



**SIFCON'UN MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ FARKLI LİF VE  
MATRİS FAZINA GÖRE İNCELENMESİ**

**Haluk Görkem ALCAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Malzemesi Bilim Dalı  
Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL**

**2017**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SIFCON'UN MEKANİK DAVRANIŞLARININ FARKLI LİF VE  
MATRİS FAZINA GÖRE İNCELENMESİ**

**Haluk Görkem ALCAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Yapı Malzemesi Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2017**

**Her Hakkı Saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

SIFCON'UN MEKANİK DAVRANIŞLARININ FARKLI LİF VE MATRİS  
FAZINA GÖRE İNCELENMESİ

Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL danışmanlığında, Haluk Görkem ALCAN tarafından hazırlanan hazırlanan bu çalışma **20/06/2017** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Malzemesi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **06.07/2017** tarih ve **27/36** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SIFCON'UN MEKANİK DAVRANIŞLARININ FARKLI LİF VE MATRİS FAZINA GÖRE İNCELENMESİ

Haluk Görkem ALCAN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Malzemesi Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

SIFCON (çimento harcı enjekte edilmiş lifli beton) çeşitli lifler kullanılarak elde edilen, çimento esaslı kompozit bir malzemedir. SIFCON hacimce %5 - %20 oranında lif içerir. Sahip olduğu bu yüksek lif miktarı sayesinde, SIFCON basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve tokluk gibi mekanik özelliklerde yüksek performans gösterir. Bu yeni nesil özel beton, özellikle sahip olduğu yüksek tokluk ve eğilme dayanımlarından ötürü patlamaya karşı dayanıklı askeri yapılarda, endüstriyel zeminlerde ve köprü ayaklarında kullanılması tavsiye edilir.

SIFCON harç fazı, lif fazı ve ara yüzey olmak üzere üç farklı fazdan meydana gelmektedir. Bu çalışmada, lif fazının değişiminin SIFCON' un mekanik özelliklere etkisini gözlemlemek için çelik ve elyaf lif kullanılmıştır. Ayrıca çimento ağırlığının %5, %10 ve %15' i kadar silis dumanı ve çimento ağırlığının %20, %40 ve %60' ı kadar uçucu kül ilave edilerek, harç fazına katılan mineral katkıların SIFCON' un mekanik özelliklerine nasıl etki ettiği incelenmiştir.

Mekanik özelliklerin tespiti için üretilen SIFCON numunelere basınç, eğilme ve tokluk deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ilave edilen mineral katkıların iç yapıda oluşturduğu değişiklikleri gözlemlemek için SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen veriler sonucunda çelik liflerin elyaf liflere göre daha yüksek deneysel sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Mineral katkıların kullanılmasının betonunun mekanik özelliklerine olumlu etkisi yapılan deneylerle anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra alınan SEM görüntüleri, mineral katkıların betonun iç yapısını iyileştirdiği görülmektedir.

**2017, 52 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** SIFCON, özel beton, çelik lif, elyaf lif, mineral katkılı beton, mekanik özellik

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **EXAMINATION of MECHANICAL BEHAVIORS of SIFCON BASED on DIFFERENT FIBER and MATRIX PHASES**

Haluk Görkem ALCAN

Atatürk University  
Grade School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Building Materials Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) is a cement-based composite material obtained by using various fibers. SIFCON contains 5 to 20% fiber in volume. Due to its high percentage of fiber, SIFCON displays a high performance in mechanical properties such as compressive strength, bending strength, tensile strength and toughness. This new generation special concrete is recommended for use in blast proof military structures, industrial floors and bridge legs, particularly for its high toughness and bending strength.

SIFCON consists of three phases; mortar phase, fiber phase and interface. In this study, steel and woolen polypropylene fibers are used in order to observe the effects of changing the fiber phase on the mechanical properties. Furthermore, effects of mineral additives mixed into the mortar phase on the mechanical properties of SIFCON were analyzed by adding silica fume in amounts of 5, 10 and 15% of cement weight and fly ash in amounts of 20, 40 and 60% of cement weight.

Compression, flexural and toughness experiments were conducted on SIFCON specimens to determine the mechanical properties. Additionally, SEM images were taken to observe the changes in the internal structure caused by the mineral additives. As a result of the data obtained, it was found that the steel fibers yield higher experimental outputs compared to woolen polypropylene fibers. Positive impact of using mineral additives on the mechanical properties of the concrete was clarified with the experiments conducted. The SEM images taken in the study prove that the mineral additives improve the internal structure of the concrete.

**2017, 52 pages**

**Keywords:** SIFCON, special concrete, steel fiber, woolen polypropylene fiber, concrete with mineral additive, mechanical property

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada esnasında değerli bilgi ve yardımlarını hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu çalışmanın deneyleri aşamasında her türlü yardımı yapan kıymetli arkadaşlarım Sayın Osman Nuri AKARSU ve Sayın Arş. Gör. Barış BAYRAK'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca kullanılan liflerin temini ve alakasından ötürü Atlas1 Firması Satış Sorumlusu Sayın Özgür Can PEKŞEN'e, deneyler esnasında yardımlarından ötürü BESMAK Satış ve Pazarlama Müdürü Sayın Murat ÖZBEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugününe kadar beni hiç yalnız bırakmayan, her zaman yanımda olan ve çalışmamın her aşamasında sabır gösteren sevgili Annem Öğr. Gör. Jale Hülya ALCAN'a, Babam Mehmet Raci ALCAN'a ve eşim Arş. Gör. Bilge AKSU ALCAN'a şükranlarımı sunarım.

**Haluk Görkem ALCAN**

**Haziran, 2017**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>4</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>17</b>
3.1. Kullanılan Malzemeler .....	17
3.1.1. Çimento .....	17
3.1.2. Silis dumanı.....	18
3.1.3. Uçucu kül .....	19
3.1.4. Kuvars kumu .....	19
3.1.5. Lif .....	20
3.1.5.a. Çelik lif.....	20
3.1.5.b. Elyaf lif.....	21
3.1.6. Kimyasal katkı.....	22
3.1.7. Su.....	22
3.2. Numunelerin Üretim Şekli .....	23
3.3. Deney Gruplarının Oluşturulması .....	26
3.4. Numunelerin Kodlanması.....	26
3.5. Deneylerin Yapıldığı Cihazlar.....	27
3.5.1. Eğilme Dayanımı Hesaplanması .....	27
3.5.2. Basınç dayanımı ve tokluk değeri hesabı .....	29
3.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	31
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>33</b>
4.1. Basınç Dayanımı .....	33
4.2. Eğilme Dayanımı.....	36

4.3. Tokluk .....	39
4.4. SEM Görünteleri .....	44
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>49</b>
KAYNAKLAR .....	51
ÖZGEÇMİŞ .....	53





## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat
µm	Mikrometre
A	Yüzey alanı
b	Numune boyutu
cm <sup>2</sup>	Santimetrekare
d	Çap, numune boyutu
E	Elastisite modülü
GPa	Gigapaskal
gr	Gram
kg	Kilogram
kg-f	Kilogram - kuvvet
kV	Kilowatt
l, L	Boy
m <sup>3</sup>	Metreküp
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
N.m	Newton.metre
P	Kırılma yükü
s	Saniye
TI	Tokluk İndeksi
V <sub>f</sub>	Lif hacmi
ε	Birim şekil değiştirme
σ	Gerilme
ν	Poisson oranı

## Kısaltmalar

ASTM	American society for testing and materials
CEM	Çimento
CH	Kalsiyum hidroksit - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
CSH	Kalsiyum silikat hidrat ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )
KYD	Kuru yüzey doygun
LVDT	Elektronik deformasyon ölçer
TS EN	Türk standartları enstitüsü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Lif oranına göre gerilme - şekil değiştirme .....	4
Şekil 2.2. SIFCON'un gerilme - şekil değiştirme davranışı.....	5
Şekil 2.3. Farklı lif hacmi ve uçucu kül katkılı SIFCON'un eğilme - basınç dayanımı grafiği .....	6
Şekil 2.4. Polipropilen liflerin yük - sehim grafiği .....	11
Şekil 2.5. Dalgalı çelik liflerin yük - sehim grafiği .....	11
Şekil 2.6. Farklı boyda ki ve hibrit liflerin gerilme - şekil değiştirme eğrisi.....	12
Şekil 2.7. Yük - sehim grafiği.....	13
Şekil 2.8. SIFCON için farklı sıcaklıkta yük - sehim grafiği.....	14
Şekil 2.9. Eğilme dayanımına ile çimento - lif türünün etkisi .....	15
Şekil 2.10. Basınç dayanımına ile çimento - lif türünün etkisi .....	15
Şekil 2.11. Tekil veya hibrit lifli SIFCON'un eğilme mukavemeti ve tokluğu .....	16
Şekil 3.1. Çelik lifler.....	21
Şekil 3.2. Elyaf lif .....	22
Şekil 3.3. SIFCON dökümü .....	24
Şekil 3.4. Aşamalı döküm.....	25
Şekil 3.5. Kür havuzunda ki numuneler .....	25
Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan eğilme cihazı yükleme durumu .....	28
Şekil 3.7. Eğilme cihazı ve yükleme durumu .....	28
Şekil 3.8. Basınç cihazı yükleme durumu.....	29
Şekil 3.9. Küp numunenin iki yanına konulan LVDT'ler .....	30
Şekil 3.10. ASTM C 1018 lifli betonun yük - sehim grafiği .....	31
Şekil 3.11. SEM cihazı .....	32
Şekil 4.1. Basınç dayanımları grafiği.....	35
Şekil 4.2. Liflerin köprüleme özelliği.....	38
Şekil 4.3. Eğilme dayanımları grafiği.....	38
Şekil 4.4. Tokluk değerleri grafiği.....	40
Şekil 4.5. Ezilmiş küp ve prizma numuneler .....	42

<b>Şekil 4.6.</b> Lifsiz, katkısız CNTRL ve lifsiz %15 silis dumanı katkılı CNTRL SF15 gerilme - şekil değiştirme grafiği .....	43
<b>Şekil 4.7.</b> %15 silis dumanı içeren çelik ve elyaf lifli numunelerin gerilme - şekil değiştirme grafikleri.....	44
<b>Şekil 4.8.</b> Lifsiz ve mineral katkısız beton kesitinin SEM görüntüsü.....	45
<b>Şekil 4.9.</b> Lifsiz ve %15 silis dumanı katkılı beton kesitinin SEM görüntüsü .....	46
<b>Şekil 4.10.</b> Çelik lifli ve %15 silis dumanı katkılı SIFCON kesitinin SEM görüntüsü .....	47
<b>Şekil 4.11.</b> Elyaf lifli ve %15 silis dumanı katkılı SIFCON kesitinin SEM görüntüsü .....	48

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. SIFCON harcı bileşenleri özellikleri .....	6
Çizelge 2.2. Sertleşmiş beton özellikleri .....	7
Çizelge 2.3. Farklı lif oranlı betonların basınç ve darbe değerleri .....	8
Çizelge 2.4. Eksenel gerilmeler ve poisson oranı değerleri .....	8
Çizelge 2.5. Tokluk indeksi verileri .....	9
Çizelge 2.6. Lif geometrinin ve saplanma boyunun mukavemet değerlerine etkisi .....	10
Çizelge 2.7. Eğilme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi.....	10
Çizelge 2.8. Ön gerilmeli SIFCON'un mukavemet özellikleri.....	12
Çizelge 3.1. CEM I 42,5 R tipi çimento, silis dumanı ve uçucu külün kimyasal özellikleri.....	17
Çizelge 3.2. CEM I 42,5 R tipi çimento, silis dumanı ve uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	18
Çizelge 3.3. Kuvars kumu elek analizi .....	20
Çizelge 3.4. Çelik liflerin fiziksel özellikleri.....	21
Çizelge 3.5. Elyaf liflerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	22
Çizelge 3.6. Beton harcı karışım oranları (1 m <sup>3</sup> betona göre) .....	27
Çizelge 4.1. Lifsiz numunelerin basınç dayanımı.....	33
Çizelge 4.2. Çelik lifli numunelerin basınç dayanımı .....	34
Çizelge 4.3. Elyaf lifli numunelerin basınç dayanımı .....	34
Çizelge 4.4. Lifsiz numunelerin eğilme dayanımı .....	36
Çizelge 4.5. Çelik lifli numunelerin eğilme dayanımı.....	36
Çizelge 4.6. Elyaf lifli numunelerin eğilme dayanımı.....	37
Çizelge 4.7. Lifsiz numunelerin tokluk değeri.....	39
Çizelge 4.8. Çelik lifli numunelerin tokluk değeri .....	39
Çizelge 4.9. Elyaf numunelerin tokluk değeri .....	40

## 1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega (iri ve ince agrega) su ve gerektiği durumlarda bazı mineral veya kimyasal katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılması ile elde edilir. Üretilen bu beton ilk aşamada plastik (şekil verilebilir) kıvamda olup, belli bir süre sonunda su ile çimento arasındaki kimyasal reaksiyonların sonucunda mukavemet kazanarak sertleşir. Betona plastik kıvamda iken istenilen şeklin ve boyutların verilebilmesi, kendisini oluşturan en büyük parçalar olan agrega ve suyun doğada bolca bulunması, yüksek basınç mukavemeti ve üretiminin ekonomik olması gibi sebeplerden ötürü beton günümüzün vazgeçilmez yapı malzemelerinin başında gelmektedir (Erdoğan 2013).

Çevremizde bulunan irili ufaklı yapıların büyük çoğunluğunun ana malzemesi betondur. İnşa edilen veya edilmiş olan bu yapıların türleri, hizmet süreleri, buldukları ortam ve iklimleri farklıdır. Değişken olan bu şartlar için ideal yapıyı elde etmek için beton da zaman içinde sürekli gelişim göstermiştir. Hızla gelişen teknoloji ile beraber betonun birçok özelliğinin zamanla daha da ileriye gideceği ön görülmektedir. Geçtiğimiz 25 yıl içinde betonun mekanik ve durabilite (kalıcılık) özelliklerini iyileştirme adına çok çeşitli beton türleri üretilmiştir. Zamanla çeşitlenen bu betonlar, otoriteler tarafından ağırlıklı olarak normal betonlar ve özel betonlar olmak üzere 2 gruba ayırmışlardır.

Normal betonlar önemli bir ayrıcalık özelliği istemeyen yapılarda kullanılan bir beton türüdür. Ekonomik olması nedeniyle oldukça fazla tercih edilir ve basınç dayanımları 20 MPa ile 50 MPa arasındadır. Ancak normal betonun sahip olduğu çekme, tokluk (enerji yutma kapasitesi), aşınma, darbe ve kayma mukavemeti gibi mekanik özellikleri düşüktür. Bunun yanı sıra normal beton yarı gevrek bir malzemedir bu sebeple yük altında kırılması ani olmaktadır.

Normal betonda bahsettiğimiz bu olumsuzlukları giderilmesi ve geliştirilmesi için fiziksel veya kimyasal iyileştirmeler sonucunda özel betonlar oluşmuştur. Yüksek dayanımlı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, püskürtme betonlar, lifli betonlar,

polimer betonlar, ultra yüksek dayanımlı betonlar, reaktif pudra betonu, ağır beton ve çimento harcı enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON) bazı özel beton çeşitleridir (Özturan 2013). Bu beton çeşitlerinin çoğunda kullanılan malzeme miktarı oldukça küçük boyutlardan meydana gelir. Böylelikle boşluk miktarları minimum seviyeye indirilir ve buna bağlı olarak birçok mukavemet değeri ve aksenal şekil değiştirme kapasitesi arttırılır. Ancak bu beton türlerinden, özellikle yüksek dayanımlı beton ve ultra yüksek dayanımlı beton türlerinde, maruz kaldığı yük altında oluşan gerilme – şekil değiştirme eğrisinde tepe noktasını geçtikten sonra oluşan düşüşün ani olduğu gözlenmiştir. Bu durum betonun daha da gevrek olması anlamına gelir. Hatta bazı durumlarda bu tür betonların enerji yutma kapasitelerinin normal betonlardan bile az olduğu görülmüştür.

Zaman içerisinde, bu özel betonlarda oluşan gevreklik problemini çözmek için çelik, cam, elyaf, bazalt türde liflerin katılması fikri ortaya çıkmış ve böylelikle lifli betonlar oluşmuştur. Normal betonlarda genellikle hacimce %1-3 oranlarında liflerin ilave edilmesi ile lif donatılı betonlar üretilmiştir. Eklenen bu lifler sayesinde betonun özellikle eğilme, süneklik ve enerji yutma kapasiteleri gibi özellikleri artırılmıştır (Shah and Ribakov 2011). Lifli betonlarda kullanılabilen lif hacminin %3'ü geçmemesi sebebi ile bu beton türü bazen istenilen performansı verememektedir. Donatı miktarının artırılması ile lifli betonlarda işlenebilirlik ve yerleşme problemi görülmüştür, bu olumsuz etkileri gidermek ve donatı oranı arttırmak amacı ile SIFCON teknolojisi geliştirilmiştir.

SIFCON hacimce %5 - %30 oranında lif içerir (Schneider 1992) ki bu miktar lifli betonlarda bulunandan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Sahip olduğu fazla miktardaki lif sebebi ile SIFCON'un üretim şekli ve kullanılan malzemeleri diğer beton türlerine kıyasla farklılık teşkil eder. Lifli beton teknolojisinde lifler betona katılırken, SIFCON'da lifler öncelikle kalıba yerleştirilir, harç bu liflerin üzerine katılır. Kullanılacak olan lifler, gelen kuvvetin yönüne göre kalıplara yatay veya dikey olarak yerleştirilebilirler (Homrich and Naaman 1987). Yukarıda bahsettiğimiz lif yoğunluğundan dolayı, lifleri iyi bir şekilde sarabilecek ve kalıbı tamamen dolduracak bir harç fazı elde etmek için oldukça ince malzemeler kullanılır. Bu harç fazına bulamaç

adı da verilir. Harç hazırlanırken çimento, mineral katkıları, (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu) agrega olarak pudra (silis kumu, kuvars kumu, bazalt kumu) ve akışkanlığı sağlamak için kimyasal katkıları kullanılır. SIFCON üretimi ile ilgili herhangi bir şartname veya standart bulunmamakla beraber şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, üretilen harcın liflerin arasına girerek aderansı sağlaması için kullanılan en büyük malzeme boyutunun 600 mikron olduğu görülmüştür.

SIFCON'da kullanılan malzeme boyutlarının küçük olması ile boşluklar maksimum düzeyde doldurulur böylece en az seviyede boşluklu bir beton üretilmiş olur. Bunun yanı sıra içerdiği bol miktardaki lifler ile de özellikle eğilme ve tokluk mukavemetleri açısından üstün performanslı bir beton üretilmiş olur. Sahip olduğu bu avantajlar sebebi ile SIFCON'un öncelikle patlamaya ve yangına karşı korunması gereken sığınaklarda veya askeri yapılarda kullanılması tavsiye edilir (Schneider *et al.* 1988). Ayrıca betonarme kirişler, güçlendirme yapıları, endüstriyel zeminler ve köprüler gibi diğer yapılarda da kullanılabilir.

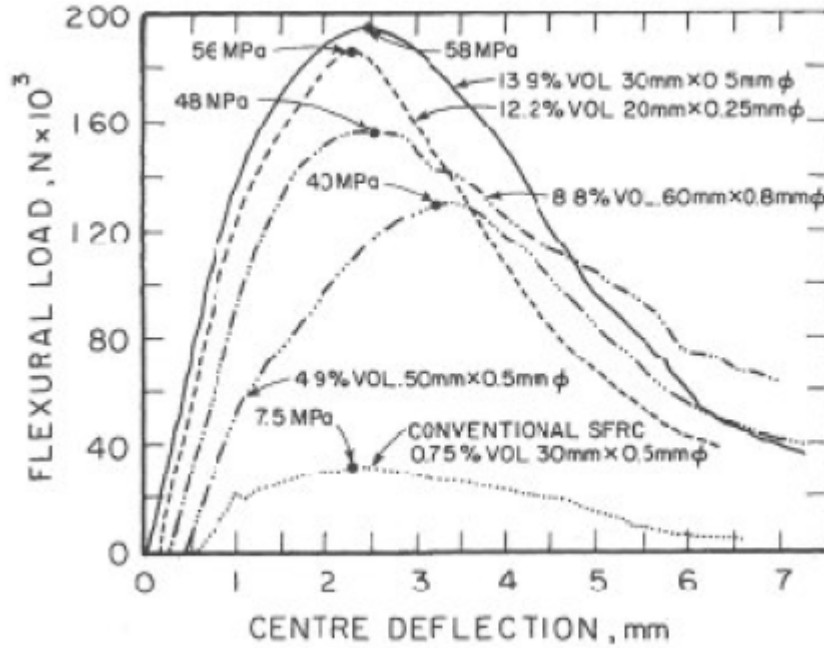
SIFCON'un mekanik davranışına matris fazı ve liflerin özellikleri etki etmektedir. Dolayısıyla hem harç fazı hem de liflerin etkisini incelemek için, bu çalışmada farklı lif türü ve mineral katkıların SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde çelik ve elyaf olmak üzere 2 çeşit lif kullanılmıştır. Ayrıca SIFCON harcında kullanılan mineral katılardan olan silis dumanı ve uçucu kül farklı oranlarda karışıma katılmıştır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

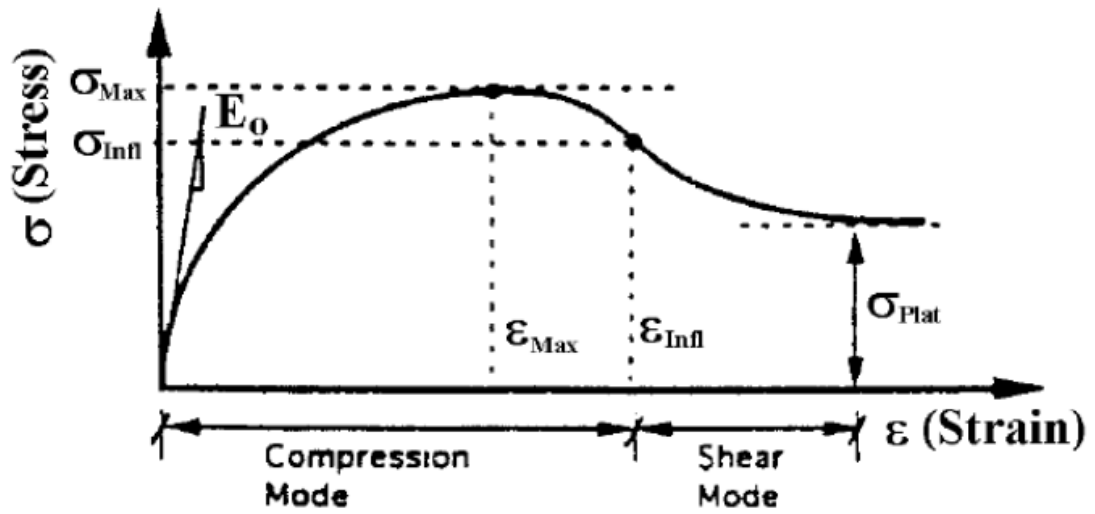
Bu çalışma öncesinde yapılan kaynak taramasında değişen lif türleri, harç içerikleri veya çeşitli kür şartları ile SIFCON'un mukavemet değerleri bazı farklılıklar göstermiştir. Yapılan araştırmalar, deneylerde kullanılan liflere ve harç fazının bileşenleri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır. Bu konu üzerinde daha önce yapılmış olan çalışmalar ve elde edilen sonuçlardan bazıları tarih sırasına göre aşağıda değerlendirilmiştir:

Lankard ve Newell (1984), yaptığı araştırmalar sonucunda lifsiz, belli oranda lif içeren betonlar ve SIFCON için gerilme - şekil değiştirme grafiği çizmişlerdir. (Şekil 2.1.) Deneysel veriler sonucunda oluşturdukları bu grafiğe göre SIFCON'un enerji yutma kapasitesi ve eğilme mukavemetinin, lifsiz veya diğer lifli betonlara oranla hayli yüksek olduğu görülmektedir (Lankard and Newell 1984).



Şekil 2.1. Lif oranına göre gerilme - şekil değiştirme (Lankard and Newell 1984)

SIFCON betonlarında hacimce %20'den fazla lif katılması durumunda harç fazının lifleri saramadığı yapılan deneylerle gözlenmiştir. Harç ile aderans yapamayan bu lifler beton içinde boşluk gibi davranır. Naaman (1992), yaptığı çalışmalar sonucunda maksimum mukavemet değerlerine %9-%12 lif hacminde ulaşıldığını tespit etmiştir. Ayrıca Naaman (1992), çalışmalarında SIFCON için gerilme - şekil değiştirme eğrisi modellemeye çalışmıştır. Model olarak ürettiği bu grafik Şekil 2.2'de verilmiştir (Naaman 1992).

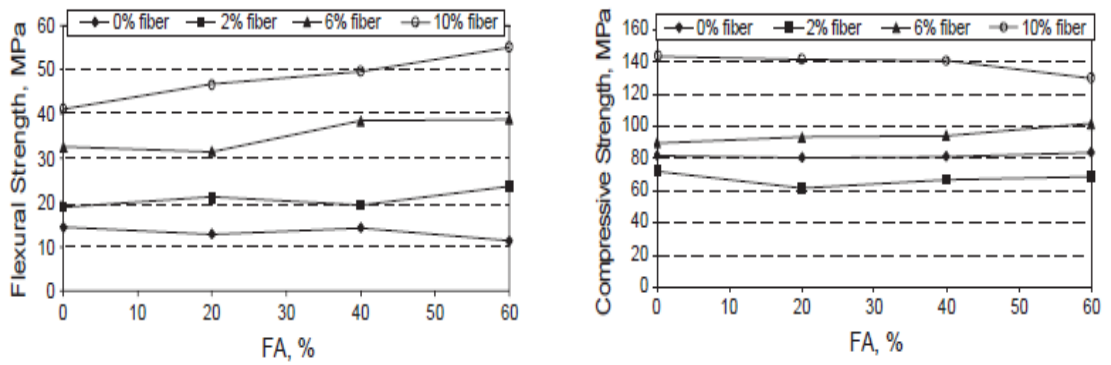


Şekil 2.2. SIFCON'un gerilme - şekil değiştirme davranışı (Naaman 1992)

Yazıcı vd (2006), çalışmalarında SIFCON harcı hazırlarken çimento yerine ağırlıkça, %0, %20, %40 ve %60'ı oranlarında uçucu kül kullanmışlardır. Çalışmada ayrıca hacimce %0, %2, %6 ve %10 oranında çelik lif kullanılmıştır ve tüm deney numunelerini 210°C sıcaklıkta, 2 MPa basınç altında 6 saatlik otoklav kürüne tabi tutulmuştur. İncelemeler sonucunda çimento dozajının %60'ı oranında uçucu kül kullanıldığı zaman ve hacimce %10 lif içeren örneklerin en iyi eğilme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ki harç fazının bileşenleri Çizelge 2.1'de, basınç ve eğilme sonuçları ise Şekil 2.3'de verilmiştir (Yazıcı *et al.* 2006).

**Çizelge 2.1.** SIFCON harcı bileşenleri özellikleri (Yazıcı *et al.* 2006)

Bileşen	FA0	FA20	FA40	FA60
Uçucu Kül (%)	0	20	40	60
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	800	640	480	320
Uçucu Kül (kg/m <sup>3</sup> )	0	160	320	480
Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	120	120	120	120
Su (kg/m <sup>3</sup> )	313	313	314	322
Bazalt (kg/m <sup>3</sup> )	600	562	524	486
0-1 mm kuvars (kg/m <sup>3</sup> )	160	150	140	130
0-100 µm kuvars (kg/m <sup>3</sup> )	160	150	140	130
Süper akışkanlaştırıcı (L/m <sup>3</sup> )	35	35	35	35
su/çimento	0,39	0,49	0,65	1,01
su/bağlayıcı	0,34	0,34	0,34	0,35
agrega/bağlayıcı	1,00	0,94	0,87	0,81
Mini-slump (mm)	330	330	330	330

**Şekil 2.3.** Farklı lif hacmi ve uçucu kül katkılı SIFCON'un eğilme - basınç dayanımı grafiği (Yazıcı *et al.* 2006)

Bulutlar, deneylerinde hacimce %5 ve %10 oranında normal ve yüksek mukavemetli çelik lifler kullanmıştır. Çalışma sonucunda %10 lif hacmi olan yüksek mukavemetli çelik liflerin, en iyi mukavemet özelliklerine sahip olduğu Çizelge 2.2'de gösterilmiştir (Bulutlar 2006).

**Çizelge 2.2.** Sertleşmiş beton özellikleri (Bulutlar 2006)

Numune Kodları	SİF0	SİFY5	SİFN5	SİFY10	SİFN10
Basınç Dayanımı (MPa)	61,70	105	118,40	133,20	136,80
Elastisite Modülü-E GPa	31,70	34,70	35,60	34,90	30,60
Yarmada Çekme Dayanımı MPa	7,40	13,10	12,90	16,20	14,80
Net Eğilme Dayanımı MPa	2,60	16,40	18,30	47,40	29,50
Kırılma Enerjisi (N/m)	15,50	8402	9757	30973	19248
Karakteristik Boy (mm)	9,10	1739	2061	4267	2675

Rao *et al.* (2010), hacimce %8 - %10 - %12 lif içeren SIFCON (S), yine aynı oranda lif içeren çelik donatılı SIFCON (SR), lifli beton (FR), donatısız beton (PCC) ve sadece donatılı beton (RCC) numuneleri üzerinde darbe çalışması yapmışlardır. Çalışmalarından elde ettikleri deneysel sonuçlar Çizelge 2.3'de gösterilmiştir. Bu tabloda hacimce %12 lif içeren donatılı SIFCON numunelerin darbeye karşı daha dirençli olduğu bir diğer ifadeyle tokluk değerlerinin daha yüksek olduğu ve basınç mukavemetlerinin daha iyi olduğu belirtilmiştir (Rao *et al.* 2010).

**Çizelge 2.3.** Farklı lif oranlı betonların basınç ve darbe değerleri (Rao *et al.* 2010)

Numune	İlk Çatlağın Oluştuğu Darbe Sayısı	Dağılmanın Olduğu Darbe Sayısı	28 Günlük Küp Basınç Dayanımı (MPa)
S-8	7516	40700	44,93
S-10	13750	67466	51,57
S-12	26950	82133	54,77
SR-8	94600	162800	44,93
SR-10	111100	192500	51,57
SR-12	137500	242200	54,77
FR-2	213	40150	32,00
RCC	27	11550	20,10
PCC	-	10	20,10

Farnam *et al.* (2010), %2 lif içeren beton, %5 ve %10 lif içeren SIFCON üretmişlerdir. Ürettikleri numunelere, 3 boyutlu basınç cihazında 0 MPa, 5 MPa, 15MPa ve 21,5MPa'lık yanal kuvvetler uygulayarak bu numunelerin tokluk indeksleri, eksenel gerilmeleri ve poisson oranı ile ilgili incelemeler yapmışlardır. Araştırmaları sonucunda tokluk indeksleri verileri Çizelge 2.4'de, eksenel gerilmeler ve poisson oranı ise Çizelge 2.5'de görülmektedir. Bu tablolar incelenirse %10 lif içeren SIFCON'un diğerlerine oranla daha iyi mekanik özellikler gösterdiği söylenebilir (Farnam *et al.* 2010).

**Çizelge 2.4.** Eksenel gerilmeler ve poisson oranı değerleri (Farnam *et al.* 2010).

Numune	Yanal kuvvet (MPa)	Elastisite modülü E (GPa)	Poisson oranı ( $\nu$ )	Eksenel gerilme (MPa)
HSC ( $V_f = 0\%$ )	0	17,30	0,20	76
	5	19,90	0,22	93
	15	21,40	0,21	126
	21,5	20,90	0,19	151
HPFRC ( $V_f = 2\%$ )	0	18,70	0,23	87
	5	20,50	0,20	123
	15	20,00	0,21	147

Çizelge 2.4. (devam)

	21,5	19,90	0,21	160
SIFCON5 ( $V_f = 5\%$ )	0	20,20	0,24	146
	5	20,90	0,24	181
	15	21,20	0,26	207
	21,5	22,10	0,23	216
	0	18,20	0,29	171
SIFCON10 ( $V_f = 10\%$ )	5	18,50	0,28	191
	15	20,90	0,26	229
	21,5	19,80	0,25	242

Çizelge 2.5. Tokluk indeksi verileri (Farnam *et al.* 2010)

Numune	Yanal kuvvet (MPa)	$\epsilon_{cr}$ (%)	TI <sub>1</sub>	TI <sub>3</sub>	TI <sub>5</sub>
HSC ( $V_f = 0\%$ )	0	0,30	1,00	-	-
	5	0,41	1,90	10,0	17,10
	15	0,46	2,40	14,60	25,70
	21,5	0,65	4,80	23,60	38,20
HPFRC ( $V_f = 2\%$ )	0	0,36	1,50	8,90	15,30
	5	0,55	3,90	18,50	30,10
	15	0,65	4,80	27,00	46,90
	21,5	0,64	4,60	27,20	51,10
SIFCON5 ( $V_f = 5\%$ )	0	0,56	4,10	23,60	-
	5	0,65	5,50	31,60	60,80
	15	0,69	5,60	34,30	67,50
	21,5	0,74	6,70	40,80	77,80
SIFCON10 ( $V_f = 10\%$ )	0	0,71	5,90	32,50	62,90
	5	0,68	5,40	32,60	64,10
	15	0,72	5,90	35,70	71,50
	21,5	0,73	6,10	36,00	72,00

Tuyan ve Yazıcı (2012), kancalı ve düz çelik lifler kullanarak, SIFCON harcının bu liflerle aderansını ve nihai mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışma sonucunda kancalı liflerin harç fazına daha iyi tutunduklarını ve bu sayede daha iyi mekanik performans gösterdiklerini gözlemlemiştir. Bu çalışmada ayrıca liflerin harca saplanma boylarına göre oluşan mukavemet değişikliklerini de incelemiştir. Yaptıkları deneylerin sonucu Çizelge 2.6'da verilmiştir (Tuyan and Yazıcı 2012).

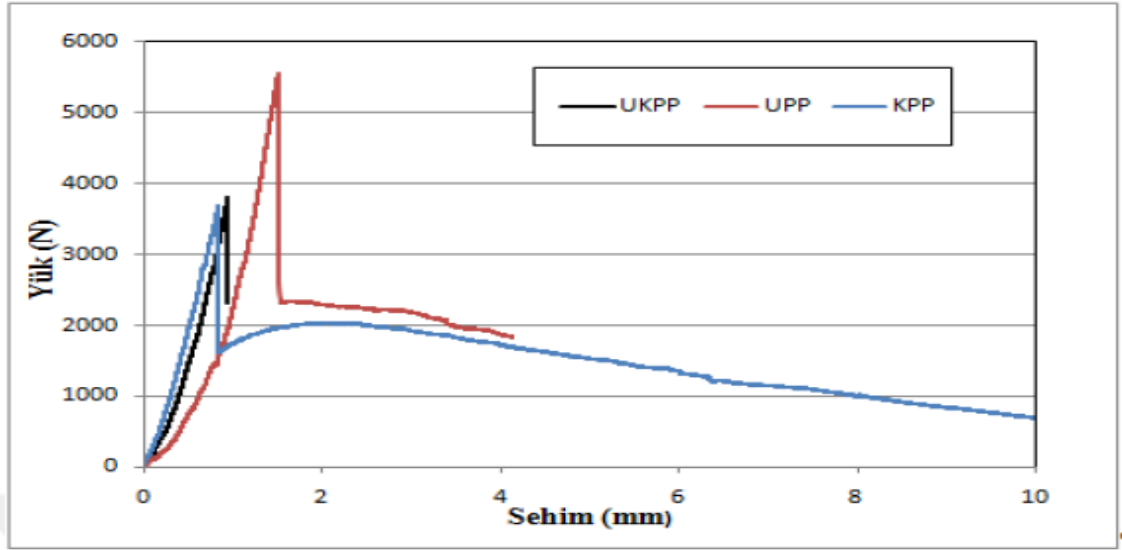
**Çizelge 2.6.** Lif geometrinin ve saplanma boyunun mukavemet değerlerine etkisi (Tuyan and Yazıcı 2012)

Uzunluk (mm)	Maksimum Yükleme (N)		Tokluk (Nmm)	
	Kanca uçlu lif	Düz lif	Kanca uçlu lif	Düz lif
10	374	105	1260	614
20	434	114	2192	920
30	472	189	2873	2003

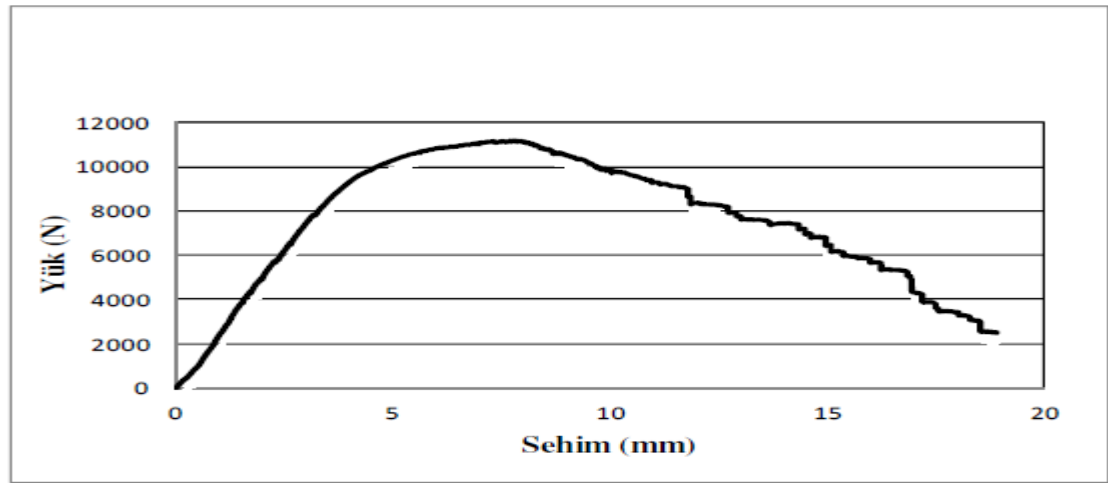
İpek vd (2014), çalışmasında lif olarak dalgalı çelik lif, uzun polipropilen ve kısa polipropilen kullanmıştır. Ayrıca bu lif türlerini belli oranda kullanarak hibrit olarak da SIFCON numuneler üretmiş ve bunları ŞAHİT adlı ucu kancalı çelik liflerle mukayese etmiştir. Yaptığı çalışmalarında elde ettiği sonuçlara göre, eğilme ve basınç dayanımının en yüksek olduğu değerlerin dalgalı çelik lif ve kancalı lif kullanılan numuneler olduğu (Çizelge 2.7.) görülmüştür. Gerilme - şekil değiştirme grafikleri incelendiği zaman, dalgalı çelik lif ve uzun polipropilen liflerin oldukça fazla miktarda şekil değişiminden sonra kırıldığı fark edilmiştir. Yük - sehim grafikleri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de verilmiştir (İpek *et al.* 2014).

**Çizelge 2.7.** Eğilme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi (İpek *et al.* 2014)

Numune Adı	Basınç Dayanımı MPa	Eğilme Dayanımı MPa
ŞAHİT	134,83	31,47
DÇ	141,29	32,95
DÇUPP	110,38	19,21
UPP	108,73	15,60
KPP	55,91	10,35
UKPP	59,43	10,71



Şekil 2.4. Polipropilen liflerin yük - sehim grafiği (İpek *et al.* 2014)

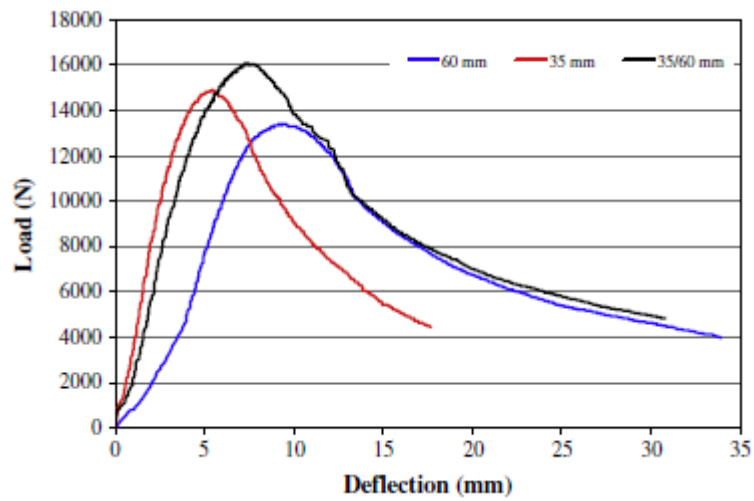


Şekil 2.5. Dalgalı çelik liflerin yük - sehim grafiği (İpek *et al.* 2014)

İpek vd (2014), yaptıkları bir diğer çalışmada 35 mm ve 60 mm uzunluğunda ki çelik lifleri tekil veya hibrit halde SIFCON'da kullanmışlardır. Oluşturdukları SIFCON numunelerin gerilme - şekil değiştirme grafiğini çizmişlerdir. Şekil 2.6'da verilen bu eğriye göre 60 mm uzunluğunda ki liflerle oluşan numunelerin şekil değiştirme kapasitesi daha yüksek iken, 35 mm ve 60 mm liflerin hibrit hali ile üretilen numunelerde ki maksimum gerilme kapasitesinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



İpek vd (2014), bu çalışmada ayrıca ön gerilmeli SIFCON numuneler üretmiş ve diğer gruplarla karşılaştırmışlardır. Oluşturdukları taze beton halinde olan numuneleri 24 saatlik süreçte 3 MPa, 6 MPa, 9 MPa, 12 MPa ve 15 MPa'lık gerilmeye tabi tutmuşlardır. Çizelge 2.8'de verilen deneysel sonuçlara göre 15 MPa'lık ön gerilmeye maruz kalan SIFCON'da en iyi mekanik sonuçlara varıldığı rapor edilmiştir (İpek *et al.* 2014).

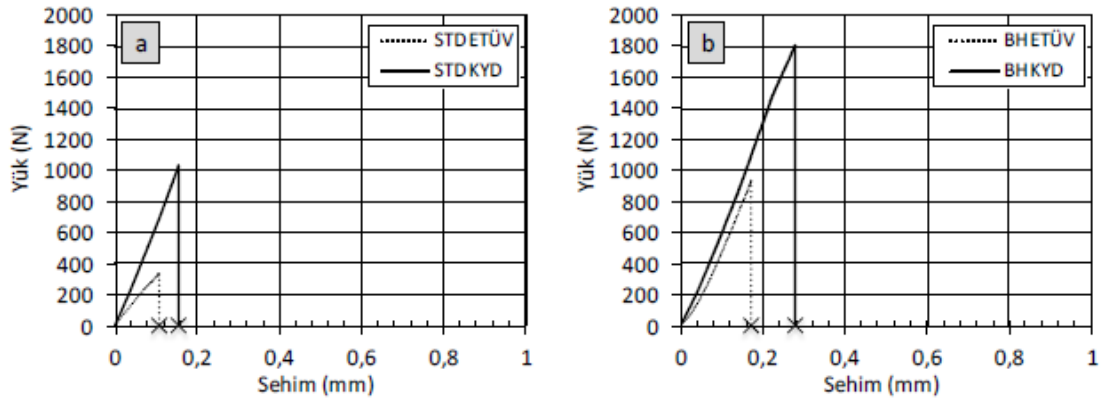


**Şekil 2.6.** Farklı boyda ki ve hibrit liflerin gerilme - şekil değiştirme eğrisi (İpek *et al.* 2014).

**Çizelge 2.8.** Ön gerilmeli SIFCON'un mukavemet özellikleri (İpek *et al.* 2014).

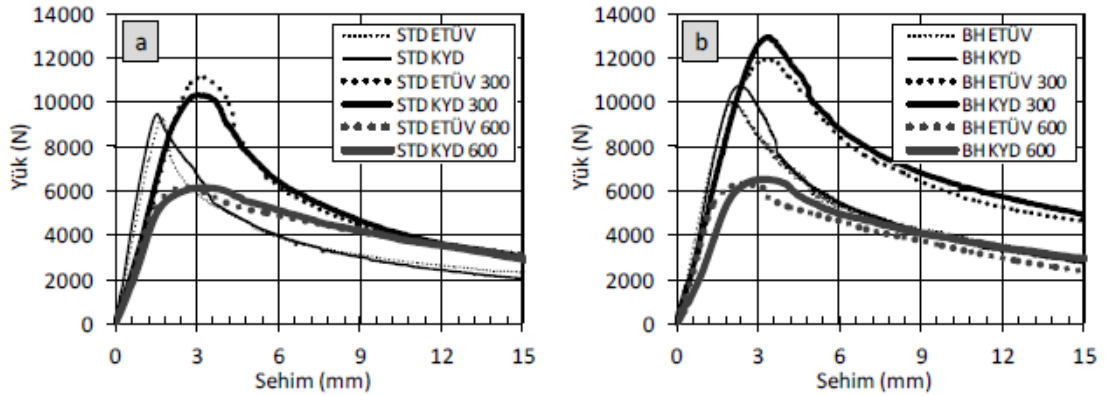
Ön Gerilme (MPa)	Kırılma Mukavemeti (MPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Tokluk (Nm)
Cntrl	42,65	47,06	353,72
3	39,38	55,81	457,08
6	44,63	58,00	516,96
9	45,31	60,26	448,79
12	45,17	63,41	451,30
15	57,61	67,54	402,32

Beglarigale *et al.* (2016), çimento yerine kütlece %50 oranında yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Lif hacmini %20 olarak belirlemiş ve lifleri kalıplara yönlendirerek doldurmuşlardır. SIFCON örnekleri su ve buhar kürüne bırakmıştır. Sertleşen SIFCON örneklerine 0°C, 300°C ve 600°C sıcaklık uyguladıktan sonra, bu numunelere kuru veya KYD halde deneyler yapılmıştır. Kontrol numunesi için su ve buhar kürü ile lifsiz olarak üretilen beton için çizilen gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 2.7'de verilmiştir. Yapılan araştırmada su ve buhar kürü ile 0°C - 300°C - 600°C lik farklı sıcaklık şeklinde ki parametreler için gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Gözlemlerine göre buhar kürü uygulanan numunelerin, su kürü uygulananlara göre daha iyi mekanik performans gösterdiğini belirtmişleridir. Ayrıca SIFCON'un lifsiz betona oranla çok üstün bir biçimde yüksek sıcaklık direncine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Sıcaklık deneylerinde ise 300°C sıcaklığa bırakılan numunelerin 600°C'e maruz kalanlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişler, buna gerekçe olarak 600°C'de çimentonun CSH yapısının bozulması olduğu yorumunu yapmışlardır (Beglarigale *et al.* 2016).



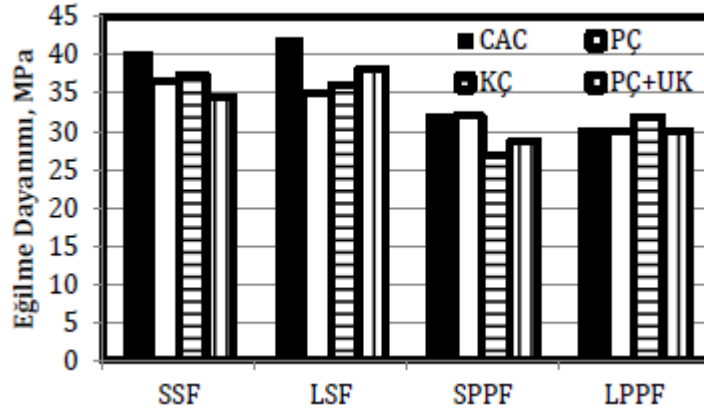
**Şekil 2.7.** Yük - sehim grafiği

a) su kürü b) buhar kürü (Beglarigale *et al.* 2016)

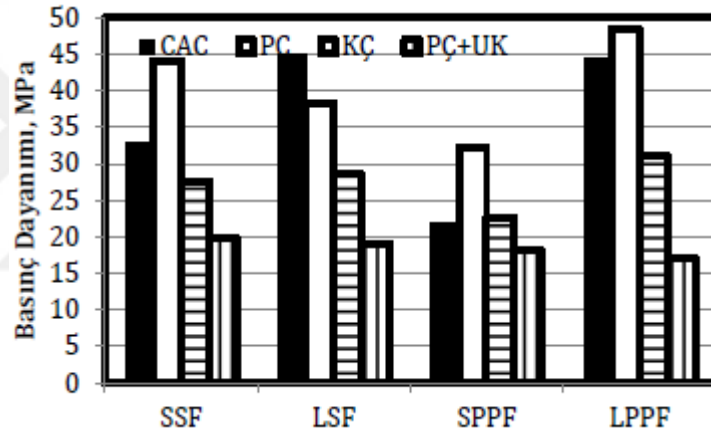


**Şekil 2.8.** SIFCON için farklı sıcaklıkta yük - sehim grafiği  
a) su kürü b) buhar kürü (Beglarigale *et al.* 2016)

Canbaz ve Ünüvar (2016), yaptıkları araştırmalarda farklı lif ve çimento türlerinin SIFCON özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneylerinde Portland çimentosu (PÇ), trans katkısı içeren puzolonik çimento (KÇ), kalsiyum alüminatlı çimento (CAC) ve Portland çimentosuna katılan uçucu küllü çimento (PÇ+UÇ) kullanmışlardır. Bununla beraber uzun ve kısa olmak üzere 2 çeşit çelik ve polipropilen lif kullanmışlardır. Elde ettikleri verilere göre makro çelik lifli numuneler mikro çelik liflere oranla daha iyi eğilme dayanımı gösterirken, polipropilen liflerde fazla değişme olmadığı Şekil 2.9'da görülmektedir. Yine bu tabloda CAC'lı beton türünün eğilme mukavemetinin diğer çimento türlerine göre daha iyi performanslı olduğu söylenebilir. Şekil 2.10'da ise yapılan deneyler sonucunda oluşan basınç dayanımları verilmiştir. Burada da yine uzun çelik ve polipropilen liflerde yüksek dayanımlara ulaşıldığı görülmüştür (Canbaz and Ünüvar 2016).

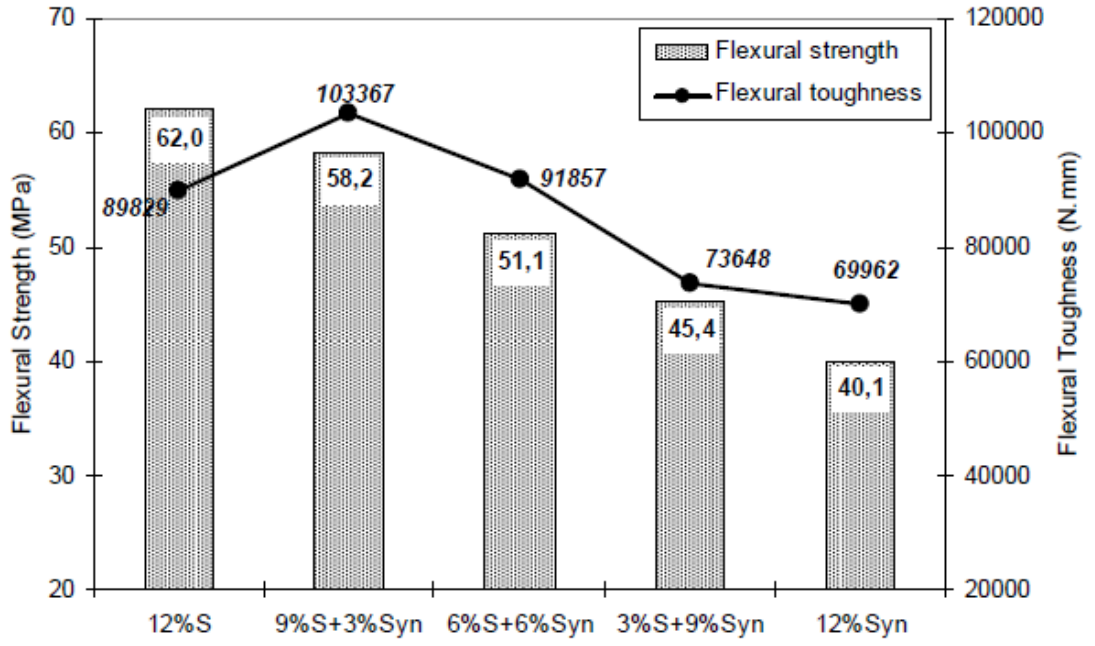


Şekil 2.9. Eğilme dayanımına ile çimento - lif türünün etkisi (Canbaz and Ünüvar 2016)



Şekil 2.10. Basınç dayanımına ile çimento - lif türünün etkisi (Canbaz and Ünüvar 2016)

Yardımcı vd (2016), deneylerinde çelik ve sentetik lifleri tekli veya hibrit halde, %12 lif içeriğine sahip olacak şekilde kullanmışlardır. Ayrıca deney için üretilen SIFCON'a 80°C'de 24 saat boyunca düşük basınçlı buhar kürü uygulamışlardır. Ürettikleri numuneleri eğilme mukavemeti ve eğilme tokluğu açısından incelemişlerdir. Şekil 2.11'de verilen değerlere göre %12 çelik lif içeren SIFCON'un en yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu görülürken, %9 çelik %3 sentetik lif içeren SIFCON'un en yüksek eğilme tokluğu değerine sahip olduğu görülmüştür (Yardımcı *et al.* 2016).



**Şekil 2.11.** Tekil veya hibrit lifli SIFCON'un eğilme mukavemeti ve tokluğu (Yardımcı *et al.* 2016)

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler, numunelerin üretim şekli, karışım hesabı ve deneylerin yapıldığı cihazlar anlatılmıştır.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Çimento

Deneyler esnasında kullanılan çimento, TS EN 197-1:2012 (EN 2012) standartlarına uygun olan bir Portland çimentosu türüdür. Bu çimento Aşkale Çimento'dan tedarik edilmiş olup CEM I 42,5 R sınıfıdır. Bu çimento türünün kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firmadan alınmış ve Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** CEM I 42,5 R tipi çimento, silis dumanı ve uçucu külün kimyasal özellikleri

Bileşen (%)	Çimento	Silis Dumanı	Uçucu Kül
CaO	63,65	0,50	20,47
SiO <sub>2</sub>	18,10	96	47,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,48	0,70	20,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,09	0,25	4,15
MgO	2,50	0,60	1,51
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,25	0,59
K <sub>2</sub> O	0,62	0,85	1,36
SO <sub>3</sub>	2,84	0,50	2,08
Kızdırma Kaybı	3,90	1,50	0,97
Serbest CaO	0,44	-	-

**Çizelge 3.2.** CEM I 42,5 R tipi çimento, silis dumanı ve uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler		Çimentonun Basınç Dayanımı (MPa)
<b>Çimento</b>		<b>3 günlük</b>
Özgül Yüzey(cm <sup>2</sup> /g)	3690	27,90
Özgül Ağırlık	3,12	
<b>Silis Dumanı</b>		<b>7 günlük</b>
Özgül Yüzey(cm <sup>2</sup> /g)	210400	44,80
Özgül Ağırlık	2,20	
<b>Uçucu Kül</b>		<b>28 günlük</b>
Özgül Yüzey(cm <sup>2</sup> /g)	2986	58,00
Özgül Ağırlık	2,20	

### 3.1.2. Silis dumanı

Silis dumanı, elektrik ark fırınlarında kuvarsin silikona indirgenmesi veya silisyum imalatı sırasında oluşan, minimum %93 silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) içeren maksimum tane boyutu 0.5 µm olan bir malzemedir. Silis dumanı, sahip olduğu incelik sayesinde betonda ki boşluk miktarını azaltır ve bunun yanı sıra çimento hidratasyonu sonucu oluşan betonda ki bir boşluk türü olan CH (Portlandit) ile tepkimeye girerek CSH moleküllerini oluşturur. CSH'ın betona dayanımını veren molekül yapısı olduğu göz önüne alınırsa, oluşan bu ekstra CSH yapısı betonun mukavemetine olumlu katkıda bulunur (Atiş *et al.* 2005).

Deneylerde kullanılan silis dumanının tamamı Dost Kimya'dan temin edilmiş ve . fiziksel ve kimyasal özellikleri bu firmadan temin edilerek Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

### 3.1.3. Uçucu kül

Uçucu kül, kömür madenlerinde yakılan kömürden çıkan atıkların elektro filtreler ile tutulması ile elde edilen bir maddedir. Bu malzeme koyu gri renkte ve çok ufak tanelidir (Aruntaş 2006). Silis dumanı gibi, uçucu külü de oluşturan temel yapı  $\text{SiO}_2$  olduğundan, betona etkisi silis dumanına benzerdir. Uçucu kül kimyasal ve fiziksel yapısı sebebi ile beton üretiminde sıklıkla kullanılan bir mineral katkıdır. SIFCON'da ince taneli ve yüksek özellikli bir beton olduğundan, çalışmalarda uçucu kül kullanılmıştır.

Deneyleerde kullanılan uçucu kül, Ares Çimento tarafından Orhaneli Termik Santralin'den temin edilmiş olup (ASTM 2003)'e göre F sınıfı uçucu küldür. Kullanılan malzemenin yoğunluğu  $2.2 \text{ gr/cm}^3$ , en büyük tane boyutu  $100 \mu\text{m}$ 'dir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Ares Çimento'dan alınarak Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

### 3.1.4. Kuvars kumu

Kuvars kumu, dünyada en çok bulunan minerallerinden biri olan kuvars taşının istenilen boyutlara göre öğütülmesi ile oluşur. Kuvars %99 oranında silis içeren yüksek saflığa sahip bir mineraldir. Normal betonlarda kullanılan agregalara nazaran kuvars kumlarının  $180 \text{ MPa}$ 'a kadar varan daha yüksek basınç dayanımları, sertlik derecesinin fazlalığı ve yüksek aşınma dirençleri sebebiyle yüksek performanslı betonlarda agrega olarak sıklıkla kullanıldığından bu çalışmada da kuvars kumu tercih edilmiştir.

Deneyleerde kullanılan kuvars kumu, SIFCON üretiminde ki en büyük tane boyuna sahip olan malzemedir. Tane boyutu  $100\text{-}400 \mu\text{m}$ , yoğunluğu ise  $2,65 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Kullanılan kuvars kumu elek analizi Çizelge 3.3'de verilmiştir.



**Çizelge 3.3.** Kuvars kumu elek analizi

<b>Tane Boyutu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Elekten Geçen %</b>
1	0,10
2	0,34
3	0,41
4	0,59
5	0,86
10	1,20
20	1,53
30	1,78
40	1,95
60	2,91
80	5,47
90	8,62
100	10,46
200	38,45
300	72,60
400	97,20
500	100

### 3.1.5. Lif

Deneyleerde çelik ve elyaf olmak üzere 2 çeşit lif kullanılmıştır.

#### 3.1.5.a. Çelik lif

SIFCON numunelerin basınç, eğilme ve tokluk gibi mekanik özelliklerini iyileştirmek için kanca uçlu, pürüzsüz yüzeyli çelik lifler kullanılmıştır (Şekil3.1). Atlas1 firmasından temin edilen liflerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Çelik lifler

**Çizelge 3.4.** Çelik liflerin fiziksel özellikleri

Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik (l/d)	Çekme Dayanımı (MPa)
35	0,70	50	1100

### 3.1.5.b. Elyaf lif

Deneyde kullanılan elyaf lifler mikro boyuttadır ve polipropilen yapıdadır (Şekil 3.2). Üretilen örneklerin eğilme, enerji yutma kapasitesini ve basınç değerlerini arttırmak için bu lifler ilave edilmiştir. Bunun yanı sıra elyaf lif, betonda segregasyonu ve alkali reaksiyonlarını azaltır. Donatı korozyonu açısından çelik liflere oranla daha dayanıklıdır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'de verilen elyaf lifler Atlas1 firmasından temin edilmiştir.



**Şekil 3.2.** Elyaf lif

**Çizelge 3.5.** Elyaf liflerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Boy (mm)	Kesit	Çap ( $\mu\text{m}$ )	Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Erime Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	Yanma Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )
19	Dairesel	18 - 20	0,91	450 - 700	3000-3500	162	593

### 3.1.6. Kimyasal katkı

Deneyle esnasında istenilen işlenebilirliği elde etmek için, hiper akışkanlaştırıcı özelliği olan Daracem 200 kullanılmıştır. Bu katkı maddesi polinaftalin sülfatlarından üretilmiştir.

### 3.1.7. Su

Deneylede, içilebilir nitelikte olan Atatürk Üniversitesi kuyu suyu kullanılmıştır.

### 3.2. Numunelerin Üretim Şekli

SIFCON fazla miktarda ki lif içeriği, harç fazında kullanılan malzemelerin inceliği ve mineral katkıların çokluğundan ötürü normal betonlardan daha farklı bir biçimde üretilir.

Numuneler üretilirken öncelikle kullanılacak kalıplar temizlenmiş ve söküm aşamasında sorun yaşanmaması için kalıpların iç yüzeyleri yağlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan küp kalıpların boyutu 15 cm x 15 cm x 15 cm, prizma kalıplar ise 7 cm x 7 cm x 28 cm'dir. Çelik lifli olarak üretilecek SIFCON numuneler de küp kalıplarda 2,65 kg, prizma kalıplarda ise 1,07 kg çelik lif kullanılması gerektiği hesaplanmıştır. Elyaf lifli olarak üretilen SIFCON numunelerde ise küp kalıplar için 303,75 gr, prizma kalıplarda da 123,48 gr elyaf lif konulması durumunda hacimce %10 lif içeriğini sağladığı hesaplanmıştır.

Harç hazırlanırken izlenen yöntem kısaca şöyle özetlenebilir. Sadece çimentonun bağlayıcı olarak kullanıldığı yani mineral katkıların olmadığı gruplarda, öncelikle hesaplanan çimento ve su 5 dakika boyunca 800 devir / dakika özelliğine sahip mikserde karıştırılmıştır. Ardından gerekli olan kuvars kumu kademeli olarak çalışmakta olan mikserde eklenmiştir. Tüm kuvars kumunun eklenmesinin ardından tüm karışım 5 dakika daha karıştırıldıktan sonra döküm işlemine başlanmıştır. Mineral katkıların olduğu gruplarda ise gerekli olan çimento ve mineral katkı mikserde kuru halde katılarak 2 dakika boyunca mikserde karıştırılmıştır. Ardından gerekli olan su kuru halde bulunan mikserde dahil edilip 5 dakika boyunca karıştırılma işlemine devam edilmiştir. Kuvars kumu aşamalı olarak mikserde dökülmüş ve tamamının dökülmesi ile beraber tüm karışım 5 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Harç hazırlanırken yapılan karıştırma işlemlerinin süreleri, hazır beton üretiminde uygulanan karıştırma sürelerine göre belirlenmiştir. Karıştırma işleminin sonlanmasından sonra döküm işlemine başlanmıştır (Şekil 3.3.). Kimyasal katkı maddesi, bağlayıcı dozajının %2'si miktarında alındıktan sonra her grup için hesaplanan suya ilave edilmiştir.

Çelik ve elyaf lifli SIFCON numuneler oluşturulurken liflerin iyice dağılması ve kalıbın her yerine homojen bir biçimde dağılması için, döküm işlemi üç aşamalı olarak yapılmıştır. Üç aşamalı olarak yapılan döküm işlemi, daha önceden üretilen deneme numunelerde en iyi sonucu verdiği için seçilmiştir. İlk önce kalıbın altına üçte biri kadar harç doldurulmuş ve lifin üçte biri katılmıştır. Harcın liflerin arasına iyice yerleşmesi için 1 dakika elle sarsma yapılarak yerleştirme sağlanmıştır. Elle sarsma yöntemi ön deneylerde karşılaşılan yerleşme problemini daha iyi çözdüğü için tercih edilmiştir. Kalan diğer üçte birlik hacimler içinde aynı işlemler tekrarlanmış ve kalıplar doldurulmuştur. Bu uygulama tüm lif türleri ve her kalıp için yapılmıştır (Şekil 3.4).

SIFCON harcının akışkan olması sebebi ile dökümden sonra herhangi bir yüzey düzeltme işlemine gerek kalmamıştır. Hazırlanan SIFCON örnekleri 1 gün kalıplarda mukavemet kazanmaları ve kendilerini tutmaları için bekletilmiştir. Numunelerin kalıptan sökülmesinin ardından, kirece doygun halde bulunan sıcaklığı 18-22°C arasındaki kür havuzuna konulmuştur (Şekil 3.5). 28. gün boyunca tüm numuneler uygun ortamda ki havuzda kür edilmiştir.



**Şekil 3.3.** SIFCON dökümü



Şekil 3.4. Aşamalı döküm



Şekil 3.5. Kür havuzunda ki numuneler

### 3.3. Deney Gruplarının Oluşturulması

Karışımda kullanılan mineral katkılardan biri olan silis dumanı, betona kütlece maksimum %15 oranında katılabilmektedir ve bu orandan fazlası betonda olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Bu sebeple bu aralıkta ki (%5, %10, %15) üç farklı yüzde silis dumanı karışıma katılmıştır (Demir 2009). Uçucu külün betona katılım oranı ile ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde, normal betonlarda kütlece %30 oranında katılan uçucu kül optimum değerken, özel betonlarda kütlece %60'a kadar betona katılabileceği görülmüştür (Bouzoubaa and Lachemi 2001). Bu çalışmada, bu aralığa uygun olacak şekilde (%20, %40, %60) üç farklı yüzde uçucu kül kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada her grup için 3 küp, 3 prizma numune hazırlanmıştır. Küp numunelerde basınç dayanımları belirlenmiş ve gerilme - şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Prizma numunelerde eğilme dayanımı belirlenmiştir. Çelik lifli ve elyaf lifli SIFCON gruplarının dökümü bittikten sonra, mineral katkılı ve lifli olarak hazırlanan SIFCON'un performans artışını gözlemlemek ve mukayese etmek için mineral katkılı ve lifsiz harçlar da hazırlanmıştır. Bu çalışma boyunca 63 küp, 63 prizma olmak üzere toplam 126 numune üretilmiştir. Çalışmalarda hazırlanan beton harcı karışım oranı, Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

### 3.4. Numunelerin Kodlanması

Deneyler esnasında 8 grup oluşturulmuştur. Bu gruplarından ilki olan CNTRL, lifsiz ve mineral katkısız (silis dumanı ve uçucu kül içermeyen) olarak üretilen harçtır. CNTRL - SIF ise mineral katkısız, %10 lif içeren numunelerdir. Çimento yerine, çimento dozajının %5, %10 ve %15'i kadar silis dumanı kullanılan gruplar sırası ile SF5, SF10 ve SF15 şeklinde isimlendirilmiştir. Çimento yerine çimento dozajının %20, %40 ve %60'ı oranında uçucu kül katılan gruplar ise FA20, FA40 ve FA60 şeklinde isimlendirilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Beton harcı karışım oranları (1 m<sup>3</sup> betona göre)

	CNTRL	CNTRL-SIF	SF5	SF10	SF15	FA20	FA40	FA60
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	760	720	680	640	480	320
Su (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	320	320	320	320	320	320
Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	40	80	120	0	0	0
Uçucu Kül (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	160	320	480
Kuvars Kumu (kg/m <sup>3</sup> )	1083	1083	1072	1056	1043	1029	972	915
Katkı (kg/m <sup>3</sup> )	16	16	16	16	16	16	16	16
su/bağlayıcı	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

### 3.5. Deneylerin Yapıldığı Cihazlar

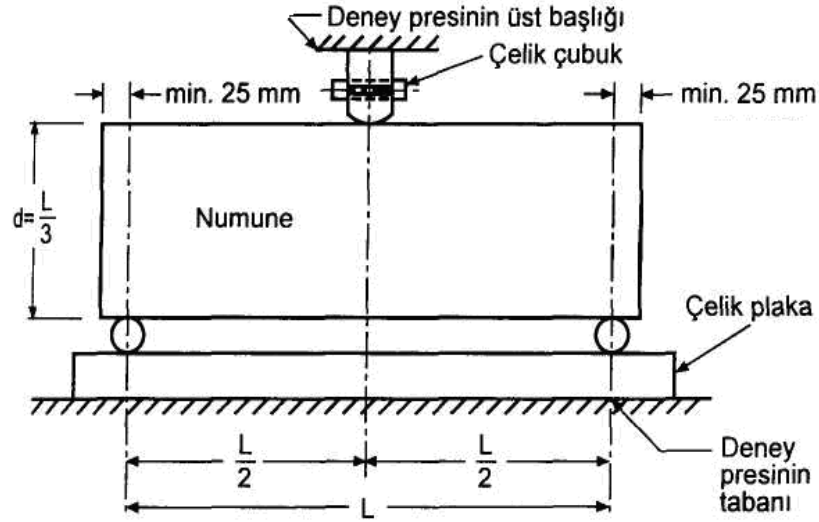
#### 3.5.1. Eğilme Dayanımı Hesaplanması

Hazırlanan SIFCON numunelerin, eğilme dayanımını bulmak için TS EN 12390-5 (EN 2009)'e göre eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyin çalışma prensibi, normal betonların eğilme mukavemetinin hesabı ile aynıdır. Deney sistemi ile ilgili teknik bilgiler ve gereken hesaplamalar aşağıda açıklanmıştır.

SIFCON'un eğilme dayanımını hesaplamak için prizma numuneler üretilmiştir. Hazırlanan prizmalara Şekil 3.6'da görüldüğü gibi tek noktadan yükleme yapılmıştır. Sağlıklı sonuçlar almak için kirişlerin tam ortasından yüklenmesine dikkat edilmiştir. Dakikada 5 kg-f/cm<sup>2</sup> (50 N/cm<sup>2</sup>) olarak ayarlanmıştır. Numune kırıldıktan sonra



elektronik ekrandan ölçülen kuvvet değeri Denklem 3.1'de yerine konularak eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Deney cihazı ve yükleme durumu Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan eğilme cihazı yükleme durumu

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1.)$$



Şekil 3.7. Eğilme cihazı ve yükleme durumu

### 3.5.2. Basınç dayanımı ve tokluk değeri hesabı

Betonun basınç değeri, TS EN 12390-3 (En 2003)'e göre standartlara uygun olarak yapılmıştır. SIFCON'un basınç dayanımını bulmak için küp numuneler kullanılmıştır. Bu küp numuneler Şekil 3.8'de gösterildiği gibi deney cihazına yerleştirilmiş ve 0,5 MPa/s hızında yükleme işlemine tabi tutuldu. Gözlenen maksimum kuvvet Denklem 3.2'de yerine koyularak numunelerin basınç dayanımı hesaplandı.

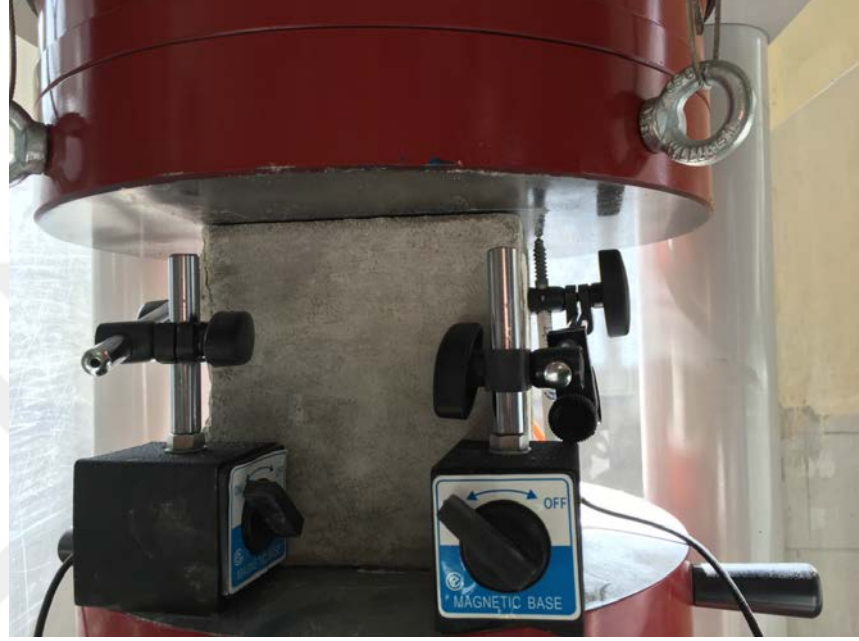
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.2.)$$



**Şekil 3.8.** Basınç cihazı yükleme durumu

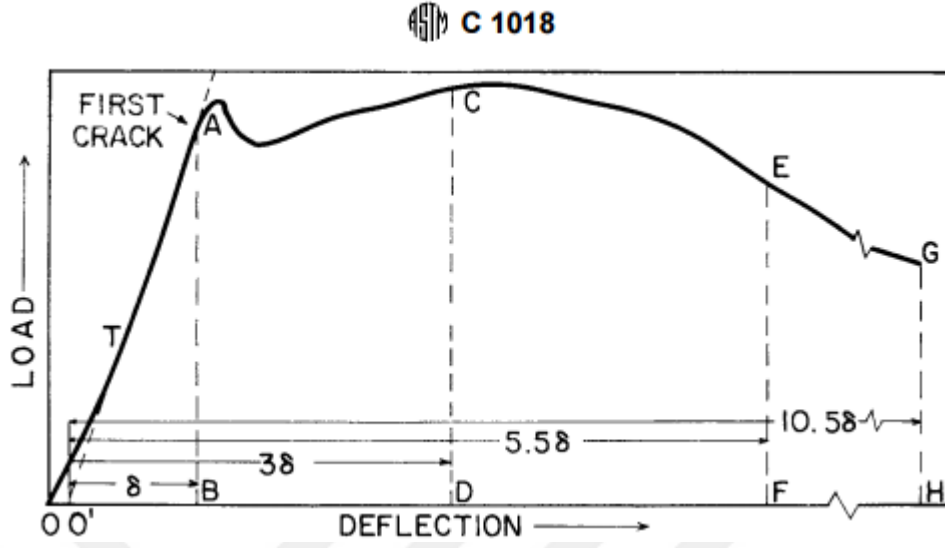
Tokluk değerinin hesabı için de yine aynı cihaz kullanılmıştır. Küp numunenin her iki tarafına konulan LVDT'ler (Şekil 3.9) vasıtası ile yükleme başından kırılma anına kadar,

belirli bir gerilmeye karşı yapılan deformasyon ölçülmüş ve elde edilen bu verilerle  $\sigma - \epsilon$  eğrisi çizilmiştir. Bu eğrinin altında kalan alanın hesaplanması ile tokluk değeri N.m cinsinden bulunmuştur.



**Şekil 3.9.** Küp numunenin iki yanına konulan LVDT'ler

Tokluk bir malzemenin kırılmadan önce yuttuğu enerji miktarıdır ve ASTM C 1018 (ASTM 1998)'e göre bir malzemenin tokluğu yük - sehim (şekil değiştirme) grafiğinde altta kalan alan olarak ifade edilir. Bu grafik, malzemenin gevrekliğine veya sünekliğine göre değişkenlik gösterir. Gevrek malzemelerde kırılma ani bir şekilde olur yani şekil değiştirme kapasiteleri düşüktür. Sünek malzemelerde ise kırılma anına kadar şekil değiştirme kapasitesi fazla olduğu için bu malzemelerin toklukları fazladır. ASTM C 1018 lifli betonların yük - sehim grafiği Şekil 3.9'da verilmiş olup, burada A noktası ilk çatlak noktası, G noktası ise tamamen kırılma bölgesidir. Bu grafiğe bakıldığı zaman betona katılan lifler sayesinde betonun şekil değiştirme kapasitesinin ve bu bağlı olarak sünekliğinin arttığı görülmektedir.



**Şekil 3.10.** ASTM C 1018 lifli betonun yük - sehim grafiği

Yapılan çalışmada, deney cihazı bilgisayar ortamında yük - sehim grafiği oluşturmuştur. Bu grafik Excel programına atılmış ve altında kalan alanın hesabı bu program yardımıyla yapılmıştır. Hesaplanan bu alan bize deneye tabi tutulan numunenin tokluğunu vermiştir.

### 3.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Bu cihaz, elektron ışını katı bir cisme göndererek katı cisimden yansıyan elektronlarla cismin iç yapısını gösterme prensibi ile çalışır. Bu çalışmada SEM kullanılmasının sebebi, katılan mineral katkıların betonun CSH yapısını nasıl etkilediğini gözlemlemek ve katılan liflerin beton harcı ile yaptığı ara yüzey bağını incelemektir.

SEM görüntüleri için Atatürk Üniversitesi bünyesinde bulunan Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'inden teknik destek alınmıştır. Görüntü almak için kullanılan Zeiss Gemini SEM cihazı Şekil 3.10'da görülmektedir. Bu cihazın görüntü alabildiği voltaj değeri aralığı 0,2-30 kV'dır.

Deneyde ki lifsiz numuneleri oluştururken kullanılan malzemelerin inceliğinin fazla olması ve katkı miktarının çokluğu sebebi ile 5 - 15 kV aralığında en iyi görüntüler elde edilirken, SIFCON numunelerde ise liflerin betonla birleşim yerlerini görüntülemek için 5 - 10 kV aralığında en iyi görüntüler alınmıştır (Kırgız 2004).



**şekil 3.11.** SEM cihazı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ve değerlendirilmesi sunulmuştur. Farklı lif ve mineral katkılı SIFCON'un basınç, eğilme ve tokluk değerleri tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Bununla beraber numunelerden alınan SEM resimleri de bu bölümde gösterilmiştir.

##### 4.1. Basınç Dayanımı

Basınç değerlerini hesaplamak için üretilen 15 cm'lik küp numunelerde her grubun lifsiz hali yani CNTRL, CNTRL - SF5, CNTRL - SF10, CNTRL - SF15, CNTRL - FA20, CNTRL - FA40 ve CNTRL - FA60 numuneleri kullanılmış, sonuçları ise Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu grupların çelik lif içeren SIFCON grupları CNTRL - SIF, SIF - SF5, SIF - SF10, SIF - SF15, SIF - FA20, SIF - FA40 ve SIF - FA60 değerleri Çizelge 4.2'de, bu grupların elyaf lifli olanlarının değerleri ise Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Tüm grupların bir arada verildiği grafik ise Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu grafikte görünen (Ç) çelik lifli numuneler, (E) ise elyaf lifli numunelerdir.

**Çizelge 4.1.** Lifsiz numunelerin basınç dayanımı

Numune	Basınç Değeri (MPa)
CNTRL	57,19
CNTRL - SF5	61,00
CNTRL - SF10	63,57
CNTRL - SF15	65,24
CNTRL - FA20	64,65
CNTRL - FA40	52,72
CNTRL - FA60	43,38

**Çizelge 4.2.** Çelik lifli numunelerin basınç dayanımı

Numune	Basınç Değeri (MPa)
SIF	128,50
SIF - SF5	131,73
SIF - SF10	135,46
SIF - SF15	139,20
SIF - FA20	137,17
SIF - FA40	125,33
SIF - FA60	118,00

**Çizelge 4.3.** Elyaf lifli numunelerin basınç dayanımı

Numune	Basınç Değeri (MPa)
SIF	62,00
SIF - SF5	65,67
SIF - SF10	68,18
SIF - SF15	73,81
SIF - FA20	71,39
SIF - FA40	52,14
SIF - FA60	-

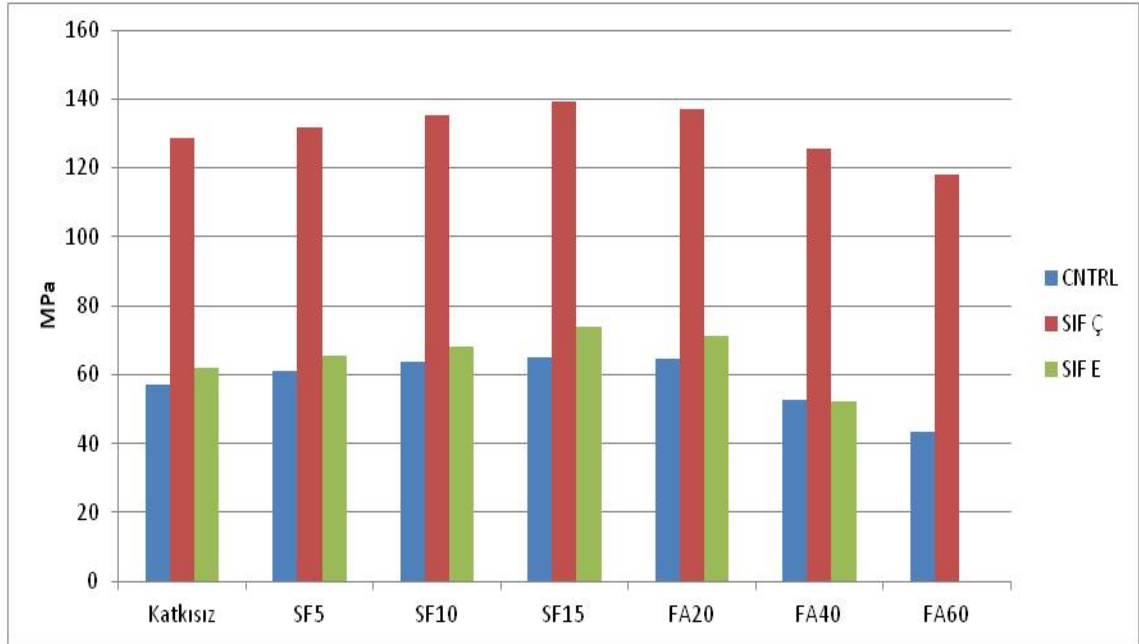
\* SIF - FA60 numunelerinden bir sonuç elde edilememiştir

Çizelgeler incelendiği zaman lif katılmasının betonun basınç dayanımına olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Bu katkının çelik liflerde, elyaflara göre daha fazla olduğu çizelgelerden anlaşılmaktadır. Bunun sebebi çelik liflerin özgül dayanımının elyaflara göre daha fazla olması ve çelik liflerin harçla daha iyi bağ (aderans) yapması olduğu tahmin edilmektedir.

Mineral katkıların dayanıma etkisi incelendiğinde, silis dumanın kütlece %15 ve uçucu külün kütlece %20 kullanıldığı numunelerde diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Bu artışın nedeni, kullanılan ince malzemenin serbest C - H ile bağ

yapması ve iç yapıda oluşan CSH miktarını artırması ayrıca betonda oluşan boşluk miktarını azaltması olduğu düşünülmektedir.

Ancak uçucu külün kütlece %40 kullanıldığı durumunda lifsiz, çelik veya elyaf lifli SIFCON numunelerde ölçülen basınç dayanımını değeri mineral katkısız numunelere göre daha azdır. Uçucu külün kütlece katılım oranı %60 olduğu zaman basınç dayanımı önemli ölçüde düşmekte hatta elyaf lifli SIFCON numunelerde bu uçucu kül oranında numune herhangi bir basınç dayanımına sahip olamamaktadır. Bu durumun nedeni, harç fazı üretilirken oldukça ince malzemeler kullanıldığından ilave edilen yüksek oranda ki uçucu kül inceliği daha da fazla miktara getirmekte, bu da her malzemenin hidrate olamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kütlece %60 uçucu kül içeren elyaf lifli numunelerde, elyaf liflerin sahip olduğu çok büyük yüzey alanının, oldukça fazla miktarda ki ince malzemeler tarafından sarılamaması sebebi ile bu numunelerin mukavemet kazanamadığı tahmin edilmektedir. SIF(E) FA60 grubunda ki elyaf liflerin betonun içinde boşluk gibi davrandığı düşünülmektedir. Eğilme dayanımı ve tokluk dayanımında da bu gruplardan aynı nedenle sonuç alınmadığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.1. Basınç dayanımları grafiği



#### 4.2. Eğilme Dayanımı

SIFCON eğilme dayanımı hesaplamak için daha önceden 7 cm x 7 cm x 28 cm'lik prizma numuneler üretilmişti. Yapılan eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.4 Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu değerler hep birlikte grafik olarak Şekil 4.3'de verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Lifsiz numunelerin eğilme dayanımı

Numune	Eğilme Değeri (MPa)
CNTRL	2,68
CNTRL - SF5	2,90
CNTRL - SF10	3,11
CNTRL - SF15	3,49
CNTRL - FA20	3,24
CNTRL - FA40	2,46
CNTRL - FA60	2,17

**Çizelge 4.5.** Çelik lifli numunelerin eğilme dayanımı

Numune	Eğilme Değeri (MPa)
SIF	30,86
SIF - SF5	31,16
SIF - SF10	35,61
SIF - SF15	38,64
SIF - FA20	36,23
SIF - FA40	28,00
SIF - FA60	22,17

**Çizelge 4.6.** Elyaf lifli numunelerin eğilme dayanımı

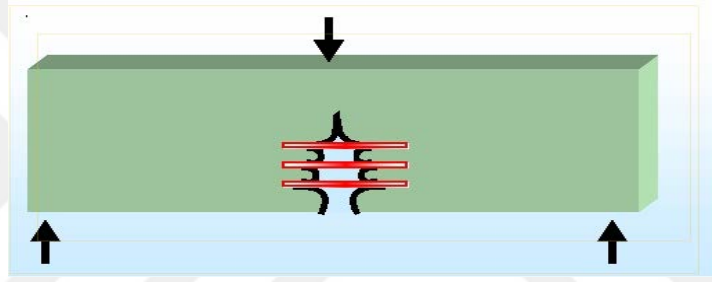
Numune	Eğilme Değeri (MPa)
SIF	10,38
SIF - SF5	11,44
SIF - SF10	13,57
SIF - SF15	15,95
SIF - FA20	14,62
SIF - FA40	8,20
SIF - FA60	-

\* SIF - FA60 numunelerinden bir sonuç elde edilememiştir

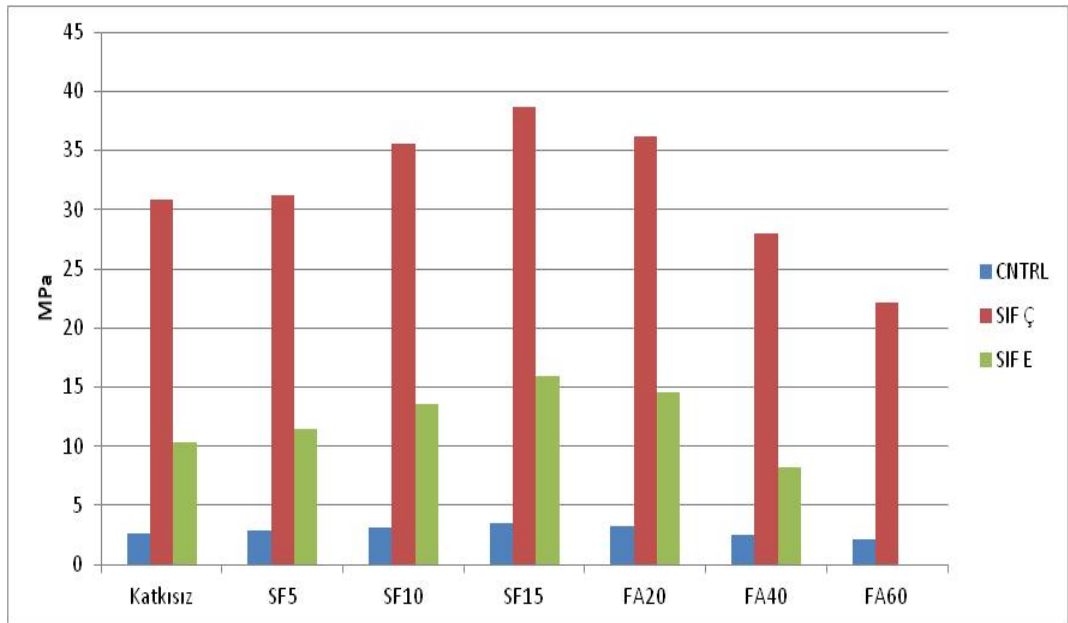
SIFCON'un eğilme dayanımında gösterdiği olumlu katkı basınç dayanıma kıyasla oldukça fazladır. Bu durumun sebebi, katılan liflerin üzerine gelen gerilmeleri karşılaması ve bu gerilmeleri matrisin sağlam bölümlerine iletmesidir. Katılan bu lifler beton içerisinde bir köprü gibi davranır ve bu sayede çatlak oluşumunu geciktirir, çatlağın yayılmasını önler ayrıca oluşan çatlağın ilerlemesinin önüne geçer. Liflerin bu köprü görevi Şekil 4.2'de hem numune üzerinde hem de temsilen gösterilmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçları incelendiği zaman, çelik lifli SIFCON numunelerin elyaf liflilere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Oluşan ilk çatlaktan sonra liflerin maruz kaldığı gerilmeyi üstlendiğinden yukarıda bahsedilmiştir. Bu sebeple çelik liflerin çekme mukavemetlerinin fazlalığı, olumlu artışın daha çok olmasına sebep olmuştur. Elyaf liflerde bu gerilemeyi üstlenir fakat bir müddet sonra gerilme bölgesindeki lifler kopması sonucu kırılma gerçekleşir. Çelik liflilerde ise kırılma liflerin sıyrılması şeklinde olur.

Mineral katkıların etkisi incelendiğinde, silis dumanın kütlece %15 ve uçucu külün kütlece %20 kullanıldığı zaman daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Burada ki artışın nedeni basınç dayanımının artışındaki sebeplerle aynı olan betonda ki boşluğun azaldığı ve CSH yapısının artmış olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Liflerin köprüleme özelliği



Şekil 4.3. Eğilme dayanımları grafiği

### 4.3. Tokluk

Deneylemler sonucunda elde edilen tokluk değerleri sonuçları izelge 4.7, izelge 4.8 ve izelge 4.9'da sunulmuştur. Tokluk değerlerinin verildiği grafik Şekil 4.4'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.7.** Lifsiz numunelerin tokluk değeri

Numune	Tokluk Değeri (N.m)
CNTRL	1057,10
CNTRL - SF5	975,43
CNTRL - SF10	886,79
CNTRL - SF15	847,55
CNTRL - FA20	724,60
CNTRL - FA40	417,93
CNTRL - FA60	195,18

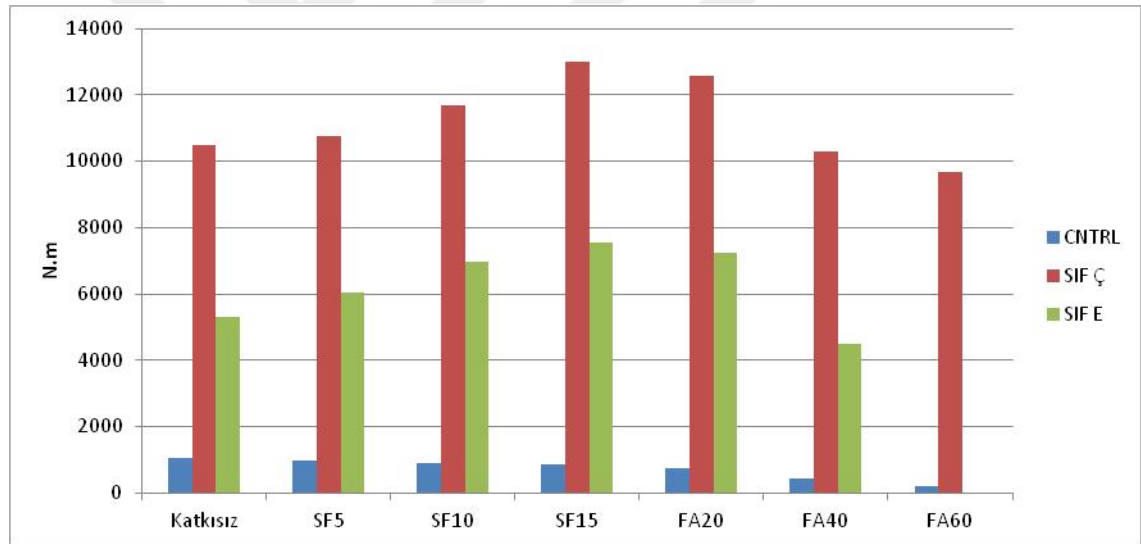
**Çizelge 4.8.** elik lifli numunelerin tokluk değeri

Numune	Tokluk Değeri (N.m)
SIF	10467,40
SIF - SF5	10760,85
SIF - SF10	11671,26
SIF - SF15	13002,98
SIF - FA20	12588,35
SIF - FA40	10280,46
SIF - FA60	9675,73

**Çizelge 4.9.** Elyaf numunelerin tokluk değeri

Numune	Tokluk Değeri (N.m)
SIF	5312,40
SIF - SF5	6044,42
SIF - SF10	6953,48
SIF - SF15	7549,20
SIF - FA20	7237,63
SIF - FA40	4485,50
SIF - FA60	-

\* SIF - FA60 numunelerinden bir sonuç elde edilememiştir

**Şekil 4.4.** Tokluk değerleri grafiği

SIFCON'un olumlu katkısının olduğu bir diğer sonuç ise tokluk değeridir. Bu katkı verilen çizelgelerden de görüldüğü gibi şimdiye kadar yapılan çalışmalarda da ortaya konulmuştur. Beton gevrek bir malzemedir bu sebeple kırılması ani olmakta ve şekil değiştirme kapasitesi düşük olmaktadır. Betonun içine katılan lifler sayesinde, betonun gevrekliği azalırken süneklik davranışı artar. Eğilme dayanımında bahsedilen liflerin köprüleme özelliği, tokluk değerini arttıran en önemli parametre olduğu düşünülmektedir. SIFCON numunelerin gerilme - şekli değiştirme grafiği

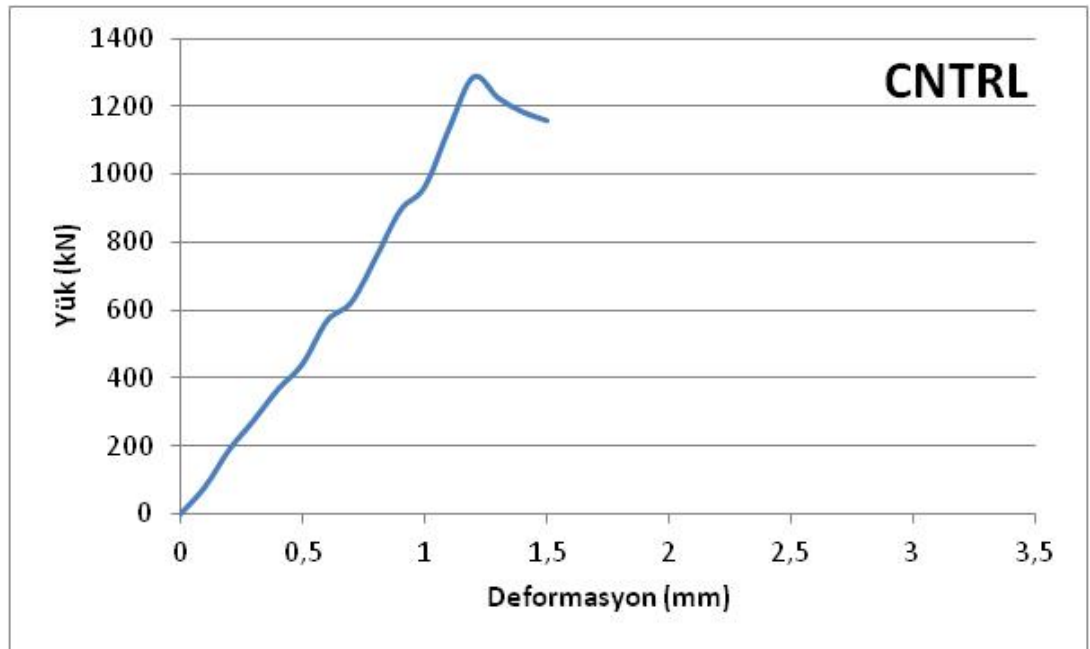
incelendiğinde, maruz kaldığı gerilmeye karşı çok yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda, numunelerin taşıma gücünü kaybetmesi kırılma veya kopma şeklinde değil de ezilme şeklinde (Şekil 4.5) olması bize tokluğun arttığına dair fikir verir. Şekil 4.6'da, lifsiz ve katkısız CNTRL ve %15 silis dumanı katkılı lifsiz CNTRL, Şekil 4.7'de ise kütlece %15 silis dumanı içeren çelik lifli ve elyaf lifli numunelerinin gerilme - şekil değiştirme grafiği görülmektedir. Çelik lifli numunelerin tokluk değerinin elyaf liflilere göre daha iyi sonuç verdiği çizelgelerden okunmaktadır. Çelik liflerin özgül dayanımlarının fazlalığı bu farkın olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Mineral katkıların betonun iç yapısına etki etmesi ve doluluk oranını arttırması sebebi ile, SIFCON'un sonuçlarına olumlu etki ettiği tahmin edilmektedir. Ancak lifsiz olan numunelerde mineral katkıların kullanılmasının tokluk değerini bir miktar düşürdüğü görülmektedir. Bunun sebebinin ise katılan mineral katkıların, betonda ki boşlukları azaltması ile betonun gevrekliğini arttırması buna bağlı olarak ani kırılmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

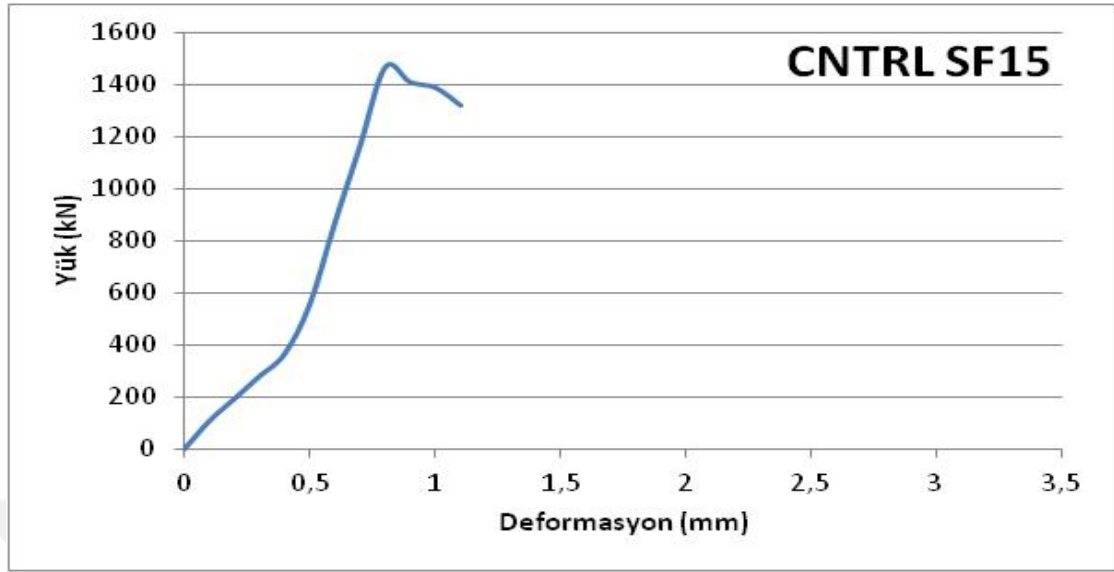
Tokluk değeri hesabı yapılırken, deney cihazından alınan gerilme - şekil değiştirme ( $\sigma - \epsilon$ ) grafiğinin altında kalan alanı şeklinde hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan LVDT'ler maksimum 10 mm'e kadar deformasyon okuyabilme kapasitesine sahip olduğu için, SIFCON numunelerde elde edilen grafiklerde ki şekil değiştirme değeri 10 mm ile sınırlı kalmıştır. Kullanılan LVDT'lerin okuma kapasitesi daha fazla olsaydı, SIFCON numunelerde ki deformasyon boyutunun 10 mm'i geçeceği belirlenmiştir.



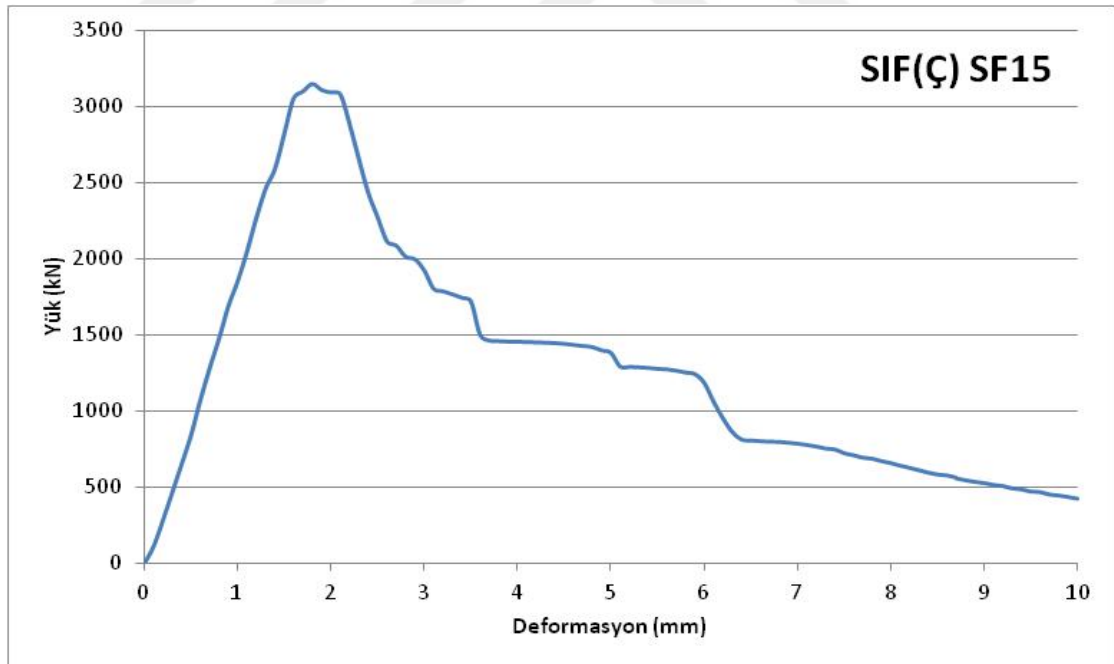
Şekil 4.5. Ezilmiş küp ve prizma numuneler



Şekil 4.6. (devam)

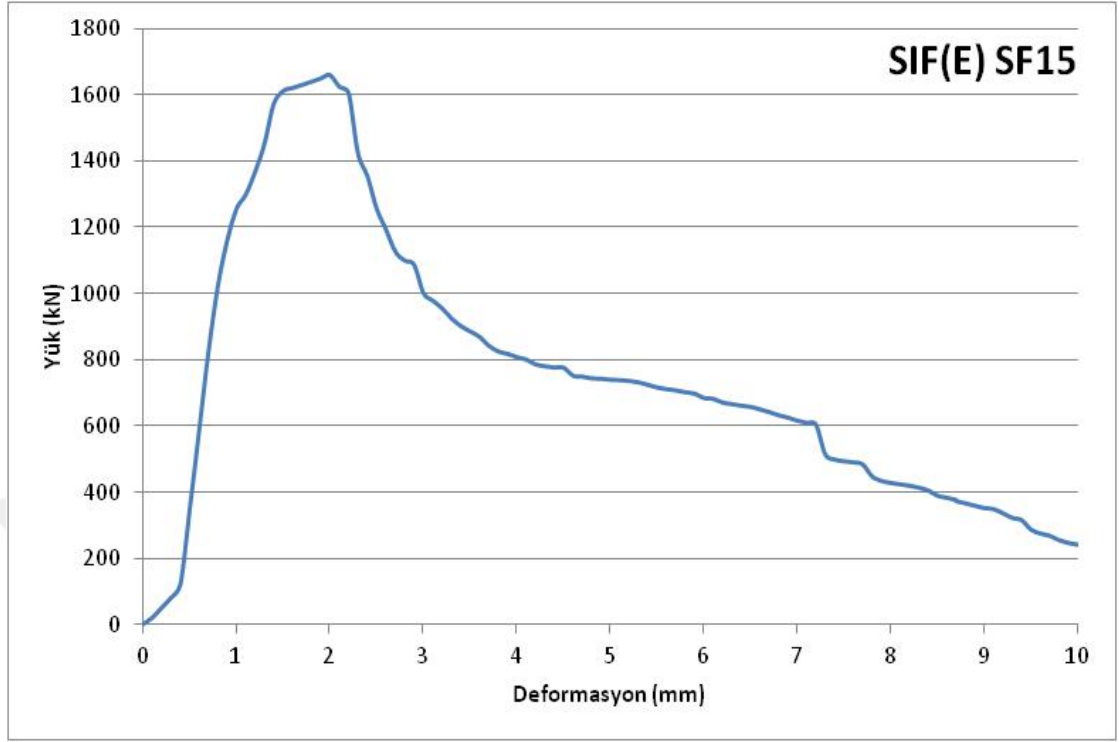


Şekil 4.6. Lifsiz, katkısız CNTRL ve lifsiz %15 silis dumanı katkılı CNTRL SF15 gerilme - şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.7. (devam)





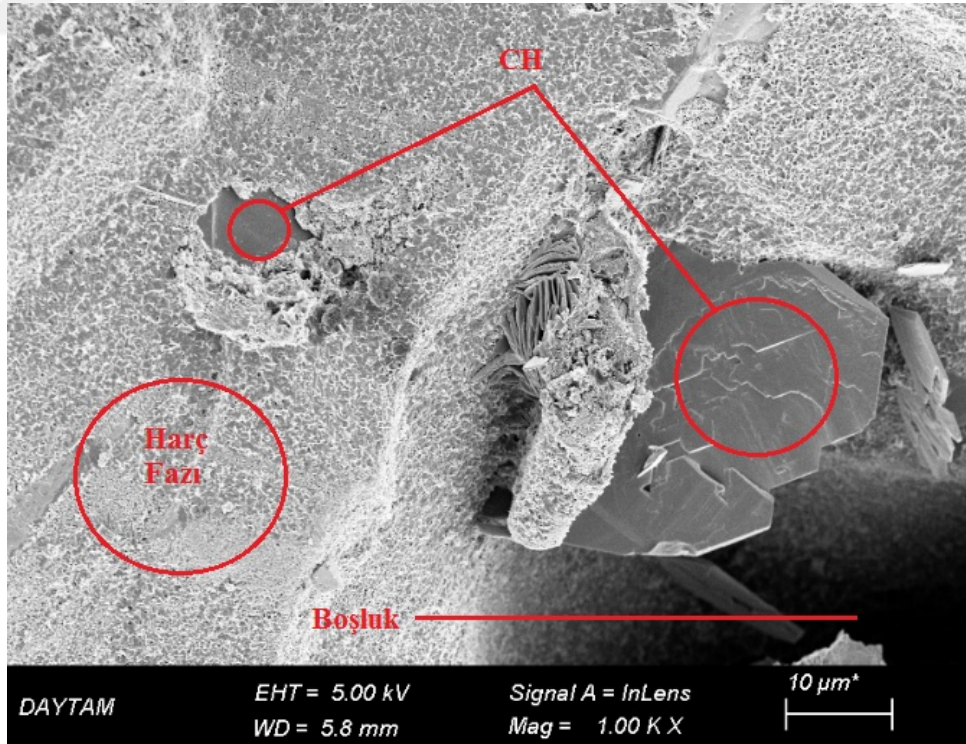
**Şekil 4.7.** %15 silis dumanı içeren çelik ve elyaf lifli numunelerin gerilme - şekil değiştirme grafikleri

#### 4.4. SEM Görüntüleri

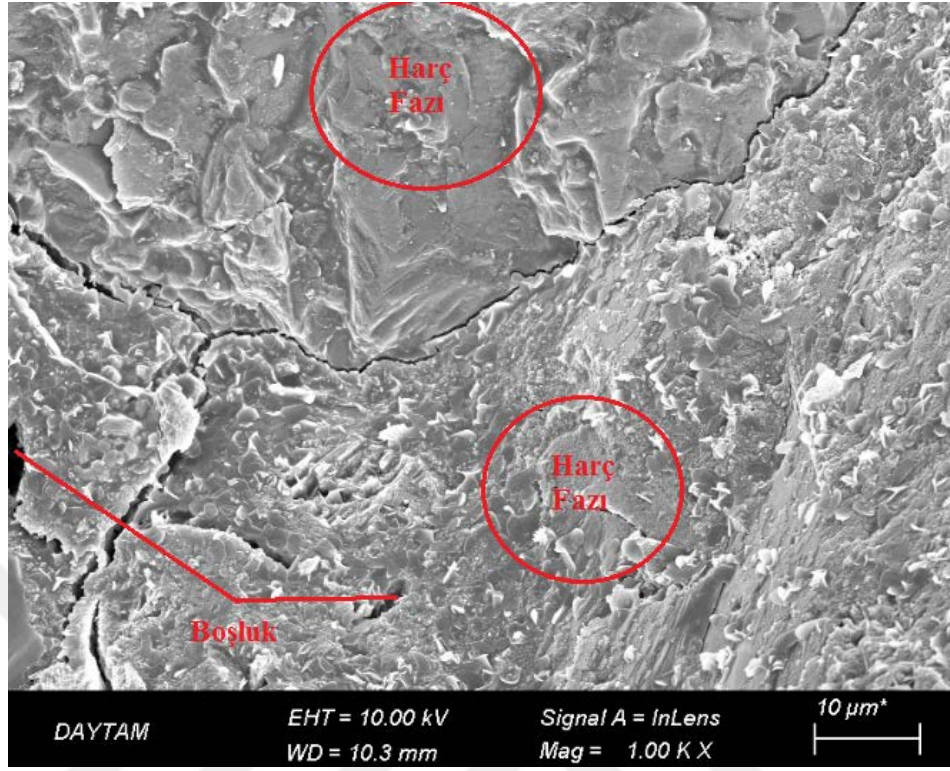
Bu çalışmada SIFCON'un mekanik özelliklerinin incelenmesinin yanı sıra, bu özel beton türünün iç yapısı ve liflerin harçla yaptığı bağ da araştırılmıştır. Bu nedenle üretilen numunelerin kırılmasının ardından, bazı kesitler alınmış ve bu kesitlerin SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntüler Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'da verilmiştir.

Şekil 4.8'de görünen resim mineral katkısız ve lifsiz betonun görüntüsüdür. Şekil 4.9'da ise kütlece %15 silis dumanı katkılı ve lifsiz beton harcı verilmiştir. Şekil 4.9'da katılan mineral katkı sayesinde Şekil 4.8'e kıyasla daha az boşluk olduğu düşünülmektedir. Bu iki resim arasında ki farka bakarak mineral katkıların betonun kompozitesini (doluluk) arttırdığı yorumu yapılabilir. Ayrıca Şekil 4.9'da daha çok CSH yapısı olduğu buna bağlı olarak dayanımın arttığı söylenebilir.

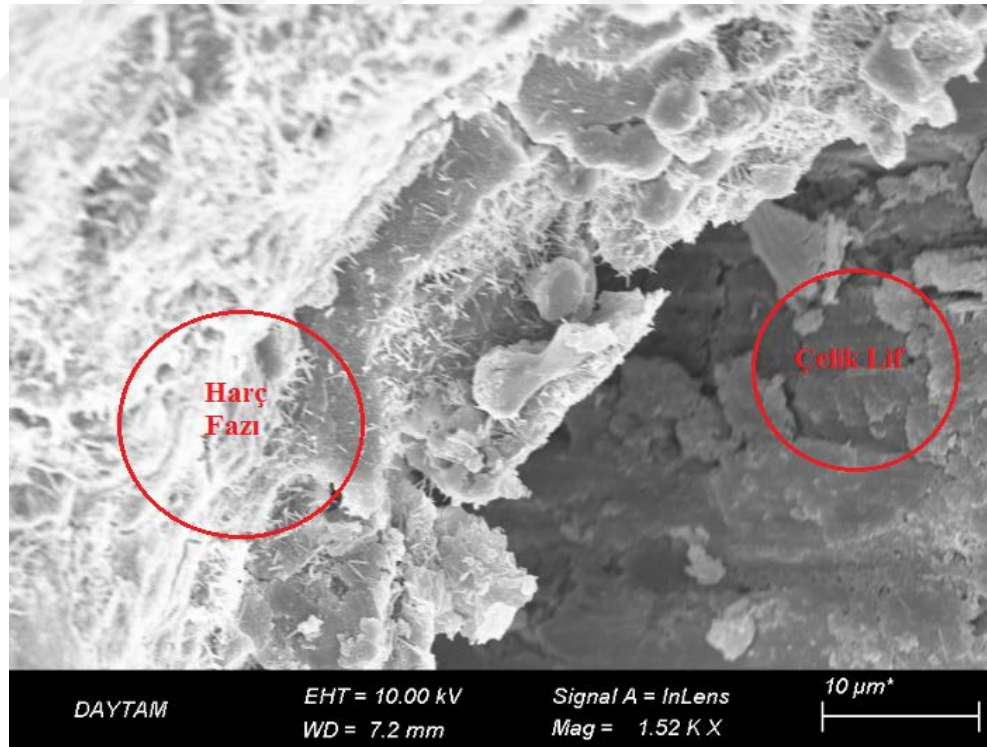
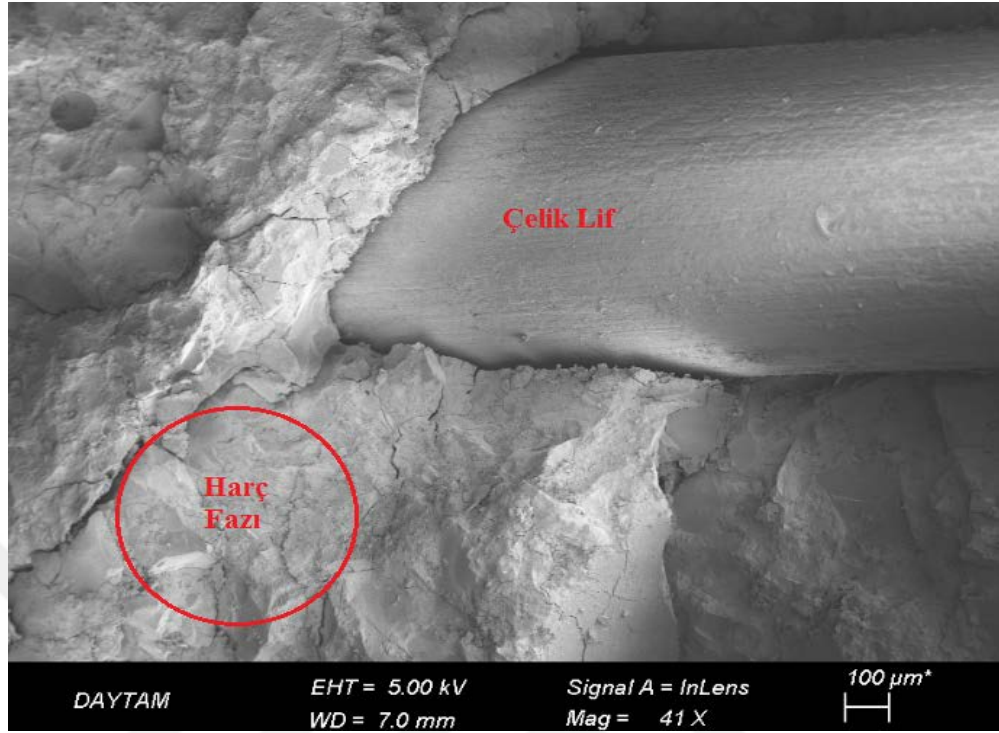
Şekil 4.10'da çelik lifli SIFCON numunesinin, Şekil 4.11'de ise elyaf lifli SIFCON numunesinin SEM görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 4.11'e bakıldığı zaman elyaf liflerin maruz kaldığı gerilme sebebiyle, betondan sıyrılma veya liflerin kopması şeklinde SIFCON numunesinin kırıldığı yorumu yapılabilir. Şekil 4.10'da ki çelik lifli SIFCON numunede ise lif de sıyrılma, kopma ya da eğilme tarzı bir kusur olmadan betonun kırılması gerçekleştiği düşünülmüştür. Bu durumun oluşmasındaki sebep çelik liflerin, elyaf liflere oranla sahip olduğu yüksek özgül dayanımı ve beton harcıyla yaptığı yüksek aderans olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca çelik lifin üzerine yapışmış halde görülen harç fazı parçalarının fazlalığı da, çelik liflerin elyaf liflere göre betonla daha iyi bağ yaptığının bir başka göstergesi olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra elyaf lifli SIFCON numuneden alınan SEM görüntülerinde az da olsa yer yer boşluklar görülmüştür. Bu boşluklar, elyaf liflerin oldukça fazla yüzey alanına sahip olması sebebiyle çimentonun tam olarak hidrate olamamasından kaynaklandığı düşünülür. Çelik lifli SIFCON numunede ise bu boşluklara daha az rastlanmıştır.



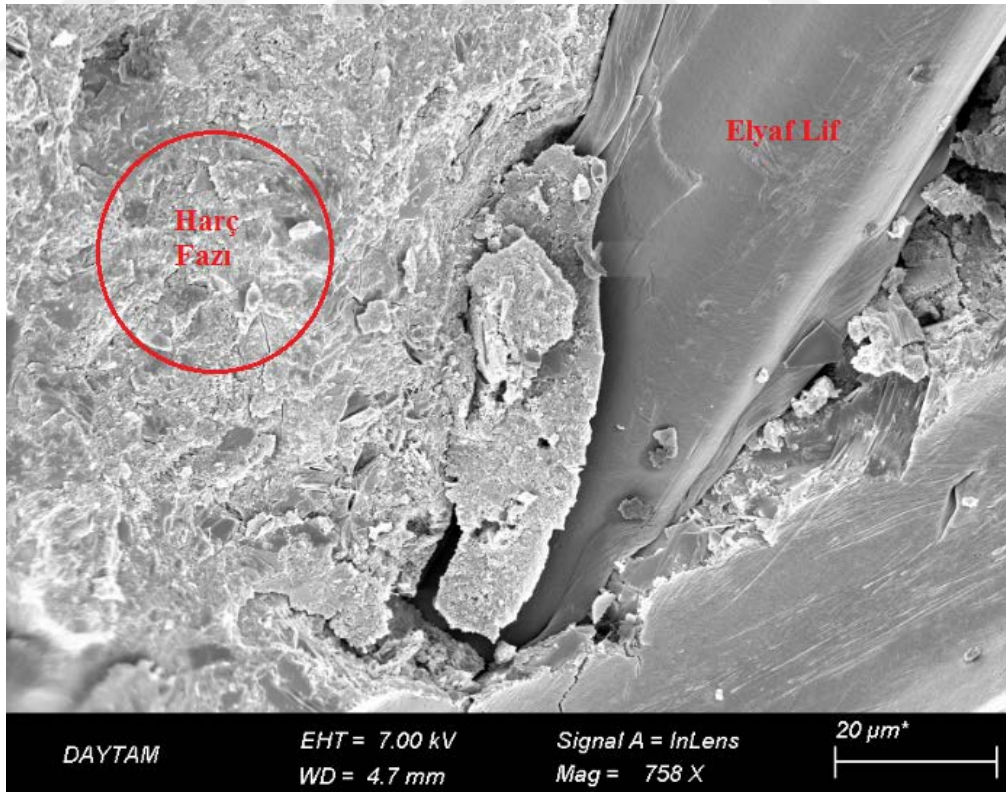
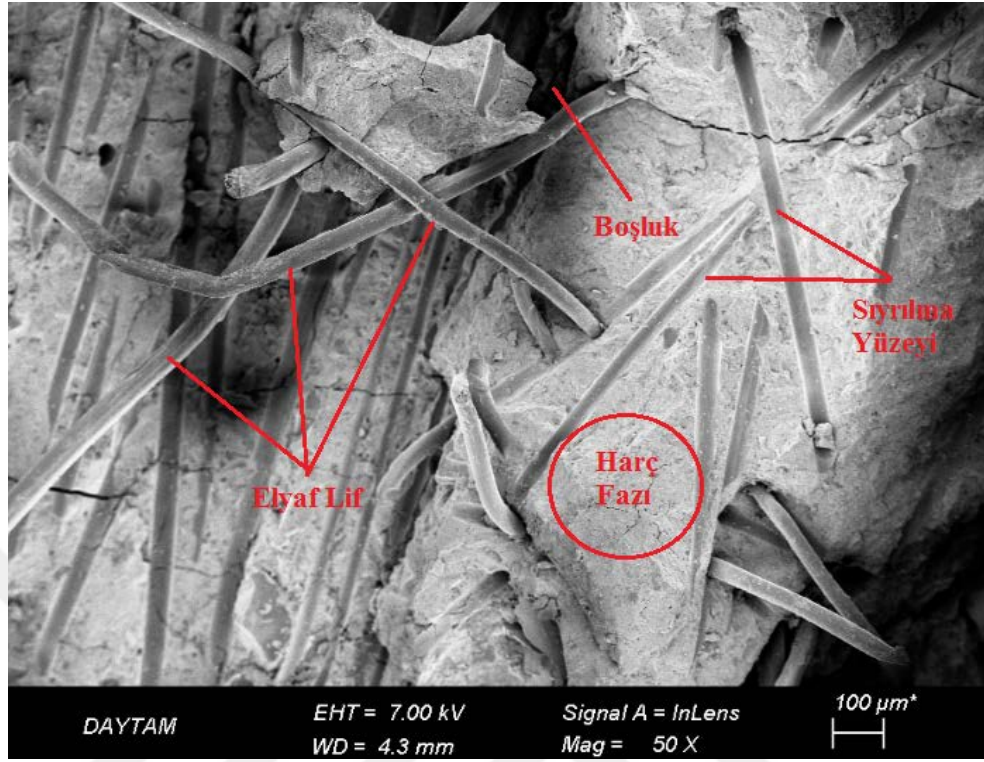
Şekil 4.8. Lifsiz ve mineral katkısız beton kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 4.9. Lifsiz ve %15 silis dumanı katkıli beton kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 4.10. Çelik lifli ve %15 silis dumanı katkılı SIFCON kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 4.11. Elyaf lifli ve %15 silis dumanı katkıli SIFCON kesitinin SEM görüntüsü

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan basınç, eğilme ve tokluk deneyleri ile %10 çelik ve %10 elyaf lif içeren SIFCON numunelerinin lifsiz betonlara göre mekanik farklılıkları karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra kullanılan mineral katkıların da harç ve SIFCON'un mekanik davranışı üzerinde ki etkisi araştırılmıştır.

Alınan SEM görüntüleri ile çelik liflerin, elyaf liflerin ve mineral katkıların betonun iç yapısına nasıl etki ettiği, iç yapıda oluşan bağlar ve betonun bileşenlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

- Basınç dayanımı sonuçları incelendiği zaman; çelik lifler basınç dayanımını yaklaşık 2 - 2,5 kat, elyaf lifler yaklaşık 1,1 kat arttırmıştır. Silis dumanının ağırlıkça %15, uçucu külün ise ağırlıkça %20 kullanıldığı durumlarda basınç dayanımı 1,1 kat artmıştır.
- Eğilme dayanımı sonuçları incelendiği zaman; çelik lifler eğilme dayanımını yaklaşık 11,5 kat (%1051), elyaf lifler yaklaşık 4 kat (%287) arttırmıştır. Silis dumanının ağırlıkça %15, uçucu külün ise ağırlıkça %20 kullanıldığı durumlarda eğilme dayanımı 1,3 kat artmıştır.
- Tokluk değeri sonuçları incelendiği zaman; çelik lifler tokluk değerini yaklaşık 10 kat (%890), elyaf lifler yaklaşık 5 (%400) kat arttırmıştır. Silis dumanının ağırlıkça %15, uçucu külün ise ağırlıkça %20 kullanıldığı durumlarda; lifsiz numunelerde tokluk değeri 0,25 kat azaltmıştır, SIFCON'da ise 1,25 kat artmıştır.
- Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde mikron yapısı incelendiği zaman; Mineral katkıların betona ilave edilmesi ile betonda ki boşluk oranının azaldığı, dayanımının ise arttığı tahmin edilmektedir. Ayrıca SEM görüntüleri incelendiğinde çelik liflerin, elyaf liflere göre daha iyi bir aderans yaptığı düşünülmektedir.

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve daha önceden yapılan deneylerdeki veriler göz önüne alınırsa; SIFCON'un basınç dayanımının yüksek olması, eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinde oldukça üstün performans sergilemesi nedeniyle, bu özel beton türünü normal betonlara göre üstün kılar. SIFCON sahip olduğu bu avantajları nedeniyle patlamaya karşı dayanıklı binaların yapımında, yüksek deformasyona maruz kalan köprü ayaklarında ve/veya endüstriyel zeminlerde kullanılması tavsiye edilir.

Ayrıca bu çalışmada kullandığımız elyaf lifli numunelerin, yüksek ısıya maruz kalması durumunda çelik lifli numunelere oranla daha az dayanım kaybına uğrayacağı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra elyaf liflerin, betonda donatı korozyonu ve segragasyon açısından çelik liflere kıyasla avantajlı olduğu tahmin edilmektedir. Bu öngörü ilerde yapılacak olan çalışmalarda araştırılabilir.

**KAYNAKLAR**

- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1).
- ASTM, C., 1998. 1018-97. Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete.
- ASTM, C., 2003. 618. Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- Atiş, C., Özcan, F., Kılıç, A., Karahan, O., Bilim, C. and Severcan, M., 2005. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. Building and environment, 40 (12), 1678-1683.
- Beglarigale, A., Yalçınkaya, Ç., Yiğiter, H. and Yazıcı, H., 2016. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. Construction and Building Materials, 104, 99-108.
- Bouzoubaa, N. and Lachemi, M., 2001. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. Cement and Concrete Research, 31 (3), 413-420.
- Bulutlar, Y.A., 2006. Çelik Tel İçeriğinin Ve Dayanımının Sifcon'un Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Canbaz, M. and Ünüvar, C., 2016. Lif ve çimento türünün sifcon özelliklerine etkisi Effect of fiber and cement type on sifcon properties.
- Demir, İ., 2009. Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. Int. J. Eng, 1 (2), 1.
- EN, B., 2009. 12390-5 Testing hardened concrete-Part 5: Flexural strength of test specimens. British Standards Institution-BSI and CEN European Committee for Standardization.
- En, T., 2003. 12390-3. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- EN, T., 2012. 197-1. Cement-Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Ankara: Turkish Standard Institution.
- Erdoğan, T.Y., 2013. Beton. ODTÜ Yayıncılık.
- Farnam, Y., Moosavi, M., Shekarchi, M., Babanajad, S. and Bagherzadeh, A., 2010. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression. Cement and Concrete Research, 40 (11), 1571-1581.
- Homrich, J.R. and Naaman, A.E., 1987. Stress-strain properties of SIFCON in compression. Special Publication, 105, 283-304.
- Ipek, M., Aksu, M., Yılmaz, K. and Uysal, M., 2014. The effect of pre-setting pressure on the flexural strength and fracture toughness of SIFCON during the setting phase. Construction and Building Materials, 66, 515-521.
- İpek, M., Canbay, M. and Yılmaz, K., 2014. Çelik ve polipropilen liflerin yalın ve kombinasyonlu olarak kullanılmasının SIFCON'un mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19 (1), 41-52.



- Kirgiz, M.S., 2004. İkameli ve Katkili Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi (1), 73-90.
- Lankard, D.R. and Newell, J.K., 1984. Preparation of highly reinforced steel fiber reinforced concrete composites. Special Publication, 81, 287-306.
- Naaman, A., 1992. SIFCON: Tailored properties for structural performance, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. E & FN Spon New York, USA, pp. 18-38.
- Özturan, T., 2013. Özel Betonlar. Beton.
- Rao, H.S., Ghorpade, V.G., Ramana, N. and Ganeswar, K., 2010. Response of SIFCON two-way slabs under impact loading. International Journal of Impact Engineering, 37 (4), 452-458.
- Schneider, B., 1992. Development of SIFCON through Applications, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. RILEM, pp. 177-194.
- Schneider, B., Mondragon, R., Kirst, J. and Berglund, J., 1988. ISST (Intercontinental Ballistic Missile Silo Superhardening Technology) Structure with SIFCON (Slurry-Infiltrated Fiber Concrete)-HFC-2 Test, DTIC Document.
- Shah, A.A. and Ribakov, Y., 2011. Recent trends in steel fibered high-strength concrete. Materials & Design, 32 (8), 4122-4151.
- Tuyan, M. and Yazıcı, H., 2012. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix. Construction and Building Materials, 35, 571-577.
- Yardımcı, M.Y., Yiğiter, H., Aydın, S. and Yazıcı, H., 2016. Flexural Performance of Steam Cured SIFCON Produced with Steel and Synthetic-Macro Fibers. 3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, 2, 681-690.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S. and Baradan, B., 2006. Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase. Cement and Concrete Research, 36 (3), 481-486.

## ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2008 yılında kazandığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında tamamladı. 2013 - 2014 yılı arasında özel sektörde çalışmıştır. 2014 yılından beri Kafkas Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümün' de Arş. Gör. olarak görev yapmaktadır.

