı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilat esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır. Lifli kompozitlerde, 30 mm uzunluğa ve 0,55 mm çapa sahip uçları kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Liflerin narinliği (boy/çap oranı) 55 olup çekme dayanımları 1100 MPa'dır. Lifli kompozitlerde lif miktarı hacimce %20'dir. Bağlayıcı harcın karışım oranları Çizelge 2'de verilmiştir.

Bileşen	Miktar	
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	400	
Yüksek Fırın Cürufu (kg/m <sup>3</sup> )	400	
Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	80	
$Su (kg/m^3)$	265	
0-1 mm Kireçtaşı (kg/m <sup>3</sup> )	610	
0-125 μm Kireçtaşı (kg/m <sup>3</sup> )	380	
Süper akışkanlaştırıcı (l/m <sup>3</sup> )	44	
Su/Çimento	0.66	
Su/Bağlayıcı	0.30	
Çökme-yayılma (mm)	380	
V-kutusu süresi (s)	12	

Çizelge 2. Bağlayıcı harcın karışım oranları

#### 2.2. Deneysel Yöntem

Harç karışımları yüksek hızlı (470 devir/dakika) karıştırma yapabilen bir karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle 2 dk süreyle kuru karışım yapılmış, su ve süperakışkanlaştırıcı ilavesinden sonra 10 dk süreyle karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bağlayıcı harcın mini-çökme yayılma deneyinden elde edilen kendiliğinden yayılma çapı 380 mm'dir. V-kutusu akış süresi ise 12 s olarak ölçülmüştür.

Eğilme deneyi için 25x60x305 mm plak örnekler kullanılmıştır. Lifsiz örnekler doğrudan kalıplara alınmış ve kür süreci başlatılmıştır. Lifli örneklerde ise lifler kalıplara önceden yerleştirilmiş, ardından kendiliğinden yerleşebilir kıvamdaki harç liflerin arasında boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuştur. Lifler, kalıbın uzun kenarı doğrultusunda yönlendirme yapılarak el ile yerleştirilmiştir. Bu sayede eğilme performansında önemli oranda artış sağlanabilmektedir [2]. Uygulanan yönlendirme işleminin prefabrik elemanların üretimi için uygun olduğu, endüstriyel zeminler gibi yerinde uygulamalarda mümkün olmayacağı söylenebilir.

Her bir kalıbın hacminin %20'sini kaplamak için gereken lif miktarı 718 gramdır. Tek bir kalıp için gereken lif miktarı (718 g) tartılmıştır. Tartılan lifler tutamlar halinde, kalıbı ağzına kadar dolduracak şekilde el ile serilmiştir. Liflerin kancalı olması sebebiyle %20'lik lif hacmi kalıbın tüm kesitini doldurulabilmiştir. Lifler arasında kalan boşluklara (hacimce %80) gereken harç miktarı tartılmış, tüm harcın eksiksiz olarak numuneye yedirilmesi sağlanmıştır.

Standart kürlü numuneler nem odasında 20±2°C sıcaklıkta 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak standart kür havuzuna yerleştirilmiştir. Buhar kürü numuneleri ise üretimlerinden sonra 6 saat ön bekleme süresince nem odasında bekletilmiştir. Isınma süreci olan 6 saat sonunda buhar sıcaklığı 100°C'ye ulaşmış ve 12 saat bu sıcaklıkta kür

uygulanmıştır. Süre sonunda kabin kapakları açılmış ve örnekler soğumaya bırakılmıştır.

Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmadan önceki nem içeriklerinin yüksek sıcaklık dayanıklılığına etkisinin belirlenmesi amacıyla, bir kısmı doygun halde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, diğer bir kısmı ise 50°C'de 48 saat kurutulduktan sonra yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık dayanıklılığının tespiti için numunelerin bir bölümü 300°C'de ve diğer bir bölümü 600°C'de 3 saat süreyle bekletilmiştir. Fırının ısınma hızı ortalama 2,5°C/dakika'dır. Deney sonrası kapak açıldıktan sonra numuneler tedrici olarak soğumaya bırakılmıştır.

Eğilme deneyleri kapalı devre bir pres kullanılarak yapılmıştır. Geri besleme, örnek üzerinden alınan deplasman değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lifli kompozitlerde yükleme hızı 0,5 mm/dakikadır. Lifsiz örneklerde ise hamurların gevrek karakteri nedeniyle yükleme hızı 0,05 mm/dakika'ya kadar indirilmiştir. Orta noktadan tekil yüklemeli olarak gerçekleştirilen eğilme deneylerinde mesnet açıklığı 270 mm'dir. Çentiksiz ince prizmatik numuneler (25×60×305 mm) ile yapılan yüklemede yük-sehim eğrisinin altında kalan alan tokluk olarak hesaplanmıştır. SIFCON üretimi, yüksek sıcaklık işlemi ve numunelerin eğilme deneyi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. SIFCON numunelerinin hazırlanışı, yüksek sıcaklık fırını ve eğilme testi

# **3. BULGULAR ve TARTIŞMA**

Şekil 2'de SIFCON kompozitinin bağlayıcı harcının (lifsiz numuneler) üç noktalı eğilme yükü – sehim grafikleri verilmektedir. Şekil 2(a)'da standart su kürü numunelerinin (STD) ve Şekil 2(b)'de buhar kürü (BH) görmüş numunelerin yük – sehim eğrileri görülmektedir. Eğilme deneyine tabi tutulan numuneler ince plak formunda ve iri agrega içermemektedir. Bu sebeple lifsiz numunelerde eğilme yükleri altında oluşan çatlak köprülenememekte, kısa olan çatlak yolu bir anda kat edilmekte ve yük – sehim bölgesinin inen kol kısmı elde edilememektedir. Kapalı devre cihazda daha büyük, plak formunda olmayan prizmalar kullanıldığında inen kol bölgesinin elde edildiği görülmüştür. Ancak bu çalışma kapsamında plak formunda numunelerin performansı araştırılmıştır. Lif içermeyen harçlar yüksek sıcaklık uygulamasına dayanamamış, parçalanmıştır. Numuneler, 240 – 280°C aralığında patlamıştır. Patlayarak dağılmış bir harç plağın toparlanmış hali Şekil 3'te görülebilir. Bu sebeple Şekil 2'de yalnızca yüksek sıcaklığa maruz kalmamış kontrol numunelerinin eğrileri vardır.



Şekil 2. Su kürü (a) ve buhar kürü (b) uygulanan harçların yük – sehim grafikleri



Şekil 3. Yüksek sıcaklık etkisinde parçalanmış harç plağı

Şekil 2'de buhar kürü görmüş harçların maksimum eğilme yüklerinin, su kürü görmüş harçların yaklaşık olarak KYD kırımda 1,8 katı, etüv işlemi sonrası kırımda 1,3 katı olduğu görülmektedir. Numuneler maksimum yükte gevrek olarak kırılmakta, uvgulanan vükleme hızında kuvruk bölgesi ani düsüs göstermektedir. Etüv islemi ile tepe noktası sehimleri ve maksimum yükler önemli oranda düşmektedir (%50 ila %70). Etüv işlemi sonrası eğrinin yatay eksene doğru yattığı, yani rijitlikte kayıp olduğu görülmektedir. Bu davranış su kürü sonrası daha belirgindir. Kırık yüzeyler incelendiğinde etüv görmüş numunelerde çatlağın pürüzlü, KYD numunelerin düz bir kırılma yolu izlediği görülmüştür. 50°C'de 48 sa kurutma işlemi şiddetli bir işlem olmasa da 880 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajlı, 0.30 su/bağlayıcı oranlı, iri agrega içermeyen (D<sub>maks</sub>=1 mm) bu karısımlarda mikro catlaklara sebep olduğu sövlenebilir. Kuruma büzülmesi sonucu C-S-H tabakaları arasında yüzey enerjisinin artışına bağlı olarak C-S-H partikülleri arası bağlar kuvvetlenebilir ve dayanım artışı olabilirken, gevrek bir malzemede mikro çatlak oluşumundan dolayı eğilme dayanımı düşüşü gözlenebilir [3]. Bu çalışmada etüv işlemi sonucu oluşan mikro çatlaklarda çatlak köprüleyecek nitelikte agrega iskeletinin olmayışı ve gevrek olan matris sebebiyle ilk etki baskın çıkmıştır.

Yüksek sıcaklık etkisinde 100°C'de kılcal boşluklardaki su uzaklaşmaktadır. Jeldeki adsorbe su ve hidratlardaki bünye suyu 300°C'ye doğru buharlaşmaya başlamaktadır. Bu aşamada betonda büzülme önemli seviyelerdedir ve yapıdan dışarı çıkmaya çalışan su, boşluklarda buhar basıncı oluşturur. 300°C'den itibaren alüminli ve demiroksitli bileşenler dehidrate olmaya başlar. 400°C dolaylarında Ca(OH)<sub>2</sub>'den CaO'e dönüşüm başlar ve 600°C'ye yaklaştıkça C-S-H yapısı hızla tahrip olur [4]. Yüksek sıcaklık etkisinde numune nem içeriğindeki artış buhar basıncın arttırmaktadır. Silis dumanı

kullanımı sonucu boşluk sistemindeki azalma ve çaplardaki daralma sebebiyle özellikle yüksek dayanımlı betonlar patlayarak parçalanabilmektedir. Aydın vd. [5]'nin çalışmasında yüksek dayanımlı lifsiz harçlarda parçalanma 300°C'nin üstünde oluşmuştur. Çelik lifli numunelerde ise 300°C'de eğilme dayanımı artışı not edilmiştir. Bu çalışmada tüm harç numuneleri 240 – 280°C aralığında parçalanmıştır. Karışımların iri agrega içermemesi, 0,30 olan su/bağlayıcı oranı, SD içeriği ve kendiliğinden yerleşen harç olması sebebiyle daralan boşluk yapısı sonucu patlamanın daha düşük bir sıcaklıkta görüldüğü söylenebilir.

Şekil 4'te %20 lif içeren SIFCON kompozitlerinin kürler ve yüksek sıcaklık sonrası üç noktalı eğilme altında yük – sehim grafikleri verilmektedir. Lifler, kırılma davranışını tamamen değiştirmiş, 10 mm sehimde dahi tepe yükünün yaklaşık %40'ının taşınmasına imkan tanımıştır. Lifsiz numuneler patlayarak parçalanırken, SIFCON numunelerinde lifler bu durumu engellemiştir. Lifsiz numunelerde parçalanma sonrası görülen çatlak dallanmalarına benzer dağılımdaki çatlakların SIFCON numunelerinin yüzeyinde çok daha dar yapıda bulunduğu görülmüştür. SIFCON kompozitlerinin KYD veya kuru olması kontrol harçlarında mekanik özellikleri, yüksek sıcaklığa maruz harçlarda dayanıklılığı önemli oranda etkilememiştir. 300°C'ye kadar tepe yükünün arttığı görülmektedir. 600°C'de ise tepe yükü neredeyse yarı yarıya düşmektedir. Buhar kürü kontrol numuneleri su kürüne kıyasla daha yüksek sıcaklığın artışıyla tepe yüküne kadar olan kısımlar sağa doğru ötelenmiş, yani rijitlik kaybı görülmüştür. Bu etkinin 600°C'de KYD numunelerde ve buhar küründe daha belirgin olduğu görülmektedir.

![](_page_5_Figure_2.jpeg)

Şekil 4. Su kürü (a) ve buhar kürü (b) uygulanan SIFCON'ların yük – sehim grafikleri

300°C sıcaklık sonrasında dayanımların artışının sebebi, C-S-H yapısı henüz bozulmamış matrisin kuruma büzülmesi ile lif çeperini sıkıştırması olabilir. Orange vd. [6], ultra yüksek dayanımlı betonda tekil lif çekme deneyleri gerçekleştirmiş, lif – matris aderansının matris büzülmesi sebebiyle lif çeperinde oluşan basınçla geliştiğini belirtmiştir. Aydın vd. [5]'in çalışmasında çelik lifli harçlarda mekanik özelliklerin 300°C'ye kadar gelişebildiği görülmüştür. Bu çalışmada, 600°C'de bozulmaya başlayan C-S-H yapısı sebebiyle hasar mekanizması baskın çıkmıştır. Ayrıca 600°C'ye maruz kalan SIFCON numunelerinde yapılan gözlemsel incelemede özellikle yüzeydeki liflerin karardığı ve kırılganlığının arttığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, yüksek sıcaklığa karşı SIFCON yapı elemanlarının tüm yüzeylerin pas payı benzeri koruyucu bir harç tabakası ile kaplanması önerilebilir. Böyle bir yöntem korozyonun önlenmesinde de etkili olabilir. Şekil 5'te lifsiz harçların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri verilmektedir. Şekil 5(a)'da bağlayıcı bileşen olan harcın mekanik özelliklerinin buhar kürü sonucu önemli oranda geliştiği dikkati çekmektedir. Buhar kürü ile elde edilen harç dayanımları kuru ve KYD olarak sırasıyla 19,2 ve 9,4 MPa'dır. Bu değerler su kürü için 10,4 ve 3,7 MPa'dır. Buhar kürü eğilme dayanımlarının su kürünün yaklaşık 2 katı olduğu, 50°C etüvde kurutma işleminin dayanımları %50 – 70 oranında düşürdüğü görülmektedir. Yük – sehim eğrilerinin tepe yükleri hakkında yapılan yorumlara paralel olarak tokluk kayıplarının dayanım kaybından daha şiddetli olduğu söylenebilir (Şekil 5b). Buhar kürü ile elde edilen tokluklar su kürünün KYD hal için 3,25, kuru hal için 3,75 katıdır. Buhar kürü genellikle yalın harçlarda mikro çatlak yaratıp su kürüne kıyasla eğilme dayanımını düşürmektedir. Burada tersi bir durum söz konusudur. Silis dumanı ve YFC kullanımından ötürü buhar kürü uygulamasıyla mikro agrega – matris arayüzeyinin su kürüne kıyasla daha sıkı bir yapıda oluştuğu bu durumun eğilme dayanımını artmasını sağladığı görülmektedir.

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

Şekil 5. Harçların eğilme dayanımı (a) ve tokluk (b) değerleri

Sekil 6'da SIFCON numunelerinin eğilme dayanımı ve tokluk değerleri sunulmaktadır. Şekil 5 ile kıyaslandığında yüksek sıcaklığa maruz kalmamış kontrol numunelerinde hacimce %20 oranında çelik lif kullanımı ile eğilme dayanımı lifsiz durumun göre 5 – 25 katına yükselmiştir (Şekil 6a). 300°C sıcaklık uygulamasıyla dayanımlar %25'e kadar artış göstermektedir. En büyük artış buhar kürlü numunelerdedir. 300°C sıcaklık uygulaması sonucu dayanım artışının kuru numunelerde daha az olduğu görülmektedir. Nemli numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde belirli sıcaklığa kadar ilave bir küre maruz oldukları görülmektedir. Ayrıca liflerin büzülen matristen sıyrılması için gerekli yükün arttığı düşünülmektedir. 600°C'de C-S-H yapısındaki bozulmadan, lif – matris aderansının hasar görmesinden ve liflerdeki içyapı değişikliklerinden dolayı eğilme dayanımları standart kürde ortalama %32, buhar küründe ise %36 mertebesinde azalmıştır. Tokluklara bakıldığında 300°C'ye kadar dayanıma paralel olarak artışın olduğu görülmektedir. 600°C'de ise yüksek sıcaklık geçirmemiş numunelere kıyasla buhar küründe KYD hal için %20, kuru hal için %27 düşüş oluşurken su kürü geçirmiş numunelerde önemli bir farkın oluşmadığı görülmektedir (Şekil 6b). Şekil 4 incelendiğinde 600°C'ye maruz kalan numunelerinin tepe yüküne ulaşma ve alçalma kısımları kubbe formundayken, kontrol numunelerinde çatı formundadır. Tepe yükünün düşüşü sonrası tokluklar 600°C'ye maruz kalmış su kürü numunelerinde, maruz kalmamışlara kıyasla artmıştır. Buhar kürü için benzer eğilim olsa da uygulanan 600°C sebebiyle tepe yükünün düsüsüne bağlı tokluk kaybı daha başkındır. Yüksek sıcaklık

gören numunelerde lineerlikten daha düşük yüklerde sapılması mikro çatlakların artışına, tepe yükü sonrası daha yavaş yük düşüşü kanca açılmasına işarettir.

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

Şekil 6. SIFCON'ların eğilme dayanımı (a) ve tokluk (b) değerleri

Yüksek sıcaklığın kanca uçlu çelik lifler üzerindeki etkisinin anlaşılması için eğilme yüklemesi gerçekleştirilmiş numunelerin yüklemeye maruz kalan kesitinin çekirdek ve dış bölgelerinden lif numuneleri alınmıştır (Şekil 7). Yükleme ile 15 mm orta nokta sehimi yaptırılan numunelerin çatlak açıklığında bir ucu, matrisinde diğer ucu gömülü kalan lifler gözlemsel olarak belirlenmiş, numunenin tamamen iki parçaya ayrılması sonrası matris kazınarak alınmıştır. Eğilme yükleri tesirinde lif – matris etkileşiminden dolayı ufalanan harçtan liflerin çıkartılması kolaylaşmıştır.

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

Şekil 7. Eğilme deneyi sonrası liflerin alındığı bölgenin temsili kesiti

600°C sıcaklığa maruz kalmış ve kalmamış su kürü görmüş numunelerden eğilme deneyi sonrası alınan lifler Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'deki lifler, numunenin eğilmeye çalışan en alt kısmından, numune yüzeyinin 2-3 mm altından matris kazınarak alınmıştır. Şekilde görüleceği üzere 600°C sıcaklığa maruz kalan çelik liflerde kanca açılması ve mikrometre ölçümleri ile belirlenen kesit daralması söz konusudur. Çatlak açıklığında kalan çoğu lif ucunda kanca açılması net biçimde görülmüştür. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalan lifin el ile bükülmesi kolaylaşmış ve az sayıda tekrarlı bükme sonrasında kırıldığı gözlemlenmiştir. Liflerin yüzeylerinde kolayca ayrışan bozulmuş harç tabakası ve çelik katman olduğu görülmüştür. Lifler, yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerde matristen orijinal formuyla çıkarken, yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde kanca açılması yaparak sıyrılmaktadır. Bu durumun sebebi, ara yüzey hasarının yanında lif ve matris dayanımının da düşüşüdür. Matrisin zayıflamasına karşın lifler bozulmaya uğramamış olsaydı kanca açılması görülmeyebilirdi. 600°C'de çeliğin harca kıyasla daha yüksek olan termal genleşmesi de ara yüzey hasarlarının sebeplerinden biridir. Yapısal çeliklerde 600°C'de %50'ye varan dayanım kayıpları olabilmektedir [4].

![](_page_8_Picture_1.jpeg)

Şekil 8. Yüksek sıcaklığa (600°C) maruz kalmış (üst) ve kalmamış (alt) çelik lif

Yüksek sıcaklık etkisinde liflerin dayanımındaki değişimi saptamak üzere 300 ve 600°C sıcaklığa maruz kalan her bir seriyi temsilen seçilen bir SIFCON numunesinden lif örnekleri alınmıştır. Sekil 7'de isaretlenen cekirdek bölgesi ve dış bölgeden 5'er adet lif tarif edilen yöntemle çıkarılmıştır. Liflerin yüzeylerindeki zayıf katman temizlendikten sonra çapları mikrometre ile ölçülmüş, liflere doğrudan çekme deneyi uygulanmıştır. Matris türü ve nem durumundan bağımsız olmak üzere dış bölgeden (yüzeyin 2-3 mm altından) alınan numunelerde 0,10 ila 0,15 mm, cekirdek bölgesinden alınan numunelerde ise 0,05 ila 0,10 mm kesit kaybı ölçülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerin aynı bölgelerinden alınan liflerde ise ihmal edilebilir büyüklükte (0 – 0,05 mm) kesit daralması söz konusudur. Bu düşük miktardaki kesit daralmasının cekme etkisiyle oluşan eksenel uzamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık geçirmemiş numunelerden alınan çelik tellerin kanca açılması yapmadığı görülmüştür. Dayanımları, fabrika verisi olan 1100 MPa'dır. Matris türü ve nem durumundan bağımsız olarak çekirdek bölgesinden alınan numunelerin 400±40 MPa, dış bölgeden alınan numunelerin 250±30 MPa çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Çekirdek bölgesindeki liflerin dayanım kaybı yaklaşık %64, dış bölgedeki liflerin yaklaşık %77 mertebesindedir. Çekirdek bölgesindeki lifler az da olsa yüzeydeki liflere göre vüksek sıcaklık etkisinden korunmuslardır. Burada örneğin 25 mm kalınlığında plak seklinde olduğu dolayısıyla çekirdek bölgesinin de aslında yüzeyden çok da derinde olmadığı dikkate alınmalıdır.

# 4. SONUÇLAR

SIFCON kompozitlerin yüksek sıcaklık dayanıklılığının araştırıldığı deneysel çalışmada bazı önemli bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir:

• Hacimce %20 oranında kullanılan çelik teller, 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ile 28 gün standart kürde 96 MPa, 12 saat 100°C buhar küründe 110 MPa dolaylarında eğilme dayanımına sahip kompozit malzeme üretilmiştir.

- SIFCON bağlayıcı fazını oluşturan harçlar lifsiz halde 240 280°C arası paylayarak dağılmaktadır. Çelik liflerin kullanıldığı SIFCON kompozitlerinde yüzeyde görülen kılcal çatlaklara rağmen dağılma olmamıştır.
- SIFCON kompozitlerinin eğilme dayanımları 300°C sıcaklık uygulamasında artarken, 600°C uygulandığında standart kürde ortalama %32, buhar küründe ise %36 mertebesinde düşmüştür. Numunenin yüksek sıcaklık öncesi suya doygun veya 48 saat 50°C'de kurutulmuş olması hasar mertebesini belirgin derecede değiştirmemiştir.
- 300°C'e maruz kalmış SIFCON kompozitlerinin eğilme tokluğu artarken, 600°C'ye maruz kalmış olanların yüksek sıcaklığa maruz kalmamış durumdakine benzer eğilme tokluğu değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum 600°C'de çelik tellerin bozulmaya başlaması, tellerin zayıflamış ve çatlaklı C-S-H yapısından kanca açılması yaparak sıyrılması ile açıklanabilir. Diğer sıcaklıklarda kanca açılması gözlenmemiştir.
- Çalışmaya konu olan SIFCON kompozitleri 600°C'ye maruz kalsa bile 65 70 MPa eğilme dayanımına ve önemli derecede tokluğa sahiptir. Yüksek sıcaklıkta performans kaybının sadece matristen değil çelik tellerin de önemli ölçüde hasara uğraması ve kesit kaybetmesi ile oluştuğu bu çalışma ile gösterilmiştir.

### Teşekkür

Yazarlar, Modern Beton adına Nagihan HALDENBİLEN'e, BASF adına Osman TEZEL'e, DRACO adına Gökhan YILMAZ'a ve Mustafa GEÇER'e teşekkür eder.

#### Kaynaklar

- 1. Scheneider, B., *Development of SIFCON Through Applications, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, E&FN Spon, pp. 177-194, 1992.
- Yazıcı, H., Aydın, S., Yiğiter, H., Yardımcı, M.Y., Alptuna, G., "Improvement on SIFCON Performance by Fiber Orientation and High-Volume Mineral Admixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, No.22, pp. 1093-1101, 2010.
- 3. Kanna, V., Olson, R.A., Jennings, H.M., "Effect of Shrinkage and Moisture Content on the Physical Characteristics of Blended Cement Mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.10, pp. 1467-1477, 1998.
- 4. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık* (*Durabilite*), THBB yayınları, pp. 70-74, 2010.
- 5. Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B., "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers", *Construction and Building Materials*, No.22, pp. 504-512, 2008.
- 6. Orange, G., Acker, P., Vernet, C., "A New Generation of UHP Concrete: Ductal Damage Resistance and Micromechanical Analysis", HPFRCC3, Mainz, Germany, pp. 101-111, 1999.