

## Farklı Sıcaklıkların SIFCON Betonunun Mekanik özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Ferhat Aydın

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

### Özet

Çimento, silis dumanı, kuvars kumu ile birlikte çok miktarda çelik liflerin bulunduğu, yüksek eğilme dayanımı, süneklik ve tokluk özelliklerine sahip SIFCON betonlar yeni nesil yapı malzemelerindedir. SIFCON bu özelliklerinden dolayı askeri yapılar ve sığınaklar gibi yüksek enerji yutma kapasitesine sahip yapılarda kullanılmasından dolayı yangın ve patlama gibi sebeplerden dolayı yüksek sıcaklığa maruz kalabilmektedirler. Bu çalışmada SIFCON betonların yüksek ve düşük ısılarda basınç ve eğilme davranışları incelenmiştir. Hacimce çelik lif oranı %24 olan 10 adet küp (100x100x100 mm) ve 10 adet kiriş (74x74x500 mm) SIFCON numuneleri üretilmiştir. Gerekli kür işlemleri yapıldıktan sonra -35, +22, +100, +200, +300 °C derecelerdeki ısıların etkisinde eğilme ve basınç davranışları belirlenmiştir. Kiriş numunelerin yük-sehim grafikleri çizilerek eğilme dayanımı, kırılma tokluğu değerleri belirlenmiş ve küp numunelerinin ise basınç dayanımları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** SIFCON, Isı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk

## Investigation of the Effect of Different Temperatures on Mechanical Properties of SIFCON

### Abstract

SIFCON is one of the new generation building materials which has high bending strength, ductility and toughness properties including cement, silica fume, quartz sand and large amount of steel fibers. Because of these properties, SIFCON concrete can be exposed to high temperatures due to fire and explosion because it is used in military structures and shelters. In this study, compressive and flexural behavior of SIFCON at high and low temperatures were investigated. SIFCON samples of 10 cube (100x100x100 mm) and 10 beams (74x74x500 mm) were produced with 24% by volume steel fiber ratio. After curing procedures, compressive and flexural behaviour were determined under the influence of temperatures of -35, +22, +100, +200, +300 °C. Flexural strength and fracture toughness values of the beam samples were determined by drawing the load-deflection graphs and the compressive strengths of the cube samples were compared.

**Key words:** SIFCON, temperature, compressive strength, flexural strength, toughness

### 1. Giriş

Günümüzde dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi olan betonun en büyük eksiği olarak gevrekliği gösterilmektedir. Araştırmacılar betonu daha sünek davranması için sürekli çalışmalar yapmaktadır. Betonun kırılması sırasında sönmölen enerji miktarının düşük olması, gevrek kırılmayı önlemek ve sünek davranış elde etmek için beton içerisine çeşitli lifler eklenmektedir.

Genellikle betona kısa çelik lifler ilave edilerek çözümler üretilmektedir. Son yıllarda geliştirilen kalıp içerisine yoğun miktarda çelik liflerin %5-20 oranında yerleştirilmesinin ardından çimento, su, akışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı ve kuvars kumundan oluşan bulamacın çelik liflerin içerisine dökülmesi sonucunda SIFCON olarak isimlendirilen yüksek çekme dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve basınç dayanımına sahip çimento esaslı betonlar geliştirilmiştir. Klasik çelik lifli betona göre yaklaşık 10 kata varan oranda çelik liflerin kullanılması SIFCON'ların daha sünek olmasını sağlamakla birlikte daha yüksek dayanımlara ulaşılmaktadır. Yüksek tokluk ve düktilite sayesinde yapı güçlendirmesinde, endüstriyel zeminlerde, askeri yapılarda kullanılabilir. Savunma amaçlı askeri amaçlarla kullanılabilen SIFCON betonlar yangın ve patlama kaynaklı etkilerden dolayı yüksek sıcaklıklara maruz kalabilmektedirler.

Yüksek sıcaklıkların SIFCON'a etkisinde 100 C°'de kılcal boşluklardaki su uzaklaşmakta, jeldeki adsorbe su ve hidratlardaki bünye suyu 300 C°'ye doğru buharlaşmaya başlamaktadır. Bu aşamada betonda büzülme önemli seviyelerde ve yapıdan dışarı çıkmaya çalışan su, boşluklarda buhar basıncı oluşturmaktadır. 300 C°'den itibaren alüminli ve demiroksitli bileşenler dehidrate olmaya başlamakta, 400 C° dolaylarında Ca(OH)<sub>2</sub>'den CaO'e dönüşüm başlamakta ve 600 C°'ye yaklaştıkça C-S-H yapısı hızla tahrip olmaktadır [1]. Yüksek sıcaklık etkisinde numune nem içeriğindeki artış buhar basıncını artırmaktadır. Silis dumanı kullanımını sonucu boşluk sistemindeki azalma ve çaplardaki daralma sebebiyle özellikle yüksek dayanımlı betonlar patlayarak parçalanabilmektedir. Aydın ve arkadaşlarının [2] çalışmasında yüksek dayanımlı lifsiz harçlarda parçalanma 300 C°'nin üstünde oluşmuştur. Çelik lifli numunelerde ise 300 C°'de eğilme dayanımı artışı belirtilmiştir. 300 C° sıcaklık sonrasında dayanımların artışının sebebi, C-S-H yapısı henüz bozulmamış matrisin kuruma büzülmesi ile lif çeperini sıkıştırması olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca 600 C°'ye maruz kalan SIFCON numunelerinde yapılan gözlemsel incelemede özellikle yüzeydeki liflerin karardığı ve kırılma eğiliminin arttığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, yüksek sıcaklığa karşı SIFCON yapı elemanlarının tüm yüzeylerin pas payı benzeri koruyucu bir harç tabakası ile kaplanması önerilmekte ve böyle bir yöntem korozyonun önlenmesinde etkindir.

Shannag ve arkadaşları [3] tarafından yapılan bir çalışmada SIFCON içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığı ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı görülmüştür. Bayramov ve arkadaşları [4] tarafından istatistiksel tepki yüzey modellemesi kullanarak yapılan bir çalışmada çelik tellerin yüksek performanslı betonlar üzerindeki etkileri incelenmiş; çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılana kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır. Naaman [5] SIFCON'da silis dumanı ve çelik lif etkisini beraber incelemiştir. Bu ikilinin darbe etkisi altında ve yorulma sırasında oluşan hasarları farklı şekillerde olsa da birbirlerini tamamlayıcı şekilde engellediklerini belirtmiştir.

Araştırmacılar tarafından SIFCON beton kullanarak betonarme kirişlerin kayma etkisine karşı onarımı ve güçlendirilmesi [6], atık lastiklerinden elde edilen çelik lifler kullanılarak üretilen SIFCON betonun performansının değerlendirilmesi [7] ve SIFCON levhaların darbe etkisindeki davranışı [8] deneysel olarak araştırılmıştır. Reaktif pudra betonu ve SIFCON betonun birlikte kompozit olarak tasarlanması ve sıkıştırma basıncı uygulanması [9], silindir beton numunelerinin GFRP kumaşla sarılması ile SIFCON ile güçlendirilmesinin karşılaştırılması [10], SIFCON

matrisindeki tek çelik lifin çekme davranışının belirlendiği [11] ve üç eksenli basınç altında SIFCON betonun davranışı [12] konularında yapılmış çalışmalar mevcuttur. Sıcaklık etkisinde SIFCON betonun eğilme davranışı incelendiği çalışmada [13] standart veya buharla kür edilmiş SIFCON beton numuneleri 300, 600, 750 ve 900 C°'ye tabi tutulmuştur. Numunelerin 300 C°'ye maruz bırakılması mekanik performansı artırırken, daha yüksek sıcaklıklarda çelik liflerin kesitindeki kayıp ve C-S-H jel yapısının tahrip olması gibi nedenlerle olumsuz etkiler tespit edildiği belirtilmiştir.

Bu çalışma kapsamında; SIFCON beton kiriş ve küp numuneler üretilerek -35 , +22, +100, +200, +300 C° arasındaki ısılarda eğilme ve eksenel basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda eğilme dayanımları, basınç dayanımları, yük-sehim grafikleri ve tokluk değerleri değerlendirilmiş ve SIFCON betonun sıcaklık etkisindeki davranışları incelenmiştir.

## 2. Malzeme ve Metot

DeneySEL çalışmalarda 74x74x500 mm boyutlarında 10 adet kiriş numunesi ve 100x100x100 mm boyutlarında 10 küp numune olmak üzere 2 grup toplam 20 adet SIFCON beton üretilmiştir. PÇ 42,5 CEM I R tipi çimento, silis dumanı, kuvars kumu kullanılmıştır. Çelik lifler iki ucu kıvrılmış, soğuk çekilmiş, 50 mm boyunda, 1 mm çapında ve 7,80 gr/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığa sahiptir. Kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı Polycar 300 kullanılmıştır. Bulamacın su/çimento oranı 0,30 ve lif miktarı hacimce %24 olarak belirlenmiştir. Silis dumanı çimento ağırlığının %20'si ve katkı/çimento oranı 0,01'dir. Beton karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Beton karışım oranları

	Malzeme Miktarı (kg)
<b>Çimento</b>	1045
<b>Su</b>	314
<b>Silis</b>	209
<b>Kuvars</b>	335
<b>Katkı</b>	10,45
<b>Toplam</b>	1913,45

Beton bulamaç hazırlanıp çelik lif yerleştirilmiş kalıplara dökülerek, vibrasyon uygulanarak üretilmiştir (Şekil 1). Prizi gerçekleşen numunelere 3 gün boyunca 90 C°'de buhar kürü uygulanmış, daha sonra buhar kür havuzuna konularak toplam 28 günlük kür edilmiştir.



Şekil 1. Çelik liflerin kalıba yerleştirilmesi ve bulamacın kalıplara dökülmesi

Yeterli dayanıma ulaşan küp ve kiriş numuneler istenilen ısılarla ulaşması için düşük ısılarda derin dondurucuda, yüksek ısılarda fırında bekletilmiştir. Düşük ısılarda  $-30\text{ C}^0$ , oda sıcaklığında  $+22\text{ C}^0$  ve yüksek ısılarda ise  $+100\text{ C}^0$ ,  $+200\text{ C}^0$ ,  $+300\text{ C}^0$  'de basınç ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2' de küp ve kiriş numunelerin ısıtılması ve testleri görülmektedir.



Şekil 2. Numunelerin fırında ısıtılması ile eğilme ve basınç deneyleri

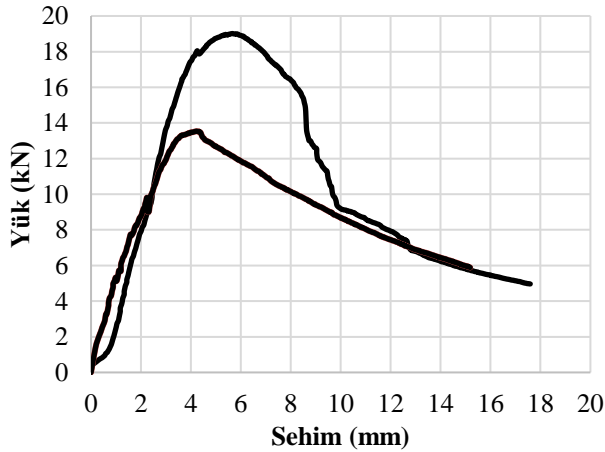
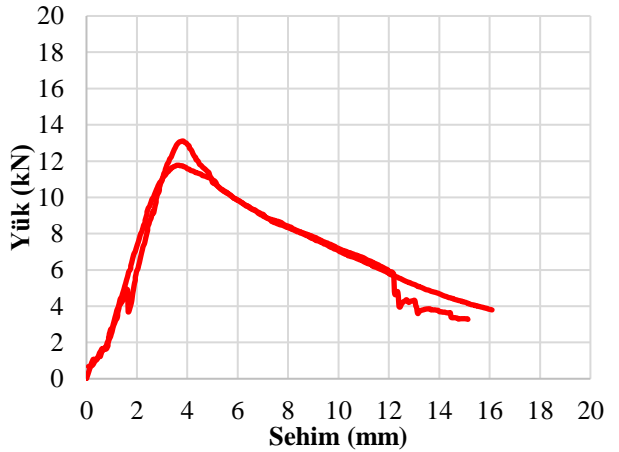
### 3. Eğilme Deneyi Sonuçları

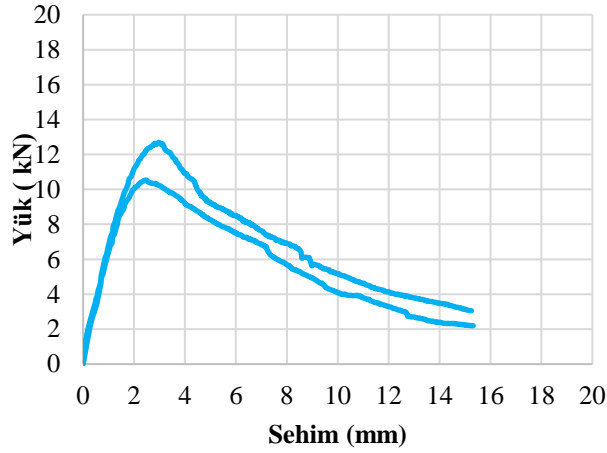
Üç noktalı eğilme deneyleri sonucunda hesaplanan eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 2'de, elde edilen verilere göre her ısı değeri için iki kiriş numunenin çizilen yük-sehim grafikleri Şekil 3-7'de verilmiştir.

Tablo 2. Eğilme dayanımı ve kırılma tokluk değerleri

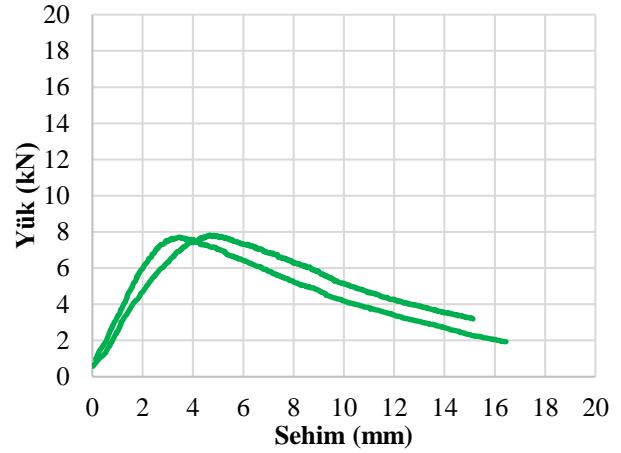
Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )				Tokluk (kNmm)			
-30	1	22,27	Ortalama	26,89	1	140,5	Ortalama	161,6
	2	31,52			2	182,8		
+22	1	19,61	Ortalama	20,55	1	112,3	Ortalama	106,3
	2	21,49			2	100,2		
+100	1	17,32	Ortalama	19,16	1	87,6	Ortalama	92,0
	2	20,99			2	96,4		
+200	1	12,76	Ortalama	12,88	1	69,8	Ortalama	73,1
	2	13,01			2	76,4		
+300	1	11,83	Ortalama	14,02	1	104,6	Ortalama	111,5
	2	16,21			2	118,7		

En yüksek eğilme dayanımına -30 C<sup>0</sup>'de 26,89 N/mm<sup>2</sup>, en düşük eğilme dayanımına +200 C<sup>0</sup>'de 12,88 N/mm<sup>2</sup> değeri ile ulaşılmıştır. SIFCON betonun oda sıcaklığındaki eğilme dayanımı 20,55 N/mm<sup>2</sup> bulunmuştur. Genellikle sıcaklık arttıkça eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Oda sıcaklığı referans alındığında -30 C<sup>0</sup>'de düşük sıcaklıkta yaklaşık eğilme dayanımının %30 oranında arttığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda +200 ve +300 C<sup>0</sup>'de sırasıyla %37 ve %31 oranında dayanımın düştüğü belirlenmiştir. Tokluk sonuçları incelendiğinde eğilme dayanımında olduğu gibi en yüksek tokluk değeri -30 C<sup>0</sup>'de 161,6 kNmm, en düşük +200 C<sup>0</sup>'de 73,1 kNmm bulunmuştur. Oda sıcaklığında tokluk 106,3 kNmm olmak üzere -30 C<sup>0</sup>'de tokluk değeri %52 oranında arttığı, +300 C<sup>0</sup>'de sünekleşerek yaklaşık %5 oranında artış belirlenmiştir. +100 ve +200 C<sup>0</sup>'de sırasıyla tokluğun %13 ve %31 oranında düştüğü tespit edilmiştir.

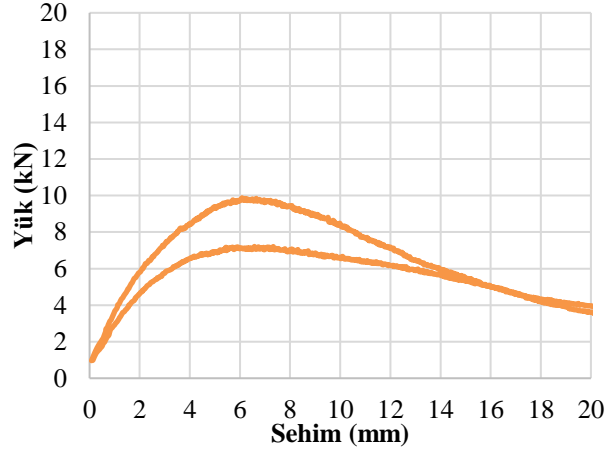
Şekil 3. Yük-sehim grafikleri (-30 C<sup>0</sup>)Şekil 4. Yük-sehim grafikleri (+22 C<sup>0</sup>)



Şekil 5. Yük-sehim grafikleri (+100 C°)

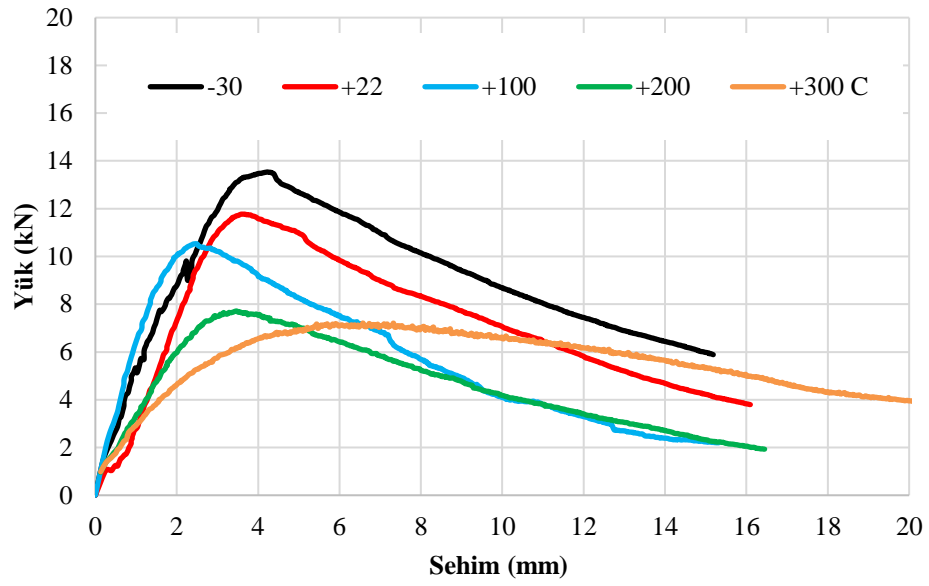


Şekil 6. Yük-sehim grafikleri (+200 C°)

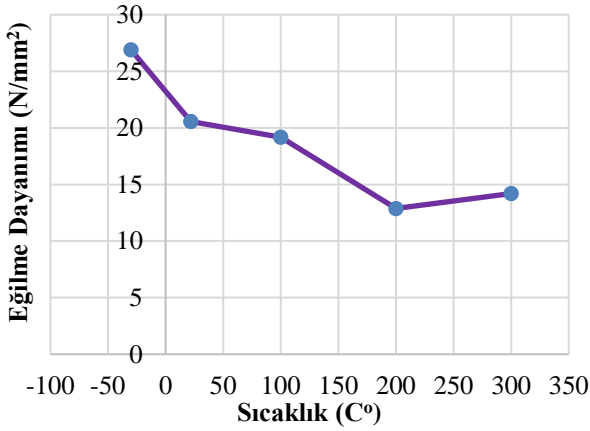


Şekil 7. Yük-sehim grafikleri (+300 C°)

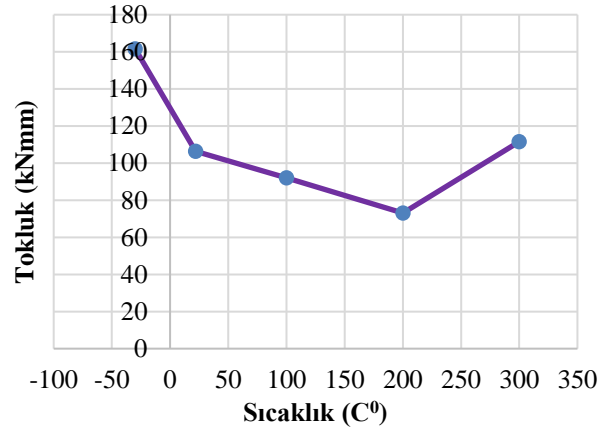
Farklı ısılardaki eğilme davranışını değerlendirmek amacıyla her ısı türünü temsil eden grafikler tek grafik üzerinde karşılaştırılarak Şekil 8'de görülmektedir. Eğilme grafikleri incelendiğinde yüksek ısılarda malzemede sünekliğin arttığı bununla birlikte daha fazla sehim göstererek rijitliğin düştüğü tespit edilmiştir. Düşük ısılarda artan dayanımla birlikte rijitliğin de paralel bir davranış sergilediği görülmektedir. Ortalama eğilme dayanımları ve tokluk değerleri belirlenen kiriş numunelerin sıcaklık etkisiyle ortaya çıkan değişimler grafik olarak Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Eğilme testleri sonucunda bazı kiriş numunelerin kırılma halleri Şekil 11'de verilmiştir.



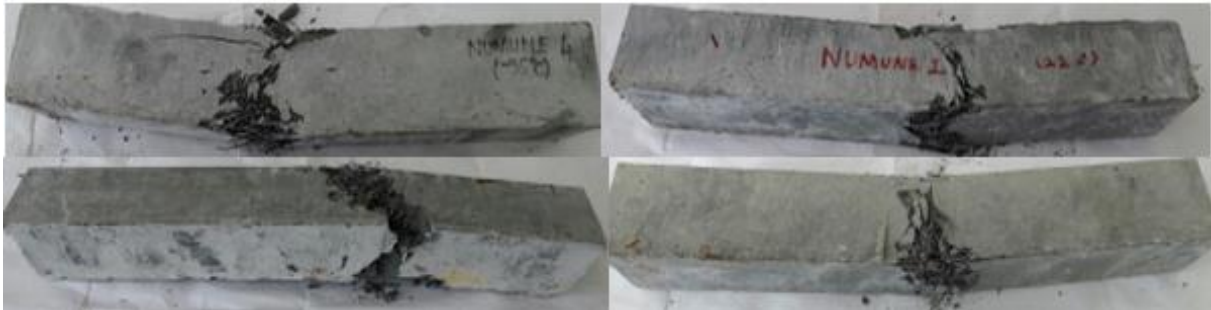
Şekil 8. Yük-sehim grafiklerinin karşılaştırması



Şekil 9. Eğilme dayanımı-sıcaklık grafiği



Şekil 10. Tokluk-sıcaklık grafiği



Şekil 11. Eğilme testi sonrası kırılan kiriş numuneleri

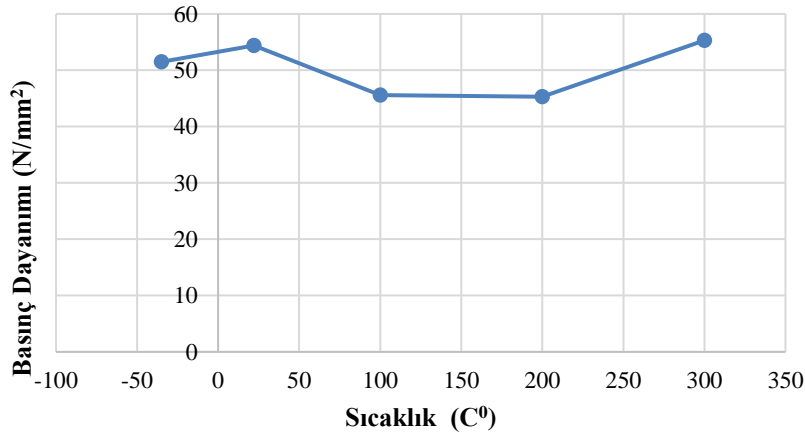
#### 4. Basınç Deneyi Sonuçları

Kküp numunelere yapılan aksel basınc deneyleri sonucunda farklı ısılarda elde edilen basınç dayanımı Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Basınc dayanımı değerleri

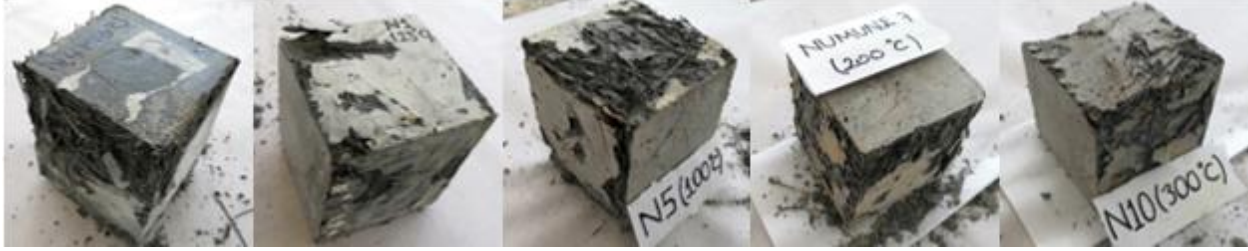
Sıcaklık (C°)	Basınc Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		
-35	1	53,10	Ortalama
	2	49,80	
+22	1	52,70	Ortalama
	2	56,01	
+100	1	44,51	Ortalama
	2	46,68	
+200	1	43,68	Ortalama
	2	46,96	
+300	1	57,59	Ortalama
	2	52,91	

Basınc testlerinde en yüksek basınç dayanım oda sıcaklığında 54,4 N/mm<sup>2</sup> ve +300 C°'de 55,3 N/mm<sup>2</sup>, en düşük basınç dayanımı +200 C°'de 45,3 N/mm<sup>2</sup>'dir. Isı farklarına göre basınç dayanımındaki değişim eğilme dayanımına göre daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Oda sıcaklığına göre -30 C°'de basınç dayanımı yaklaşık %5 oranında, yüksek ısılarda +100 ve +200 C°'de yaklaşık %16 oranında azalmaktadır. Küp numunelerinin farklı ısılardaki basınç dayanım değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Basınc deneyleri sonrasında farklı ısılardaki küp numunelerin kırılma halleri Şekil 13'de görölmektedir.



**Şekil 12.** Basınc dayanımı-sıcaklık grafiği





Şekil 10. Basınç numunelerinin kırılma halleri

## 5. Sonuç ve Öneriler

DeneySEL çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- SIFCON betonda en yüksek eğilme dayanımından en düşüğüne kadar belirlenen sıcaklıkların sıralaması  $-30\text{ C}^{\circ}$ ,  $+22\text{ C}^{\circ}$ ,  $+100\text{ C}^{\circ}$ ,  $+300\text{ C}^{\circ}$ ,  $+200\text{ C}^{\circ}$  olmak üzere eğilme dayanımları sırasıyla  $26,89\text{ N/mm}^2$ ,  $20,55\text{ N/mm}^2$ ,  $19,16\text{ N/mm}^2$ ,  $14,02\text{ N/mm}^2$ ,  $12,88\text{ N/mm}^2$  dir.
- Oda sıcaklığına göre  $-30\text{ C}^{\circ}$ 'de yaklaşık eğilme dayanımı %30 oranında arttığı,  $+300\text{ C}^{\circ}$ 'de %32,  $+200\text{ C}^{\circ}$ 'de %37 ve  $+100\text{ C}^{\circ}$ 'de %7 oranında dayanımın düştüğü belirlenmiştir.
- En yüksek tokluk değeri  $-30\text{ C}^{\circ}$ 'de  $161,6\text{ kNmm}$ , en düşük  $+200\text{ C}^{\circ}$ 'de  $73,1\text{ kNmm}$  ve oda sıcaklığında tokluk  $106,3\text{ kNmm}$  bulunmuştur.
- Oda sıcaklığına göre tokluk değerlerine göre  $-30\text{ C}^{\circ}$ 'de %52 oranında,  $+300\text{ C}^{\circ}$ 'de yaklaşık %5 oranında arttığı belirlenmiştir.  $+100$  ve  $+200\text{ C}^{\circ}$ 'de sırasıyla tokluğun %13 ve %31 oranında düştüğü tespit edilmiştir.
- En yüksek basınç dayanımı oda sıcaklığında  $54,4\text{ N/mm}^2$  ve  $+300\text{ C}^{\circ}$ 'de  $55,3\text{ N/mm}^2$ , en düşük basınç dayanımı  $+200\text{ C}^{\circ}$ 'de  $45,3\text{ N/mm}^2$  dir.
- Oda sıcaklığına göre basınç dayanımı  $-30\text{ C}^{\circ}$ 'de yaklaşık %5, yüksek ısılarda  $+100$  ve  $+200\text{ C}^{\circ}$ 'de %16 oranında azalmaktadır.
- Klasik betonlarda olduğu gibi  $+200$  ve  $+300\text{ C}^{\circ}$  gibi yüksek sıcaklıklarda dayanım artışları SIFCON betonda da görülmüştür. Ayrıca klasik betonlardan farklı olarak düşük eğilme ve tokluk değerleri SIFCON betonda yüksek değerlerdedir. Klasik betonlarda basınç dayanımına göre eğilme dayanımları %20'ler civarında iken SIFCON'da yüksek sıcaklık etkisinde dahi eğilme dayanımları basınç dayanımlarının %26 ve %40 arasında değişmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Baradan, B. Yazıcı, H. Ün, H. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), THBB yayınları, 2010, pp. 70-74.
- [2] 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. 2008; 22, pp. 504-512.

- [3] Shannag, M.J. Barakat, S., Jaber, F. Structural Repair of Shear Deficient Reinforced Concrete Beams Using SIFCON, Magazine of Concrete Research, 2001; 53,6, 391-403
- [4] Bayramov, F. , İlki, A. , Taşdemir, C. Taşdemir, M. A. , Yerlikaya, M.. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 2, İstanbul, Turkey, 2004; April 4-7, 73-82.
- [5] Naaman, A.E. Proceedings of the International Workshop, SIFCON: Tailored Properties for Structural Performance. Edited by H. W. Reinhart and A.E. Naaman. RILEM. Published by E & FN Spon, 1991, London.
- [6] Rajai Z. Al-Rousana, Mohammad J. Shannagb Shear Repairing and Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using SIFCON Structures. 2018;14 389–399.
- [7] Sengul O. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers Construction and Building Materials. 2018; 186 1082–1091
- [8] Elavarasi D., Saravana Raja Mohan K. On low-velocity impact response of SIFCON slabs under drop hammer impact loading Construction and Building Materials. 2018;160 127–135.
- [9] Ipek M., Aksu M., Uysal M., Yilmaz K. Vural I. Effect of pre-setting pressure applied flexure strength and fracture toughness of new SIFCON + RPC composite during setting phase Construction and Building Materials. 2015;79 90–96
- [10] Abdollahi B., Bakhshi M., Mirzaee Z., Shekarchi M., Motavalli M. SIFCON strengthening of concrete cylinders in comparison with conventional GFRP confinement method Construction and Building Materials. 2012;36 765–778.
- [11] Tuyan M., Yazıcı H. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix Construction and Building Materials. 2012;35 571–577.
- [12] Farnam Y., Moosavi M., Shekarchi M., Babanajad S.K., Bagherzadeh A. Behaviour of Slurry Infiltrated Fibre Concrete (SIFCON) under triaxial compression Cement and Concrete Research. 2010;40 1571–1581.
- [13] Beglarigale A., Yalçınkaya Ç., Yigiter H., Yazıcı H.. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. Construction and Building Materials. 2016; 104, 99–108.