

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI LİF KATKILI SIFCON'UN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

HÜLYA KIZILDAĞ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. CENK KARAKURT

BİLECİK, 2023

10581426

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI LİF KATKILI SIFCON'UN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

HÜLYA KIZILDAĞ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. CENK KARAKURT

BİLECİK, 2023

10581426

BEYAN

“Farklı Lif Katkılı SIFCON’un Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında herhangi bir kurumdan proje desteği alınmamıştır.			
DESTEK ALINMIŞTIR	☐	DESTEK ALINMAMIŞTIR	☒
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Hülya KIZILDAĞ

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında; çalışmamı sahiplenerek takip eden, bilgileri ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, çalışmalarımın yürütülmesinde ne zaman olursa olsun kıymetli vaktini bana ayıran ve çalışmamı yönlendiren değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk KARAKURT'a bütün katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım için gerek malzeme tedariki konusunda gerekse deneysel çalışmalarımda hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen DAĞ-İŞ Madencilik Yönetim Kurulu Başkanları İsmet Kızıldağ ve Fatih Kızıldağ'a, Kalite Kontrol Birimi Müdürü Osman Hamarat'a, Kalite Kontrol Birimi teknik personeli Soner Paşaoğlu'na, BEKAERT Teknik Müdürü Mehmet Yerlikaya'ya, SİKA Yapı Kimyasalları Distribütörü Satış Pazarlama Müdürü Ahmet Salim Aktepe'ye teşekkür ederim.

Son olarak beni bugünlere getiren, hiçbir zaman benden desteğini ve sevgisini esirgemeyen değerli aileme en içten duygularıyla teşekkür eder ve sevgilerimi sunarım.

Hülya Kızıldağ

2023

ÖZET

FARKLI LİF KATKILI SIFCON'UN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

İnşaat mühendisliği, teknolojinin de ilerlemesiyle her geçen gün daha da gelişmekte ve artan ihtiyaçlara çözüm üretmektedir. Bu ihtiyaçlardan biri de betonun darbeye karşı dayanımının artırılmasıdır. Darbe dayanımının önemli olduğu savunma yapılarında, nükleer santral gibi alanlarda beton; patlamalara, yüksek sıcaklıklara, yüksek hızda mermiye maruz kalabilir. Lif kullanımıyla betonun sünekliğinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı bilinmektedir. Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonun bu koşullara dayanımının ve dayanıklılığının artması için karbon fiber lif, cam lifi, çelik lif gibi takviyeler yapılmış ve betona alternatif olarak çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton (SIFCON) karşımıza çıkmıştır.

Bu çalışmada; betonun darbe etkilerine karşı özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılabilecek malzemeler ve yöntemler araştırılmıştır. Önce işlenebilirlik deneyleri yapılarak en uygun karışım oranları tespit edilmiştir. Ardından farklı lif türleri farklı oranlarda kullanılarak SIFCON'un mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çelik ve polipropilen lifler ayrı ayrı hacimce %3, %5 ve %7 oranlarında kullanılmış olup lifsiz referans numunesi ile birlikte 7 seri numune üretilmiştir. Basınç dayanımını ölçmek için küp (100x100x100 mm), eğilme dayanımını ölçmek için kiriş (100x100x50 mm) ve darbe dayanımını ölçmek için disk (64x150 mm) SIFCON numuneleri üretilip 28 ve 56 gün standart küre tabi tutulmuştur. Kür sürelerinin sonunda uygulanan deneylere bakılarak kullanılan lif oranının arttıkça basınç dayanımının düştüğü, eğilme ve darbe dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri referans numunesinde, en yüksek eğilme ve darbe dayanımları değerleri hacimce %7 çelik lif içeren numunede ölçülmüştür. Kür süresinin artması mekanik özellikleri olumlu etkilemiştir. Çelik lif, polipropilen life göre mekanik özellikleri daha çok arttırmıştır. Tüm bu sonuçlara bakılarak lif kullanımının çimento esaslı kompozitlerde darbe dayanımını arttırmada etkin bir rol oynadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: SIFCON, Mekanik Özellik, Darbe Dayanımı, Lif, Silis Dumanı.

ABSTRACT

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SIFCON WITH DIFFERENT FIBER ADDITIVES

With the development of concrete technology in the world, new methods have been discovered for needs. One of these needs is to increase the resistance of concrete against impact. Concrete can be exposed to explosions, high temperatures, high velocity bullets in defense structures or nuclear power plants. Concrete is a brittle material. Carbon fiber, glass fiber, steel fiber are used to increase the strength and durability of concrete. So slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) was discovered.

In this study; materials and methods that can be used to improve the impact properties of concrete have been investigated. First, workability tests were carried out and the most suitable mixing ratios were determined. Then, the effect of SIFCON on mechanical and physical properties was investigated by using different fiber types at different rates. Steel and polypropylene fibers were used separately at %3, %5 and %7 volume and 7 series were produced together with the fiber-free reference sample. Cube, beam and disk specimens were produced for compressive, flexural and impact strength tests. Then cured for 28 and 56 days. By looking at the tests applied at the end of the curing periods, it was concluded that as fiber ratio increased compressive strength decreased, flexural and impact strength increased. The highest compressive strength value was measured in reference sample. The highest flexural and impact strength values were measured in sample containing %7 volume of steel fiber. Increasing the curing time had a positive effect on the mechanical properties. Steel fiber increased mechanical properties more than polypropylene fiber. Considering all these results, it has been seen that the use of fiber has an active role in increasing the impact strength of cement-based composites.

Keywords: SIFCON, Mechanical Property, Impact Resistance, Fiber, Silica Fume.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi	2
1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi.....	4
2. BETONUN DARBE ETKİSİNDE DAVRANIŞI.....	5
2.1. Darbeye Dayanıklı Beton	5
2.1.1. Darbe Dayanımının Tespiti	6
2.1.1.1. Yüksek Hızda Mermi Darbe Deneyi.....	6
2.1.1.2. Ağırlık Düşürme Deneyi	7
2.1.2. Darbe Dayanımına Etki Eden Parametreler	7
2.1.2.1. Agrega Kullanımı	8
2.1.2.2. Çimento Kullanımı	8
2.1.2.3. Mineral Katkı Kullanımı	9
2.1.2.4. Lif Kullanımı.....	9
2.2. Betonda Kullanılan Bazı Lif Türleri.....	10
2.2.1. Karbon Fiber Lif	10
2.2.2. Cam Lifi	11
2.2.3. Çelik Lif	12
2.3. SIFCON	15
2.3.1. SIFCON'un Mühendislik Özellikleri	18
2.3.1.1. SIFCON'un Basınç Dayanımına Karşı Davranışı.....	21
2.3.1.2. SIFCON'un Çekme Dayanımına Karşı Davranışı	22
2.3.1.3. SIFCON'un Eğilme Dayanımına Karşı Davranışı	22
2.3.1.4. SIFCON'un Darbe Dayanımına Karşı Davranışı.....	23
2.4. SIFCON ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	23

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	32
3.1.1. Çimento	32
3.1.2. Silis Dumanı	32
3.1.3. Agregası	33
3.1.4. Su	35
3.1.5. Lif.....	35
3.1.6. Katkı	37
3.2. Üretim ve Yapılan Deneyler	37
3.2.1. Numune Tasarımı ve Hazırlanışı	37
3.2.2. Numunelerin Kodlandırılması	41
3.2.3. Taze Beton Deneyleri	41
3.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	45
4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	50
4.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	51
4.2.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	53
4.2.3. Darbe Dayanımı Deney Sonuçları	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKÇA	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Betonda kullanımı yaygın olan lif çeşitleri	6
Şekil 2.2. Yüksek hızda mermi darbesi deney cihazı.....	7
Şekil 2.3. Ağırlık düşürme deney cihazı.....	7
Şekil 2.4. Geleneksel betonun ve çelik lif donatılı betonların gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	13
Şekil 2.5. Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik yüzey şekilleri.....	14
Şekil 2.6. Basınç deneyi uygulanmış, yüksek oranda çelik lif içeren SIFCON numuneleri.....	19
Şekil 2.7. SIFCON'un çekme yüküne karşı gerilme-şekil değiştirme eğrisi	20
Şekil 2.8. Eğilme yükü altında normal beton, çelik lif donatılı beton ve SIFCON'un gerilme-şekil değiştirme davranışı	20
Şekil 3.1. Kullanılan agreganın elenmeden önce ve elendikten sonra görünümü.....	33
Şekil 3.2. Kullanılan çelik ve polipropilen lifler.....	36
Şekil 3.3. Polipropilen lif görünümü.....	36
Şekil 3.4. Demet halinde ve ayrılmış çelik lif görünümü.....	37
Şekil 3.5. Ön döküm için prizmatik kalıpların hazırlanması.....	38
Şekil 3.6. Çimento harç karışım cihazı.....	38
Şekil 3.7. Prizmatik numunelerde uygulanan eğilme ve basınç dayanımı deneyleri.....	39
Şekil 3.8. SIFCON karışımının mikserde hazırlanması.....	40
Şekil 3.9. Hazırlanan karışımın kalıplara yerleştirilmesi ve kalıptan çıkarılan numunelerin kodlanması.....	41
Şekil 3.10. Taze beton deney düzenekleri.....	42
Şekil 3.11. V hunisi deneyi uygulaması.....	43
Şekil 3.12. L kutusu deneyi uygulaması.....	44

Şekil 3.13. J halkası deneyi uygulaması.....	45
Şekil 3.14. Küp numune üretimi.....	45
Şekil 3.15. Basınç dayanımı deneyi uygulaması.....	46
Şekil 3.16. Kiriş numune üretimi.....	46
Şekil 3.17. Eğilme dayanımı deneyi uygulaması.....	47
Şekil 3.18. Disk numune üretimi.....	48
Şekil 3.19. Ağırlık düşürme deney düzeneği ve numune üzerinde uygulaması.....	48
Şekil 3.20. Ağırlık düşürme deneyi uygulanan lifsiz numune.....	49
Şekil 3.21. Ağırlık düşürme deneyi uygulanan %7 çelik lifli ve %7 polipropilen lifli numuneler.....	49
Şekil 4.1. Katkı kullanım oranına bağlı olarak V hunisi geçiş süresi değişimi.....	51
Şekil 4.2. Referans numunesi ve çelik lifli numunelerin basınç dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi.....	52
Şekil 4.3. Referans numunesi ve polipropilen lifli numunelerin basınç dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi.....	52
Şekil 4.4. Referans numunesi ve çelik lifli numunelerin eğilme dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi.....	54
Şekil 4.5. Referans numunesi ve polipropilen lifli numunelerin eğilme dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi.....	54
Şekil 4.6. Eğilme deneyi uygulanmış polipropilen lifli prizmatik numuneler.....	55
Şekil 4.7. İlk çatlak için gerekli darbe sayılarının grafikte gösterimi.....	57
Şekil 4.8. Nihai deformasyon için gerekli darbe sayılarının grafikte gösterimi.....	58

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	32
Çizelge 3.2. Kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. Kullanılan agreganın fiziksel ve geometrik özellikleri.....	34
Çizelge 3.4. Kullanılan agreganın kimyasal özellikleri.....	34
Çizelge 3.5. Kullanılan agreganın elek analizi.....	34
Çizelge 3.6. Kullanılan karma suyuna ait kimyasal analiz sonuçları.....	35
Çizelge 3.7. Kullanılan liflerin özellikleri.....	36
Çizelge 3.8. 1 m ³ için kullanılan karışım oranları.....	39
Çizelge 3.9. SIFCON numune serilerinin 1 m ³ karışım oranları.....	40
Çizelge 3.10. Numunelerin kodlanması.....	41
Çizelge 4.1. Taze beton deney sonuçları.....	50
Çizelge 4.2. Basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	51
Çizelge 4.3. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları.....	53
Çizelge 4.4. İlk çatlak için gerekli darbe sayıları.....	56
Çizelge 4.5. Nihai deformasyon için gerekli darbe sayıları.....	56
Çizelge 4.6. SIFCON birim maliyet cetveli.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

g : Gram

kg : Kilogram

mm : Milimetre

cm : Santimetre

m : Metre

N : Newton

KN : Kilo Newton

MPa : Mega Pascal

s : Saniye

dk : Dakika

C° : Derece Celsius

Ca(OH)₂ : Kalsiyum Hidroksit

CaO : Kalsiyum Oksit

SiO₂ : Silisyum Dioksit

Al₂O₃ : Alüminyum Oksit

Fe₂O₃ : Demir (III) Oksit

MgO : Magnezyum Oksit

K₂O : Potasyum Oksit

Na₂O : Sodyum Oksit

SO₃ : Kükürt Trioksit

SO₄⁻² : Sülfat

Cl- : Klorür

NO₃ : Nitrat

Zn : Çinko

Pb : Kurşun

P₂O₅ : Fosfatlar

K.K. : Kızdırma Kaybı

C-S-H : Kalsiyum Silikat Hidrat

SIFCON : Slurry Infiltrated Fibered Concrete

PAN : Poliakrilonitril

ÇLDB : Çelik Lif Donatılı Beton

PÇ : Portland Çimentosu

D_{max} : En Büyük Agrega Tane Boyutu



1. GİRİŞ

1.1. Genel

İnsanlık tarihinin başlamasıyla beraber temel bir ihtiyaç olan barınma problemi ortaya çıkmıştır. İlk zamanlar ağaç dalları kullanılırken günümüzde teknoloji ve imkanların gelişmesiyle beraber yapılarda betonarme ile devam edilmektedir. Yapı malzemesinin performansı yapının performansında önemli bir rol oynadığından dolayı yapı malzemeleri için ayrı bir disiplin oluşturulmuş ve fiziksel, mekanik, kimyasal özellikleri, üretim şekilleri, kullanım sırasındaki davranışları, amaca uygun malzeme seçimi ve geliştirilmesi araştırılmaktadır. Günümüzde yapı malzemeleri bilim dalında her ne kadar güzel bir noktaya gelinmiş olsa da inşaat sektörü dinamik bir alandır ve ihtiyaçların değişmesi, teknolojinin gelişmesiyle yeni malzeme ve yöntem arayışlarına girilmektedir.

Bir yapı malzemesinde genel olarak aranan özellikler basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve dayanıklılıktır. Son zamanlarda ağır sanayinin de gelişmesiyle beraber daha kapsamlı ve komplike yapılar inşa edilmeye başlanmıştır. Yapı içerisinde veya dışarısında oluşabilecek sıcaklık, patlama gibi etkilerin yayılması, malzemenin hasara uğraması, canlıların güvenliğinin tehlikeye atılması istenmemektedir. Bu noktada darbe dayanımı da aranan bir özellik olmuştur. Malzeme üzerine gelen darbe yükünün sönmelenmesinde lif kullanımı devreye girmiştir. Böylece kullanım alanı yaygın olan beton geliştirilerek lifli beton üretimi ortaya çıkmıştır. Ancak lifli betonda lif kullanım yüzdesi %2-3 olduğundan dolayı yetersiz kalmış ve yüksek oranda lif içeren SIFCON kompoziti üretilmiştir. SIFCON malzemesinin geleneksel betondan en önemli farkları yüksek oranda lif içermesi, iri agrega içermemesi ve hazırlanan çimento harcının yüksek dayanım verebilmesi için mineral katkı kullanılmasıdır. Mineral katkı olarak silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu kullanımı atık yönetimi ve çevre kirliliğini önleme açısından önem arz etmektedir. Ayrıca SIFCON'da atık agrega ve atık lif kullanımı da çevre dostu uygulamalar arasında gösterilebilir.

SIFCON'u geleneksel beton ve lifli betondan ayıran özelliklerinden biri olan yüksek oranda lif kullanımı; SIFCON'un enerji yutma kapasitesinde artışı sağlar. Çimento bulamacı içerisinde köprü görevi gören lifler, numune/yapı elemanı üzerine gelen yükü yayar.

Düktilite, malzemenin kopmadan önce çekme gerilimi altında plastik deformasyonu sürdürebilme derecesidir. Günümüzde sıkça kullanılan çelik lifler de oldukça sünek malzemelerdir, ayrıca çelik lifler basınç düktilitesi de gösterir. Çelik lifin kullanıldığı

malzemeler maksimum taşıma gücüne ulaşsa bile yük taşıyabilme özelliğine sahip olurlar. Çelik lifler kesme, burulma ve yorulmaya karşı da mukavemetlidir. Çelik liflerin kullanıldığı yapı elemanında yerleşme düzlemi davranışını da etkiler. Örneğin yükleme düzlemine dik yerleştirilen çelik lif basınç gerilmesine karşı etkin bir rol oynayamaz. En uygun sonucu alabilmek için liflerin her düzlemde ve homojen bir şekilde yerleştirilmesi önerilir (Arslan ve Aydın, 1999: 70).

Aydın (2019) yaptığı çalışmada betonun gevrek olmasını en büyük eksiği olarak belirtmiştir. Beton üzerine gelen yük sonrası kırılma anında düşük miktarda enerji sönümler, gevrek bir kırılma davranışı sergiler. Bu özelliği geliştirmek ve betonu gevrek bir malzemeden sünek bir malzemeye dönüştürebilmek için betona lif takviyesi yapılır. SIFCON'un keşfedilmesiyle birlikte kalıp içerisine önceden hacimce %20'lere kadar lif yerleştirilip üretilen yapı elemanlarında çekme dayanımında, enerji yutma kapasitesinde yüksek bir artış görülmüştür. Lifli betonda kullanılan lifin 10 katı kadar fazla lif kullanımı sayesinde yüksek tokluk ve düktilite sağlanır. Böylelikle SIFCON; yapı güçlendirmelerinde, endüstriyel zeminlerde, askeri yapılarda kullanım alanı bulur (Aydın, 2019: 1257).

Lifli beton uygulamasında lifler beton içerisine döküm öncesinde transmiksere eklenir. Transmikserde karışarak beton içerisinde lifler dağılır ve döküme hazır hale gelir. Ancak bu uygulamada lif oranının %3'ü aşmasıyla pompalama sorunları başlar. Özellikle lif boyutunun artmasıyla lifler transmikser içerisinde kümelenir ve beton dökümünü zorlaştırır. Bu durum liflerin beton içerisinde homojen dağılmasını engeller ve yapı elemanı üzerine gelen yükler karşısında dengesiz bir davranışa yol açar. SIFCON'da lifler kalıba önceden yerleştirilerek döküm öncesinde liflere müdahale edilmesini ve liflerin yönlendirilmesini sağlar. Böylece çimento bulamacı sorunsuz bir şekilde yerleştirilebilir (Scheneider, 1992: 180).

SIFCON, kalıba önceden yerleştirilmiş liflerin üzerine çimento bulamacının yerleştirilmesiyle elde edilen bir malzemedir ve bu nedenle üretim tekniği hassas uygulamalar içermektedir. Hazırlanan çimento bulamacı, kullanılan lif ve üretim tekniği konularında üzerine çalışmalar yapılarak geliştirilmeye açık bir alandır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Ülkemiz, tüketim ihtiyacı ve yaşam kalitesinin artmasına paralel olarak her geçen gün daha da gelişmekte ve bu gelişme inşa edilen yapılara da yansımaktadır. İlerleyen teknolojiyle birlikte bugün ülkemizde öncelikle nükleer santraller, askeri yapılar, havaalanı pistleri, demiryolları, köprüler ve tüneller olmak üzere birçok yapı inşa edilmektedir. Bu yapılar

kullanım alanlarının getirdiği bir zorluk olarak kullanım ömürleri boyunca darbe yükleriyle karşı karşıya kalmaktadır ve herhangi bir güvenlik sorununun meydana gelmemesi için darbe dirençlerinin üstün olmasına ihtiyaç duyulur. Ülkemizin jeopolitik konumundan dolayı zaman zaman güvenlik güçlerine yönelik terör saldırıları yaşanabilmektedir. Bu durumda yapılarda kullanılan betonun darbe dayanımı daha çok ön plana çıkmaktadır. Bu alanda bilimsel araştırmaların ve deneylerin yapılması oldukça önemlidir (Oltulu ve Altun, 2018: 156).

Şu an günümüzde birçok yapıda kullanılan geleneksel beton, gevrek doğası gereği üzerine gelen darbe yüküne karşı istenilen direnci sağlayamaz ve çatlak oluşumu kontrolsüz bir şekilde ilerleyebilir. Bu durum betonun performansını, kullanım ömrünü, kullanım amacını büyük ölçüde etkiler ve hasara neden olur (Yazıcı ve Sezer, 2008: 240). Betonun zayıf olan bu özelliğinin geliştirilmesi amacıyla yapılan araştırma ve çalışmalar büyük bir hızla artmıştır. Darbe dayanımının artırılmasına yönelik olarak lif ilavesi, mineral ve kimyasal katkı gibi birçok yöntem araştırılmaktadır. Her darbe dayanımını ölçen deney yöntemi kesin sonuç vermemektedir ve en uygun deney yöntemi belirlenmesi için yapılan araştırmalar devam etmektedir (Oltulu ve Altun, 2018: 156).

Artan araştırmalar ve deneylerle beraber betona mineral katkı ve lif takviyesi artmış, geleneksel betondan farklı olarak SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) adı verilen alternatif bir kompozit keşfedilmiştir. Bu çalışmada darbe yüklerine karşı SIFCON kullanımının mekanik özellikleri ne ölçüde etkilediği ve ortaya çıkabilecek problemlerin nasıl çözülebileceğinin araştırılması hedeflenmektedir. Çalışmada ilk olarak SIFCON ile ilgili literatürden elde edilen bilgi birikimi ve deneme yanılma yöntemiyle uygun karışım oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra kullanılan malzemelerin, lif oranlarının ve karışım oranlarının basınç ve eğilme dayanıma etkisi incelenmiştir. Bu incelemelere göre darbe dayanımında en iyi sonucu veren karışımların tespit edilmesi planlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda darbe dayanımına ihtiyaç duyulan alanlarda SIFCON malzemesinin kullanıma uygunluğu, kullanılan her bir malzemenin özelliklerinin ve kullanım oranlarının mekanik özellikleri ne yönde ve ölçüde değiştirdiği incelenmiştir. Lifsiz olarak üretilen referans betonun darbe yüklerine karşı direncinin en üst seviyeye çıkarılabilmesi için yeni karışım oranları ve yeni yöntemler önerilerek bu yöntemlerin darbe dayanımı özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada ulaşılan sonuçların, darbe yükleri ve SIFCON hakkında yapılacak daha ileri araştırmalar için temel teşkil edeceği düşünülmektedir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Hazırlanan tez çalışmasında bölüm 1’de yapı malzemelerinin öneminden, bu çalışmanın yapılış amacından ve literatür açısından öneminden bahsedilmiştir. Bölüm 2’de darbe dayanımına, darbeye dayanıklı betonun kullanımı ve tasarımına ve SIFCON yapı malzemesinin özelliklerine yer verilmiştir. Çalışmanın kapsamı darbeye dayanıklı bir malzeme olan SIFCON üretimi olduğu için SIFCON yapı malzemesinin mühendislik özellikleri ve bu malzemede kullanılabilecek lif çeşitleri daha çok incelenmiştir. Daha sonra darbe dayanımının tespiti, darbe dayanımına etki eden parametreler, lif kullanımının önemi, geleneksel beton yerine SIFCON kullanılmasının farklılıkları, SIFCON’un farklı lif içeriğinde, farklı sıcaklıklarda, farklı kür yöntemlerinde veya farklı mineral katkı kullanımlarında olan davranışı incelenmiştir. Literatürde daha önce bu alanda yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar incelenerek özet haline getirilmiş ve bu bölümde yer verilmiştir. Bölüm 3’te çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri detaylandırılmış, SIFCON karışım oranlarını bulmak için yapılan taze beton deneyleri anlatılmıştır. Daha sonra SIFCON matrisinin üretimi, önceden lif yerleştirilmiş kalıplara hazırlanan matrisin yerleştirilerek SIFCON üretiminin gerçekleştirilmesi, kalıptan çıkarılan malzemenin kürlenmesi, ardından uygulanan sertleşmiş beton deneyleri anlatılmıştır. Her bir aşamaya ait görsel teze eklenmiştir. Bölüm 4’te taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar irdelenmiştir. Bölüm 5’te bu çalışmadan elde edilen sonuçlar maddelendirilmiş ve bundan sonra yapılacak olan çalışmalara yol gösterilebilmesi amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. BETONUN DARBE ETKİSİNDE DAVRANIŞI

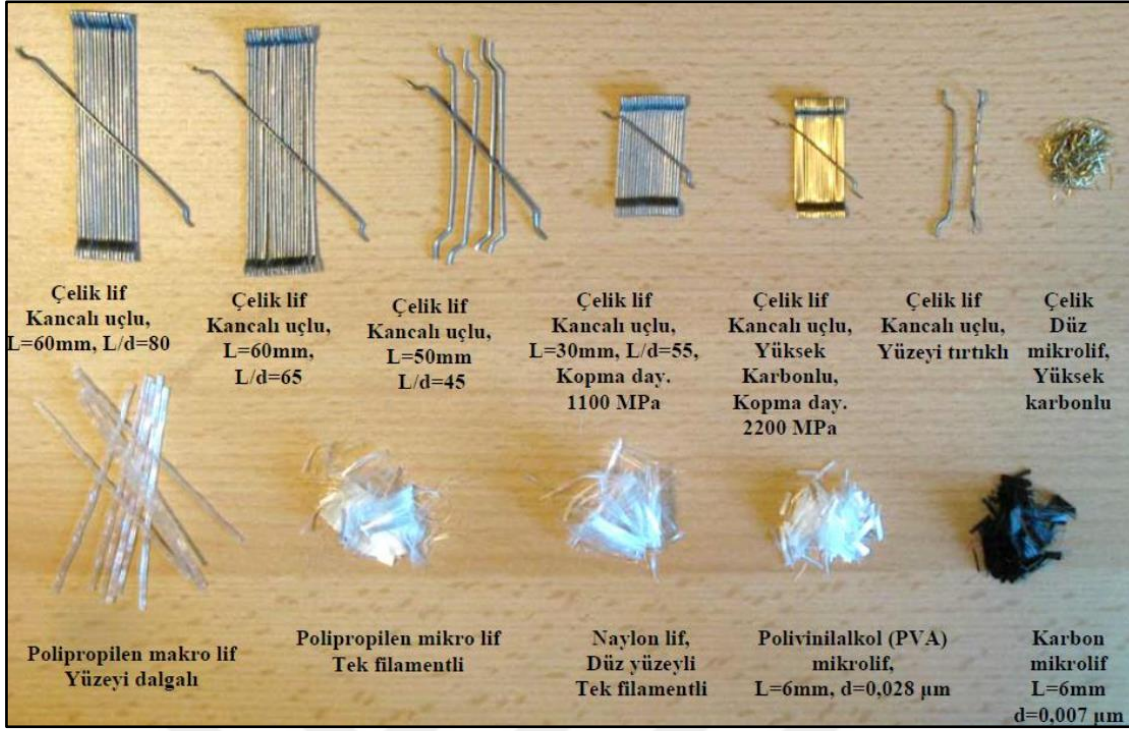
Darbe yükünün oluşabileceği alanlarda patlama, yüksek sıcaklık, ağır yük gibi etkilere karşın betonun üzerine gelen enerjiyi sönümlemesi istenmektedir. Örneğin savunma yapılarına dışarıdan gelebilecek patlama etkileri, nükleer santrallerde oluşabilecek patlama ve yüksek sıcaklık etkileri veya uçak pistlerinde oluşabilecek ağır yük etkileri altında betonun hasara uğramadan istenen kullanım ömrü içerisinde hizmet vermesi beklenmektedir. Betonun bu hizmeti verebilmesi için her ne kadar yüksek dayanımlı malzeme üretmek gerekse de yeterli olmamakta ve dışarıdan gelen enerjiyi absorbe edebilmesi için lif kullanımı gerekmektedir. Şu an günümüzde en çok çelik lif kullanılmakla beraber karbon lif, cam lifi, polipropilen lif ve bazalt lifi kullanımı da artmıştır. Geleneksel betona alternatif olarak üretilen lifli betonun daha da gelişmiş hali olan SIFCON'da hacimce %20'lere varan lif kullanımı gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada darbe dayanımına karşı dayanımlı olan SIFCON yapı malzemesi üretimi için kullanılabilecek malzeme ve yöntemler araştırılmıştır. SIFCON matrisinin yüksek basınç dayanımlı olması amacıyla silis dumanı kullanılmış, eğilme ve darbe dayanımlarını geliştirebilmek amacıyla da çelik lif ve polipropilen lif kullanılmıştır. Kullanılan karışım oranları bölüm 3'te detaylandırılmıştır.

Bu bölümde darbe etkilerinin hangi koşullarda karşımıza çıkacağı ve önemi, darbe dayanımına karşı SIFCON kullanımının önemi ve kullanılabilecek malzeme çeşitleri anlatılmış, literatür taraması yapılarak bu alanda daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Darbeye Dayanıklı Beton

Literatürde darbe dayanımının tanımı, betonlara ani olarak etkiyen tekrarlı dinamik yüklere karşı gösterilen direnç şeklindedir. Öncelikle yüksek sıcaklık, patlayıcı madde gibi etkilere maruz kalan yapılarda ve su yapıları, endüstriyel yapılar, hava alanı pistleri, kazıklar, demiryolu traversleri, askeri amaçlı yapılar, nükleer santraller gibi yapılarda darbe dayanımının beklentiyi karşılayacak şekilde oldukça üstün performans sergilemesi beklenmektedir (Yazıcı ve Sezer, 2008: 240).



Şekil 2.1. Betonda kullanımı yaygın olan lif çeşitleri

Kaynak: (Yardımcı, 2007, akt. Açıkgenç, 2015: 7)

Darbe dayanımının tespiti için uygulanan deneyler;

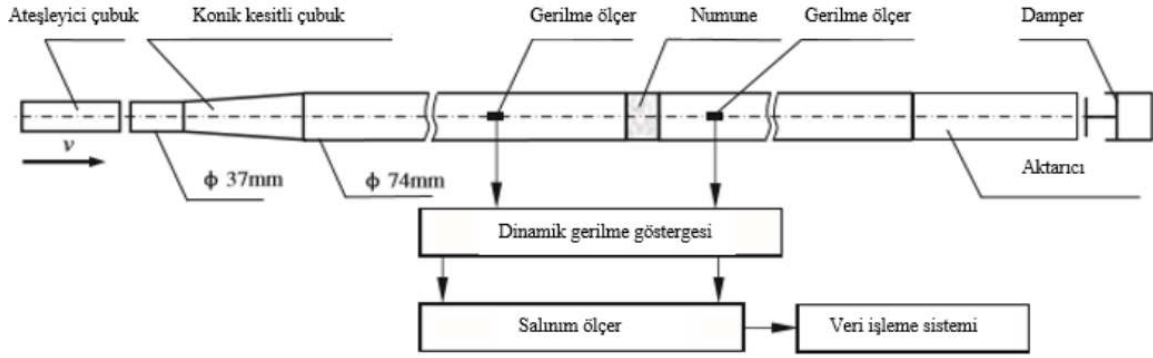
- Yüksek hızda mermi darbesi deneyi
- Ağırlık düşürme deneyi

2.1.1. Darbe Dayanımının Tespiti

Literatürde darbe dayanımını ölçmek amacıyla yapılan deneyler yüksek hızda mermi deneyi ve ağırlık düşürme deneyleridir. Uygulanabilecek deney yöntemleri geliştirilmeye açıktır.

2.1.1.1. Yüksek Hızda Mermi Darbe Deneyi

Darbe dayanımı ölçülmek istenen numuneye kinetik enerjisi belli olan cisim (mermi) fırlatılır ve numune üzerinde oluşan deformasyon kayda alınır (Xiao vd., 2015: 48).

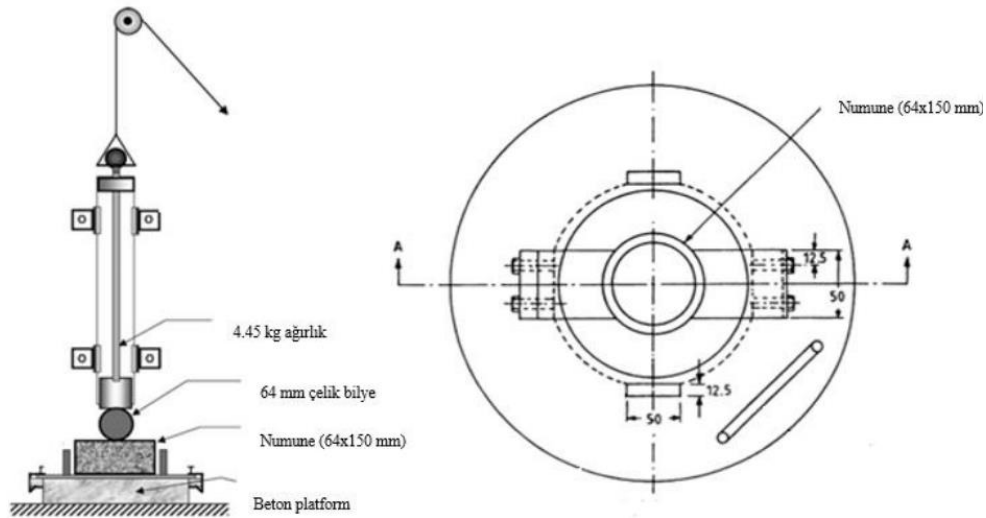


Şekil 2.2. Yüksek hızda mermi darbesi deney cihazı

Kaynak: (Xiao vd., 2015: 48)

2.1.1.2. Ağırlık Düşürme Deneyi

Ağırlık düşürme deney yöntemi ilkeleri ACI 544.2R standardında anlatılmaktadır. ACI 544.2R standardına göre disk şeklinde üretilen numune deney cihazında bulunan beton platforma yerleştirilir. Tekrarlı olarak 457 mm yükseklikten düşen ağırlık yükü çelik bilyeye, çelik bilye de numuneye iletir ve böylece numune üzerinde deformasyonlar oluşur. Cihaz ve kullanılan numune özellikleri şekil 2.5'te verilmiştir (Oltulu ve Altun, 2018: 157).



Şekil 2.3. Ağırlık düşürme deney cihazı

Kaynak: (Natajara vd., 2005, akt. Oltulu ve Altun, 2018: 158)

2.1.2. Darbe Dayanımına Etki Eden Parametreler

Kompozit bir yapı malzemesi olan beton; çimento, iri agreg, ince agreg, su, mineral / kimyasal katkı gibi birden çok malzemenin bir araya gelerek kimyasal reaksiyon oluşturmaları sonucu meydana gelir. Bu sebeple darbe dayanımının yüksek olmasını istediğimiz beton

içerdiği malzemelerle beraber birçok parametreden etkilenir. Ortam sıcaklığı, beton sıcaklığı, kullanılan deney yönteminin beraberinde getirdiği parametreler gibi dış ortama bağlı etkiler dışında iç yapısının bağlı olduğu parametreler de etki etmektedir. Bu parametreler arasında kullanılan karışım oranları, su/çimento oranı, agrega granülometrisi, kullanılan malzemelerin özellikleri, lif kullanılıyor ise kullanılan lifin özellikleri, kullanım oranı, geometrisi, narinlik oranı sayılabilir (Oltulu ve Altun, 2018:158).

2.1.2.1. Agrega Kullanımı

Literatürde belirtilen çalışmalara göre agrega çeşidi (kalker esaslı doğal agrega, bazalt esaslı doğal agrega, geri kazanılmış agrega) betonun darbe dayanımını doğrudan etkilemektedir. Bazalt ve kalker esaslı olmak üzere iki farklı agrega çeşidinin kullanıldığı Aliabdo vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada bazalt agrega kullanılan numunenin darbe dayanımı ve kalker agrega kullanılan numunenin darbe dayanımı karşılaştırılmış, bazalt agrega kullanımının mekanik özellikleri iyileştirmede daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Aliabdo vd., 2013, akt. Oltulu ve Altun, 2018: 158).

Literatürde geri kazanılmış malzeme kullanımına örnek olarak kauçuk kullanımı da bulunmaktadır. Bu malzemenin betonda kullanılmasıyla mekanik özellikleri ve darbe dayanımını ne ölçüde etkilediği yapılan çalışmalarda anlatılmaktadır. Al-Tayeb vd. (2013) yaptıkları çalışmada kauçuğu %10 ve 20 oranlarında, Khalil vd. (2015) yaptıkları çalışmada ise %10, 20, 30 ve 40 oranlarında kullanarak hazırladıkları beton numunelerinin darbe yüküne karşı gösterdikleri direnci gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak kauçuk kullanım oranı arttıkça betonun darbe dayanımının da buna paralel olarak arttığı belirlenmiştir.

Betonun darbe dayanımına agrega etkisinin araştırılmasında, kullanılan agrega tipinden farklı olarak maksimum agrega tane çapı da Yazıcı ve Sezer tarafından (2008) yapılan çalışmada ele alınmıştır. Deneylerde kullanılan en büyük tane çapını 10, 15, 20 ve 25 mm olarak belirlemişler ve bütün karışımlara %1,0 oranında çelik lif ilave etmişlerdir. Uyguladıkları deneylerden çıkan verilere göre en büyük agrega tane çapının 20 mm olduğu numuneler en iyi sonucu vermiştir (Al-Tayeb vd., 2013; Khalil vd., 2015; Yazıcı ve Sezer, 2008: 242).

2.1.2.2. Çimento Kullanımı

Beton karışım oranları tespit edilirken en çok dikkat edilen konu kullanılan çimento özelliği ve kullanım miktarıdır. Çimento seçimi yapıldıktan sonra optimum su/çimento oranı seçilir ki bu oran en başta basınç dayanımı için büyük önem arz eder. Su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır, aralarında ters orantı vardır. Basınç dayanımını etkileyen

parametreler darbe dayanımını da etkilediğinden su/çimento oranı artışı darbe dayanımını da düşürmekte ve bu sonuç literatürde yapılan deneylerle kanıtlanmıştır. (Nataraja vd., 2005; Zeynal ve Yazıcı, 2008; Nia vd., 2012; akt. Oltulu ve Altun, 2018: 159).

2.1.2.3. Mineral Katkı Kullanımı

Doğal ve yapay puzolanlar uzun yıllardır betonda mineral katkı olarak kullanılmaktadır. Mineral katkılar betonda fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirdiklerinden dolayı tercih edilirler. Günümüzde silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi yapay puzolanlar daha sık kullanılmaktadır. Basınç dayanımına etki eden parametrelerin darbe dayanımına da etki ettiği bilinmektedir. Basınç dayanımını arttırmada en üstün performans gösteren silis dumanının kullanımı darbe dayanımına daha çok etki edecektir.

Silis dumanının kullanıldığı malzemeye etkileri; çimento bulamacı ile agrega taneleri arasındaki aderansı arttırması, işlenebilirliği arttırması, durabiliteyi ve basınç dayanımını arttırması olarak sıralanabilir. Bu sebeplerden dolayı yüksek performanslı beton/harç üretiminde sıklıkla tercih edilen bir yapı malzemesidir. Ancak kullanımındaki en büyük sorun maliyetli olmasıdır, fiyatı çimento fiyatının yaklaşık 5 katı kadardır ve ulaşılması zordur. Yine de kullanım amacı dikkate alındığında performans iyileştirmesi açısından tercih edilen bir üründür (Massazza, 2000; Goldman ve Bentur, 1992; akt. Taşdemir vd., 2003: 78).

2.1.2.4. Lif Kullanımı

Lif ilavesi, mekanik özellikleri ve darbe dayanımını iyileştiren en etkili yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton içerisinde yer alan lifin betona gelen darbe yüklerini absorbe etmesi ve oluşan çatlakların betonun dağılmasını engelleyerek adeta bir köprü görevi üstlenmesi yapılan çalışmalarda lif kullanımının ilk akla gelen uygulama olmasına sebebiyet vermiştir.

Betonun darbe dayanımında en önemli parametre lif kullanımıdır. Kullanılan lif oranının kontrollü bir şekilde arttırılması darbe dayanımını da aynı oranda arttırmaktadır. Darbe dayanımında süneklik ve tokluk kavramları daha çok ön plana çıkmaktadır. Bu noktada lif kullanımı devreye girmektedir. Lif kullanımında; lif türü, lif kullanım oranı, lif geometrisi de etkilidir ve mekanik özellikleri farklı oranda etkiler. Örneğin betonda kullanılan çelif lifin geometrisi kenetlenme kapasitesinde etkilidir (Alkayış ve Başıyigit, 2021: 461).

2.2. Betonda Kullanılan Bazı Lif Türleri

2.2.1. Karbon Fiber Lif

Karbon fiber yapı malzemesi karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğunun keşfedilmesinden sonra üretime geçmiştir. Kullanılan lifin sertliğinin artırılması istenen bir özellikti ancak cam lifi bu konuda yetersiz kalıyordu, böylece cam lifi sertliğinden 3-5 kat fazla sertliğe sahip lif arayışına girilmiştir. Granit elyafı, karbon elyafının çok yüksek ısı işlem uygulanması sonrası karbonlaşmasıyla elde edilir. Önceden granit elyafı ve karbon elyafı farklı malzemeler olarak karşımıza çıksa da günümüzde ikisi de aynı yapı malzemesini ifade etmektedir. Karbon elyafı, epoksi matrisler ile bir araya geldiğinde üstün durabilite ve sertlik performansı verir. Piyasada bulunan karbon fiber üreticileri teknoloji ve ihtiyaçların sürekli değişmesiyle beraber karbon lifleri de geliştirmektedir. Karbon elyafı üretimi yüksek maliyet gerektirdiğinden dolayı pahalıdır ve piyasada çok sık kullanım alanına sahip değildir. Uçak sanayi, uzay sanayi, otomobil sanayi, tıbbi malzemeler gibi yüksek öneme sahip alanlarda karbon elyafı kullanılmaktadır.

Karbon elyafının piyasada kullanım biçimleri;

Sürekli Elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle birlikte kullanılabilirler.

Kırılmış Elyaf: Çoğunlukla enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen malzemeler üstün korozyon ve yorgunluk dayanımı ile birlikte yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

Karbon elyafının üretim prosesi;

Karbon elyafı genelde iki malzemedен elde edilir. Bu malzemeler zift ve poliakrilonitril (PAN)'dir.

Ziftten elde edilen karbon elyafı poliakrilonitrilden elde edilen karbon elyafa göre mekanik özellikler bakımından daha düşük performans sergilemektedir. Bundan dolayı yapısal uygulamalarda kullanımı tercih edilmez. Poliakrilonitril tabanlı karbon elyafının daha da sağlam ve hafif olmaları için yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Karbon elyafının diğer elyaflara göre en büyük ve en önemli artışı yüksek modülüs özelliğine sahip olmasıdır. Karbon elyafı yeryüzünde bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak kıyaslandığında en sert malzemedir (Mert, 2007: 23).

2.2.2. Cam Lifi

Cam elyafı yapı malzemesi soda, silika, kolemanit, alüminyum oksit gibi üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en çok bilinen ve en çok kullanılan elyaf çeşididir. Cam elyafı özel olarak tasarlanan ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın çıkarılmasıyla üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak dağıtımına çıkarılır. Ayrıca cam elyafı ile matris arasında yapışma gücünü arttırmasından dolayı silan bazlı ve elyaf üzerinde ince katman oluşturan kimyasalların kullanım alanları günümüzde artış göstermiştir.

Elyaf lar üretim sırasında dayanıklılıklarının %50 kadarını kaybederler, ancak yine de sağlamlıkları oldukça yüksektir. Cam elyafı günümüzde hala aramid ve karbon elyaf larına kıyasla yüksek durabilite özelliklerine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyaf ının lifleri ile üretilmektedir. Farklı türde cam elyaf ı üretimi, uygulanan işlemler sırasında gerekli kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile mümkün olabilmektedir.

Farklı türde cam elyaf larına örnekler aşağıda verilmiştir;

A Cam Elyaf ı: En çok kullanıldığı alanlar pencere ve şişelerdir. Kompozitlerde kullanımı çok tercih edilmez.

C Cam Elyaf ı: Kimyasal direnci yüksektir. Kullanım alanı depolama tanklarıdır.

E Cam Elyaf ı: Takviye elyaf ları arasında en çok tercih edilen çeşididir. Özellikleri arasında düşük maliyet, yüksek yalıtım ve düşük su emme oranı sayılabilir. E cam elyaf türü üretimi Türkiye’de Şişecam Grubuna bağlı olan Cam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından gerçekleştirilmektedir. Firma, yurt içi ve yurt dışı pazarlarında yüksek oranda satışa sahiptir. Ürünler hem doğrudan firmadan hem de anlaşmalı olduğu bayilerden temin edilebilmektedir. Avrupa’nın önemli elyaf üreticilerinden biri olan firma 1976 tarihinden günümüze kadar faaliyetlerini sürdürmektedir.

S + R Cam Elyaf ı: Performans açısından üstün özelliklere sahiptir, bu durum maliyetlere de yansımıştır. Kullanım alanı sadece uçak sanayidir. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam’ın yarısı kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlaşır. Böylece birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir.

Elyaf sarma biçimleri cam elyaf ının kullanım amacına bağlı olarak değişebilmektedir. Elyaf çapı ve beraber sarılan lif sayısı farklılık gösterebilir. Cam elyaf ı üretildikten sonra yıpranmaya karşı direncinin artması amacıyla kimyasal maddelerle elyafa kaplama işlemi

uygulanır. Kaplama için kullanılan kimyasal madde genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla çıkarılabilen ve suda çözülebilen polimer olarak tercih edilir. Elyaf ve reçinenin birbirine yapışması malzeme bütünlüğü açısından önem arz etmektedir. Oluşan kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlığını matris ve takviye malzemesi arasındaki yapışma oranı belirler, ne kadar iyi yapışma sağlanırsa o kadar iyi performans elde edilir (Mert, 2007: 21).

2.2.3. Çelik Lif

Düşük karbonlu çelik olan C 1008'in birtakım işlemlerden geçirilmesiyle çelik lif üretimi gerçekleştirilir. Çelik lifin en öne çıkan özelliği yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama göstermesidir. Çekme gerilmesi ortalama 1200 MPa'nın üzerinde ve elastik limitleri %0,2'nin altında tespit edilmiştir (Topçu, 2006, akt. Kozak, 2013: 28).

Betona katılan lifler incelendiğinde en çok kullanılan tür çelik liftir. Çelik lifin bu kadar tercih edilme sebebi; çeliğin beton ile olan uyumunun iyi olması, kullanımda kolaylık sağlaması, yüksek tokluk değerine sahip olması, statik ve dinamik yüklere karşı yüksek direnç göstermesi ile ilgilidir. Elde edilen ürünler ÇLTB (çelik lif takviyeli beton) veya MLTB (metal lif takviyeli beton) olarak isimlendirilir. Aynı uzunluğa sahip cam ve polimer lifler ile karşılaştırıldığında daha kalın ve sert özellik gösterir. Dairesel kesit halinde üretilen çelik liflerin çapları 0.2-1.00 mm arasında, uzunlukları 20-60 mm arasında değişmektedir (Bulutlar, 2006: 10).

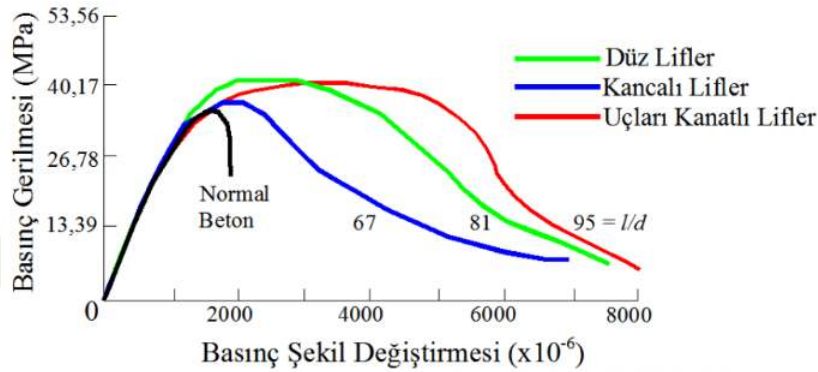
Çelik teller ilave edildiği betonun hem yüzeyinde hem kenarlarında homojen bir şekilde dağılır. Betonun sertleşmesi esnasında meydana gelen hidrasyon süreci malzeme içinde birçok küçük boşluklara ve çatlaklara sebep olur. Çelik teller, beton içerisinde oluşması beklenen çekme gerilmelerine karşı direnç gösterir. Böylece rötre çatlakları beton daha sertleşmeden önlenmiş olur (Taşdemir vd., 2003: 81).

Plastik şekil değiştirme yeteneği, metallerin en önemli özelliklerinden biri olarak kabul edilir. Bu nedenle çelik lifler üretilirken gerek basit gerekse karmaşık birçok şekilde üretim yapılabilir ve kullanılabilir (Chawla, 1998, akt. Bulutlar, 2006: 11).

Yüksek dayanımlı betonda karşılaşılan gevreklik sorunu, sünek bir davranış sergileyen çelik lifler ile çözülür (Bulutlar, 2006: 12).

Yapısal uygulamalarda betonda çelik lif kullanımı; betonun dinamik yüklere ve darbe yüküne karşı dayanımının artırılması ve malzemenin aşınma, deformasyona uğrama gibi sorunları önlemek için tercih edilir.

Kolon, kiriş, döşeme gibi yapı elemanlarında basınç, eğilme ve çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Meydana gelen basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerinin neden olduğu gerilmelerden dolayı yapı elemanlarında kullanılan donatı ile beraber çelik lif kullanımı yapı elemanının dayanımını büyük ölçüde artırır (Kozak, 2013: 30).



Şekil 2.4. Geleneksel betonun ve çelik lif donatılı betonların gerilme-şekil değiştirme eğrileri

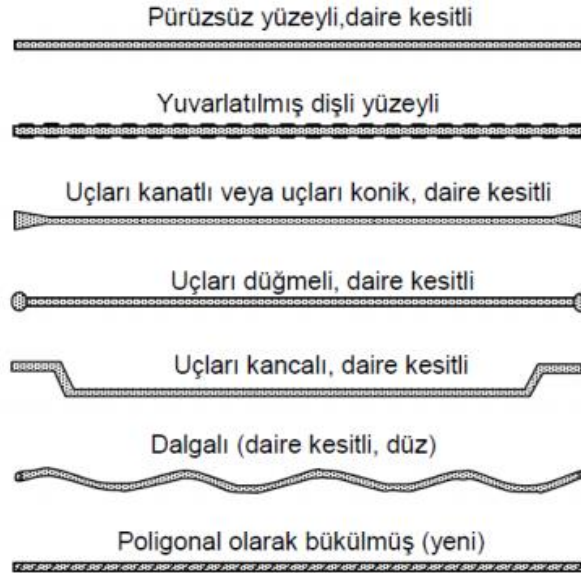
Kaynak: (Shah vd., 1978, akt. Açıkgenç, 2015: 22).

Çelik lifler farklı formlarda üretilebilir ve beton içerisinde farklı davranışlar sergileyebilir. Örneğin kancalı uçlu lifler, içerisinde bulunduğu beton ile bütünleşir ve betondan sıyrılması için büyük bir kuvvet gerekir, yani sıyrılma kuvvetini artırılmış olur. Düz lifler beton içerisinden direkt sıyrılırken, kancalı uçlara sahip lifler beton içerisinden sıyrılmadan önce kanca şeklinde olan uçları eğilerek düzleşir. Bu düzleşme için normalde gerekenden daha büyük kuvvet gerekir, bu da kanca uçlu çelik lif donatılı betonun çekme dayanımının artması demektir. Bu mekanizma maksimum sıyrılma kuvvetini yaklaşık olarak %50 artırır. Gereken sıyrılma kuvveti artışı daha fazla enerji yutulmasına sebep olur, tokluk artar (Grünwald, 2004, akt. Açıkgenç, 2015: 42).

Çelik lifli betonun duktilitesi normal betona göre oldukça yüksektir. Bu nedenle çelik lifli beton çarpma, titreşimli yük, dinamik yük, darbe yükü etkilerine bakıldığında geleneksel betondan daha avantajlıdır. Çelik lifli betonların, geleneksel betonlara kıyasla göstermiş oldukları belirgin avantajlar ve üstün performanslarından dolayı kullanım alanları geniştir (Kozak, 2010, akt. Kozak, 2013: 30).

Çelik lif donatılı beton; patlama, çarpma ve dinamik yüklemelere karşı dayanım, dayanıklılık ve bu yükler altında enerji absorbe edilmesi konularında geleneksel betona kıyasla daha üstün performans gösterir. Farklı tip çelik lifler için uygulanan deneyler sonucunda, çelik lif donatılı beton dinamik yüklemeler altında geleneksel betona göre 3-10 kat daha fazla dayanım göstermiştir. Normal dayanım sınıfına sahip betonlarda, çelik lif donatılı betonun darbeli eğilme yüklemesi altında ulaştığı en üst seviye yükün, lifsiz betona göre en az %40 artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Darbe dayanımını ölçmeye ve karşılaştırmaya dayalı çalışmalarda çoğunlukla şu iki özellik karşılaştırılır: Lif içermeyen kontrol betonu ile çelik lif donatılı betonun mukavemetinin karşılaştırılması veya dinamik yükleme ile statik yükleme altında ortaya çıkan sonuçların karşılaştırılması.

Çelik lif donatılı betonda kullanılan lif tipi, dinamik yükler altındaki davranışa ve darbe dayanımına etki eder. Dinamik yük altındaki davranışa kullanılan lifin geometrisi ve matris özelliklerine bağlı olarak değişen lif-matris ara yüzeyi özellikleri de etkilidir. Matrisin dayanımı ne kadar artarsa darbe yüküne karşı gösterilen direnç de o kadar artar (Williamson, 1965; Robins ve Calderwood, 1978; Suaris ve Shah, 1984; ACI 544.4R, 1999; ACI 544.1R, 2002; Song vd., 2004; ACI 544.1R, 2002; Nataraja vd., 2005; Nia vd., 2012; Tran ve Kim, 2013; akt. Açıkgenç, 2015: 32).



Şekil 2.5. Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik yüzey şekilleri

Kaynak: (Naaman, 2003; akt. Açıkgenç, 2015: 8)

Çelik liflerin SIFCON yapı malzemesinde kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Sünekliği ve taşıma kapasitesi yüksek beton elde edilmesi,
- Düzgün yüzeyli ve donatı korozyonunun oluşmadığı beton elde edilmesi,
- Etkin çatlak kontrolünün sağlanması,
- Durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Donatı işçiliğinde belirgin azalma sağlanması.

Piyasada yüksek kullanım oranına sahip çelik lifler endüstriyel zemin betonları ve tünel uygulamalarının yanı sıra aşağıda belirtilen prefabrike elemanların üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır;

Muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, mono blok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletler (Taşdemir vd., 2003: 81).

2.3. SIFCON

SIFCON (çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton); çimento esaslı, içerisinde çelik lif bulunduran kompozit bir yapı malzemesi olarak tanımlanır. SIFCON; çimento, su, puzolan ve çok ince kumdan oluşan bulamacın bir matris içerisinde hacimce %20'lere kadar çıkabilen yüksek oranda çelik tel ile bir araya gelmesiyle elde edilen yüksek süneklik oranına sahip bir yapı malzemesidir (Rao vd., 2010; Yalçınkaya vd., 2013; akt. Canbaz ve Ünüvar, 2015: 400).

SIFCON, yüksek dayanımlı beton ile karşılaştırıldığında kırılma esnasında sünek davranış gösterir ve bu kendisini geleneksel betondan ayıran en önemli farktır (Bayrak vd., 2019: 411).

SIFCON üretiminde kullanılan çelik lifler; farklı uzunluk, çap veya geometrik şekillere sahip olabilir. SIFCON içerisinde bulunan çelik lifler bulamaç içerisinde her yerde eşit olacak şekilde dağılır. Betonda oluşabilecek çekme gerilmelerine çelik lifler karşı koyar, rötre

çatlakları oluşumunu ve gelişimini kontrol altına alırlar. Çelik lif, beton içerisinde oluşan çatlak ucunda köprü kurarak çatlağın ilerlemesini yavaşlatır ve malzeme üzerine gelen yükün büyük bir kısmını üzerine alır. Matris çatladığı andan itibaren yük liflere aktarılır ve lif miktarı yeterli miktarda ise malzemenin taşıma kapasitesi artar. Mikro lifler çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar ve elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro lifler ise elastisite modülünü, çekme ve eğilme ard-dayanımlarını iyileştirirler. Makro lifler makro çatlakları kontrol ederler ve en büyük yük sonrasında matrisin davranışını iyileştirirler (İpek vd., 2015, akt. Canbaz ve Ünüvar, 2015: 400).

Su/çimento oranının değişimine paralel şekilde SIFCON'un kırılma enerjisi de değişir. SIFCON, geleneksel beton ile karşılaştırıldığında kırılma enerjisi yaklaşık 300 kat, çekme dayanımı 15 kat fazla olabilmektedir. SIFCON'da kullanılan lif artışı ile doğru orantılı olarak dayanım, dayanıklılık, enerji emme kapasitesi, tokluk, Poisson oranı artar (Farnam vd., 2010, akt. Canbaz ve Ünüvar, 2015: 400).

SIFCON'un mekanik özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Yüksek tokluk
- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek eğilme mukavemeti
- Yüksek basınç mukavemeti
- Yüksek kesme mukavemeti

SIFCON'un bazı kullanım alanları;

- Patlama ve darbe etkisine maruz kalabilecek elemanlarda
- Enerji emme kapasitesi yüksek özel yapıların inşasında
- Havaalanı pistleri ve çok ağır yükler bulunan depolama alanlarında
- Hasarlı yapıların tamiri ve güçlendirilmesinde

SIFCON yapı malzemesi yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği direnç ile bilinir ve bu sebeple yangın ve patlamanın olduğu savunma amaçlı askeri yapılarda kullanılabilir (Aydın, 2019: 1257).

Yüksek sıcaklıkların SIFCON'a ne yönde etki ettiğine bakıldığında 100 C°'de kılcal boşluklardaki su buharlaşarak betonu terk etmekte, jeldeki ve hidratlardaki bünye suyu ise sıcaklık 300 C° değerine yükseldiğinde buharlaşmaya başlamaktadır. Buharlaşan su, betonda

yüksek oranda büzülme oluşmasına neden olur, ayrıca iç yapıda buhar basıncı oluşur. Sıcaklık 300 C° üzerine çıkmaya başladığında beton içerisindeki alüminli ve demir oksitli bileşenler dehidrate olmaya başlamakta, 400 C° değeri aşıldığında oluşan reaksiyonlarda ise $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bileşiği CaO 'e dönüşmeye başlamakta ve en son sıcaklık 600 C° çıktığında C-S-H yapısı hızla bozulmaktadır (Baradan vd., 2010, akt. Aydın, 2019: 1257).

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunede nem içeriğindeki artış buhar basıncının artmasına neden olmaktadır. Betonda mineral katkı olarak silis dumanı tercih edilmesi sonucunda matris içerisindeki boşlukta azalma ve çaplardaki daralma nedeniyle özellikle yüksek dayanımlı betonlar patlayarak parçalanabilmektedir. Bu nedenle, SIFCON yapı elemanlarının yüksek sıcaklık gibi etkilere karşı tüm yüzeylerinin pas payına benzer bir koruyucu harç tabakası ile kaplanması önerilmektedir. Ayrıca bu uygulama ile birlikte korozyon da önlenabilmektedir (Aydın, 2019: 1257).

SIFCON uygulamasının bazı avantajları;

- SIFCON, içerisinde bulunan liflerin etkisiyle eğilme dayanımı yüksek yapıya sahip bir beton oluşturur
- Darbe dayanımına ve patlama etkilerine karşı üstün performans göstermesi sayesinde koruma duvarlarında ve askeri binalarda kullanıma uygundur
- Köprü, konut, hastane, okul gibi birçok farklı hasarlı yapının güçlendirilerek en kısa sürede kullanıma hazır hale gelmesini sağlar
- Su/bağlayıcı oranı düşüktür ve malzemenin geçirimsizliğini dolayısıyla dayanıklılığını artırır
- Donatı işçiliğinde azalma ve kolaylık sağlar
- SIFCON'da bulunan yüksek orandaki lifler sayesinde etkin bir çatlak kontrolü sağlanır
- SIFCON disiplinli ve sistemli bir çalışma ile birlikte seri üretim imkânı sunar

SIFCON uygulamasının bazı dezavantajları;

- SIFCON'un üretim tekniği ve uygulaması özel bir yöntem gerektirdiğinden zor bir üretim süreci vardır

- SIFCON'da kullanılan malzemeler üstün özelliklere sahip olduğundan dolayı geleneksel betona göre daha maliyetlidir
- SIFCON bulamacını oluşturan malzemeler çok ince olduğundan üretilen numune kalıplarının sızdırmazlık özelliğine sahip olması gerekmektedir
- SIFCON bulamacının kalıba önceden yerleştirilmiş yoğun lifler arasından yerleşebilmesi için akıcı kıvamda ve dayanım özelliklerinin yüksek olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir
- SIFCON elemanları onarım ve güçlendirme işlemlerinde kullanıldığında taşıyıcı eleman ile bütünlüğünü sağlayabilmesi amacıyla özel yapıştırıcı malzemeler gerektirir ve maliyetin yüksek çıkmasına neden olur (Kılı, 2018: 7).

SIFCON üretim tekniği diğer geleneksel yüksek dayanımlı betonlardan farklılıklar göstermektedir. Teknolojinin gelişmesi ve ileri mühendislik özelliklerinin ortaya çıkmasıyla üretim teknikleri de değişmiştir. Liflerin önceden kalıba dizilmesiyle üretilen SIFCON'da kullanılan lif oranı hacimce %20'lere çıkabilmekte ve ilerleyen zamanlarda daha fazla gelişmeye açık bir malzeme olarak kendini göstermektedir.

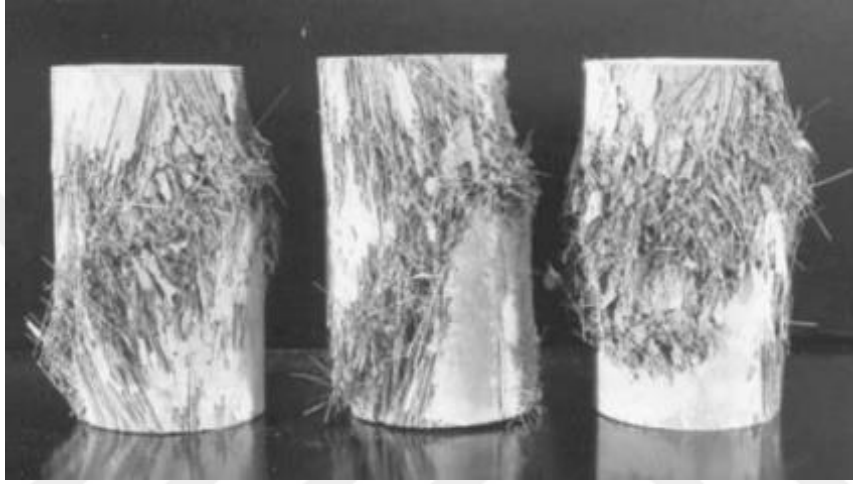
Üretim tekniği temel olarak şu şekilde sıralanmaktadır;

- Kullanım oranına göre tartılan liflerin önceden hazırlanmış kalıplara yerleştirilmesi
- Çimento ile birlikte mineral katkı olarak kullanılacak puzolanın karıştırılması
- Elde edilen karışıma ince agreganın ilave edilip karıştırılması
- Su ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkının farklı bir kapta karıştırılması
- Su ve akışkanlaştırıcı karışımının kuru karışıma eklenerek karıştırılması
- Bulamacın önceden lif yerleştirilmiş kalıplara yerleştirilmesi ve vibrasyonu (Balaguru ve Shah, 1992, akt. Bulutlar, 2006: 10).

2.3.1. SIFCON'un Mühendislik Özellikleri

Çelik lif ilave edilmiş çimento esaslı kompozit malzemelerde betonun kırılma mekanizması farklıdır. Bu kompozitlerde ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik liflere doğru bir gerilme aktarımı oluşur. Bunun sonucunda beton içerisindeki kullanım oranlarına ve geometrik özelliklerine bağlı olarak bulunan çelik lifler, bu gerilmelerin bir

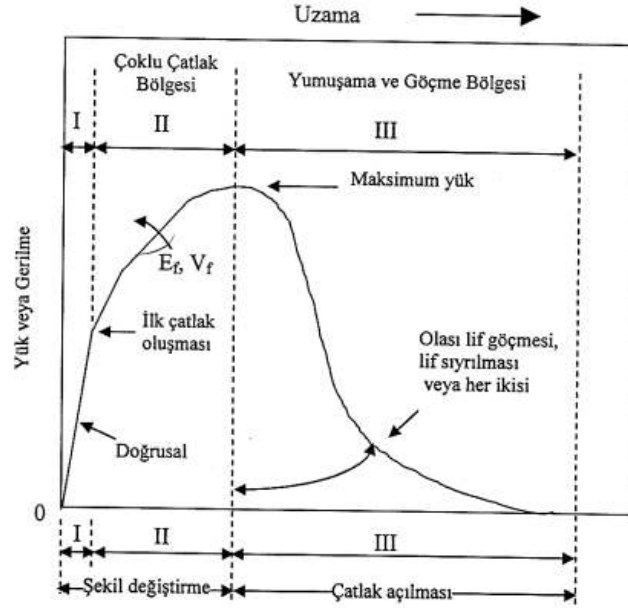
kısmını da matrisin sağlam bölgelerine aktararak yayarlar. Matris, maruz kaldığı yüklere karşı dayanım göstermeye çalışır ve zorlanır, taşıma kapasitesini geçen değerden sonra en zayıf bölgesinde çatlaklar oluşumu gözlenir. Matris; rijit, boşluksuz ve yoğun bir özelliğe sahip olması durumunda üzerine gelen yükü liflere aktarır. Bu sırada beton içerisinde kullanılan lif miktarı yeterli seviyedeysse, lifler yükün tamamını alarak ortaya çıkabilecek enerjiyi sönümler. Böylece çatlamamış beton bölümleri arasında adeta bir köprüleme yapılmış olur, beton bir bütün olarak çalışır. Liflerin bu davranışından üstün performans ve yüksek oranda verim alınmış olunur (Bulutlar, 2006: 25).



Şekil 2.6. Basınç deneyi uygulanmış, yüksek oranda çelik lif içeren SIFCON numuneleri

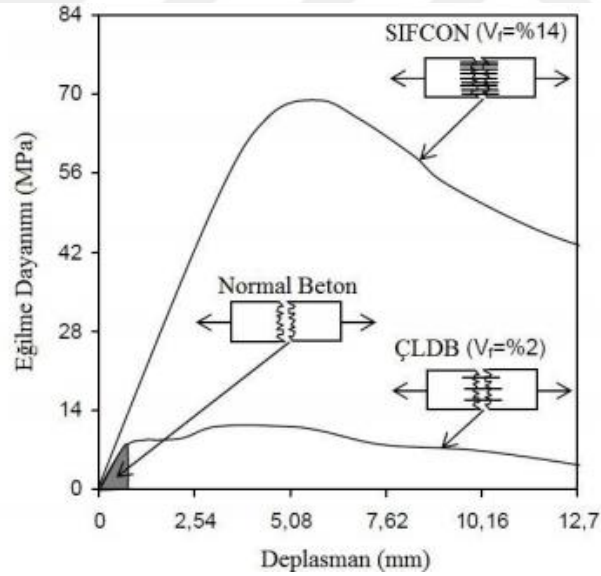
Kaynak: (Mehta ve Monteiro, 2006, akt., Açıkgenç, 2015: 14)

SIFCON içerisinde bulunan çelik tel kullanım oranı gerilme-şekil değiştirme veya yük-sehim davranışını açısından oldukça mühim bir parametredir.



Şekil 2.7. SIFCON'un çekme yüküne karşı gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Kaynak: (Köksal, 2004, akt. Bulutlar, 2006: 26)



Şekil 2.8. Eğilme yükü altında normal beton, çelik lif donatılı beton ve SIFCON'un gerilme-şekil değiştirme davranışı

Kaynak: (Naaman, 1992; Yalçın, 2009, akt., Açıkgenc, 2015: 14)

SIFCON, çelik tel donatılı betonlarla kıyaslandığında süneklik özelliği, eğilme dayanımı, tokluk açısından üstün performans sağlar ve istenilen mühendislik özelliklerini iyileştirir (Naaman, 1991, akt. Bulutlar, 2006: 26).

2.3.1.1. SIFCON'un Basınç Dayanımına Karşı Davranışı

SIFCON'un basınç yükü etkisindeki davranışı içerdiği lif hacmine, liflerin matris içerisindeki dağılımına, matris mukavemetine, üretim tekniklerine ve lif geometrisine bağlı olarak değişiklik gösterir. Basınç mukavemeti betonun istenilen diğer tüm özellikleriyle paralellik gösterir. Yüksek basınç mukavemetine sahip bir beton doludur, serttir, dış etkilere karşı dayanıklıdır, su geçirmez.

SIFCON'un basınç mukavemetini, kullanılan lifin özellikleri ve matris karışım oranları büyük bir ölçüde belirler. Öte yandan çelik lif kullanım miktarı basınç mukavemetini arttırmada önemli bir artış sağlayamaz, liflerle sağlanan mukavemetin bazı özel durumlarda %25'i geçtiği gözlemlenmiştir.

Basınç yüküne tabi tutulan SIFCON numunelerinde kullanılan lif hacminden ziyade liflerin kalıp içerisinde yerleştirilme yönlerinin daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Basınç yüklemesi altındaki silindir numunelerde çatlaklar çap boyunca genişlediğinden dolayı, yükleme eksenine dik olarak yerleştirilen lifler basınç dayanımına pozitif yönde etki eder. SIFCON'da liflerin kalıba yerleştirilmesi, vibrasyon süresi önemli parametrelerdir.

Matris kompozisyonunun iç yapısı, dayanım ve enerji absorbe etme kapasitesine farklı yollarda etki eder. Bunlardan ilki lif malzemesi ile matris arasında oluşan bağdır. Bu sırada üretimde SIFCON matrisinde kullanılan çok ince taneye sahip puzolanın liflerle daha iyi bir bağ oluşturması ve etkinliği arttırmasıdır. İkincisi ise gevrek bir yapıya sahip olan matristir, SIFCON'un iç yapısında önemli bir etkiye sahiptir. SIFCON, farklı üretim tekniği, karışım oranları ve yapısında bulundurduğu yüksek lif oranı ile birlikte normal betonlara göre çok daha sünek, enerji absorbe etme kapasitesi yüksek bir malzeme olarak günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

SIFCON'un basınç yükü altındaki davranışı en kısa haliyle açıklanacak olursa; SIFCON'u oluşturan matris fazının basınç dayanımı ne kadar yüksekse mekanik özellikleri, dayanımı, dayanıklılığı, deformasyonu için gereken enerji de o kadar yüksek olur. SIFCON'da kullanılan çelik lifler; malzemenin sünekliğini ve enerji absorbe etme özelliğini arttırmayı ilk çatlak oluşumundan sonra bırakmaz, malzeme pik yükünü alana kadar devam eder (Bulutlar, 2006: 28).

2.3.1.2. SIFCON'un Çekme Dayanımına Karşı Davranışı

Yapılan çalışmalarda beton çekme dayanımı basınç dayanımından daha düşük sonuçlar vermektedir, bunun sonucu olarak betonun çekmeye çalışmadığı yapılan statik hesaplarda dikkate alınır. Yapı elemanlarının donatı hesabında çekme gerilmesinin en çok oluşacağı bölgelerde daha fazla donatı kullanılır, böylece çekme gerilmesi büyük oranda donatı tarafından karşılanır. Donatı çelik malzemeden oluşur ve çelik, şekil değiştirme kapasitesi yüksek, sünek davranış gösteren bir yapıdadır. Bu özellikleri sayesinde çekme yüküne karşı tercih edilir. Aynı düşünce SIFCON malzemesi için de geçerliliğini korumaktadır. Liflerin SIFCON üretiminde kalıba önceden yerleştirildiği ve kalıba yerleştirilme yönünün malzeme üzerine gelen yükleri karşılayabilme açısından önemli olduğu bilinmektedir. Liflerin kalıba en çok çekme gerilmelerinin oluşacağı yönde yerleştirilmesine dikkat edilmelidir, bu sayede liflerden elde edilebilecek en büyük verim alınmış olur. SIFCON, geleneksel beton veya yüksek dayanımlı beton gibi farklı beton türleriyle karşılaştırıldığında üretim tekniğinin farklılığı sayesinde ön plana çıkar. Örneğin çelik lifli betonda lif oranı yüzdesi azdır ve beton karışım aşamasındayken ilave edilir. Bu aşamadan sonra life hiçbir şekilde müdahale edilemez. Fakat SIFCON'da bu durum farklıdır. Lifler önceden hazırlanan kalıplara karışım ilave edilmeden elle yerleştirilir. Bu sayede betonarme elemanlarda donatı planının ayarlanması gibi SIFCON'da lifin numune içerisinde homojenliğine veya yerleşim yönüne karar verilebilir. Lifler, yükün numuneye geldiği yöne paralel şekilde dizilirse dayanım artışı da sağlanabilmektedir.

SIFCON malzemesinin çekme dayanımı, içerisinde bulunan lifler sayesinde tek başına matrisin sahip olduğu çekme dayanımından yaklaşık olarak iki kat daha fazladır. Malzemelerin çekme dayanımını lif hacmi, lif tipi, lif geometrisi gibi parametreler değiştirebilmekte ve SIFCON için istenen özelliklere göre lif seçimi buna göre yapılmalıdır (Bulutlar, 2006: 29).

2.3.1.3. SIFCON'un Eğilme Dayanımına Karşı Davranışı

SIFCON, eğilme yükü altında üstün bir performans gösterir ve bu özelliği sayesinde öne çıkar. Günümüzde inşa edilen yapıların neredeyse tamamında taşıyıcı elemanlar eğilme yüküne maruz kalır. SIFCON yüksek oranda lif içerebilme kapasitesine sahiptir ve bu özellik eğilme dayanımının da yüksek olmasını sağlar.

Matris yapısı, karışım oranları, numune boyutları, kullanılan lif çeşitleri, lif kullanım yüzdeleri, lif geometrisi, lif yerleşim yönü, deney koşulları eğilme dayanımını etkileyen önemli parametrelerdir.

SIFCON eğilme dayanımı geleneksel beton ile karşılaştırıldığında çok daha fazla yüksek değerlere sahiptir. Yapılan araştırmalar sonucunda SIFCON'da tek çeşit lif kullanıldığında lif kullanım yüzdesi arttıkça eğilme dayanımının da buna doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu artış belirli bir sınır değerine kadardır. Lif miktarı, söz konusu sınır değerini aştığında çıktığında lif ve matris arasındaki etkileşim azalacağından eğilme dayanımı da azalacaktır.

SIFCON, diğer lifli betonlardan daha fazla eğilme dayanımına sahiptir, bu özelliği bünyesinde yüksek oranda lif içerebilmesinden kaynaklanır. SIFCON'un gerilme-birim şekil değiştirme grafiği incelendiğinde çok kısa bir bölümde lineer elastik davranış sergilerken, pik noktasında numunede önemli deformasyonlar meydana getirerek bu derece yüksek yükler altında maksimum yüke çok yakın değerlerin karşılanabildiğini ispatlamaktadır (Bulutlar, 2006: 29).

2.3.1.4. SIFCON'un Darbe Dayanımına Karşı Davranışı

Darbe dayanımı, betona ani olarak uygulanan bir yüke karşı gösterilen direnç olarak ifade edilir. SIFCON'un mühendislik özellikleri geleneksel betona göre çok üstündür. Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi darbe yüklerine karşı mukavemeti de yüksektir (Bulutlar, 2006: 30).

SIFCON içerisinde bulunan yüksek orandaki lifler sayesinde numune üzerine gelen darbe enerjisini sönmeler ve minimum düzeyde deformasyon oluşmasını sağlar. Bu sebeple darbe etkisi altında kalabilecek yapılarda geleneksel betona kıyasla daha çok tercih edilir.

2.4. SIFCON ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Bulutlar (2006) yaptığı çalışmada SIFCON'un mekanik özelliklerini incelemek amacıyla hacimce lifsiz, %5 ve %10 çelik lifli numuneler üretmiş ve bunların Elastisite modüllerini, yarma-çekme dayanımlarını, net eğilme dayanımlarını, kırılma enerjilerini hesaplamıştır. Mekanik özelliklerin çelik lif içeriği ve dayanımıyla değişimini incelemiştir. Çelik lif kullanım yüzdesine ve mukavemetine paralel olarak kırılma enerjisinde ve net eğilme mukavemetinde artış gözlemlemiştir. Hacimce %5 çelik lif ilave edilen numunelerde lifin çekme dayanımının kırılma enerjisine pek de kayda değer bir etkisinin olmadığını, fakat hacimce %10 oranında çelik lif içeren numunelerin oldukça tatmin edici etkisinin olduğunu görmüştür. Üretilen numunelerin kırılma enerjileri, lifsiz numunelerin kırılma enerjilerinden yaklaşık olarak 2000 kat daha fazla ölçülmüştür. SIFCON yapı malzemesini ve SIFCON

bulamacını karşılaştırdığında basınç ve yarma dayanımı SIFCON'da iki kat daha fazla ölçmüştür.

Şimşek ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada farklı şekillere sahip çelik liflerin taze ve sertleşmiş betona etkilerini incelemek amacıyla kendileri çelik liflere Z ve C şekillerini vermişlerdir. Hazırlamış oldukları karışımlarda çimento ağırlığının %0, %10, %15 ve %20'si kadar çelik lif kullanmışlardır. Üretilen çelik lifli betonların taze beton özelliklerinde hava yüzdesi ve işlenebilirliğe, sertleşmiş beton özelliklerinde basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarına bakmış ve birtakım sonuçlara ulaşmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre lif şekli hava yüzdesinde ve işlenebilirlik özellikleri üzerinde önemli bir ölçüde etkiye sahiptir. Lif oranının artmasına bağlı olarak bu özellikler olumsuzluk göstermiştir. Sertleşmiş beton dayanımında lif oranı arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüş buna karşın eğilme ve aşınma dayanımları artış görülmüştür. Z şekilli çelik lif basınç ve aşınma dayanımlarına olumlu etki sağlarken C şekilli çelik lif eğilme dayanımına olumlu etki sağlamıştır. Betondan istenen performans göz önüne alınarak uygun şekilli lif seçimi yapılabilir.

Kızıllırmak ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada 4D ve 5D tipi çelik lifleri 3D tipi çelik lifle statik ve darbe yükleri altında eğilme özellikleri yönünden karşılaştırmak istemişlerdir. Bu amaçla 3 tip çelik lifleri ayrı ayrı hacimce %0,38 ve %0,76 kullanarak ürettikleri beton numunelerde taze beton deneylerinin yanı sıra basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe mukavemeti ve kırılma enerjisi gibi sertleşmiş beton deneylerinin sonuçlarını incelemişlerdir. Kanca sayısı arttıkça eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi artmıştır fakat işlenebilirlik özelliği azalmıştır. İstenen işlenebilirliği sağlayabilmek amacıyla kimyasal katkı kullanımını arttırmışlardır. Yaptıkları çalışmada betonun darbe yüküne karşı bütünlüğünü sağlayabilmesi için lif kullanımının kesinlikle şart olduğunu belirtmişlerdir.

Kıllı (2018) yaptığı çalışmada SIFCON'un mekanik özelliklerinin standart, kuru ve hızlı kür ile ne ölçüde değiştiğini incelemiştir. SIFCON ile ilgili literatürde bir standart olmadığı için yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı farklı karışım oranlarına sahip numunelerin basınç dayanımlarını karşılaştırarak en uygun karışım oranını bulmuştur. Çalışmasında 2 farklı en-boy oranına sahip çelik liflerden ayrı ayrı hacimce %4 ve %8 oranlarında kullanarak ürettiği numunelere ultra ses geçiş hızı, kılcal su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı deneylerini uygulamıştır. En iyi eğilme dayanımı sonucunu %8 çelik life sahip numunede ölçmüştür, lif oranı arttıkça eğilme dayanımı artmaktadır. Çelik lif oranı arttıkça darbe dayanımı deneyinde numuneye çelik bilye batma miktarı azalmıştır, lif oranı artışı darbe dayanımını olumlu etkilemiştir. Aynı lif türü ve aynı lif oranına bakıldığında en iyi sonucu

standart kürde almıştır. Hızlı kr uygulamasında daha kısa sürede kuru kürde kazanılan dayanım değerine ulaşılmıştır ve hızlı kürde standart krn %68 dayanım değerlerini yakalanabilmiştir. SIFCON'un seri üretimlerinde hızlı kr, standart küre bir alternatif olarak düşünülebilir.

Aydın (2019) yaptığı çalışmada yüksek ve düşük sıcaklıklarda SIFCON'un basınç ve eğilme davranışlarını incelemiştir. Hacimce %24 elik lif kullandığı SIFCON numunelerini 28 gün standart küre tabi tuttuktan sonra -35, +22, +100, +200 ve +300 °C fırında ısıtmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre sıcaklık arttıa eğilme dayanımında genel olarak azalma görülmüş ve basınç dayanımı önce artmış sonra azalmış ve tekrar artmıştır. Basınç dayanımı eğilme dayanımına göre sıcaklık değişiminden daha az etkilenmiştir.

Canbaz ve arkadaşı (2015) yaptığı çalışmada farklı lif ve bağlayıcılar kullanarak ürettiği SIFCON'un özelliklerini araştırmıştır. Farklı lif olarak mikro elik lif, makro elik lif, mikro polipropilen ve makro polipropilen; farklı bağlayıcı olarak Portland imentosu, puzolanlı imento, kalsiyum alminatlı imento ve uçucu kül kullanmıştır. Birim ağırlık, ultra ses geçiş hızı, eğilme mukavemeti, basınç mukavemeti ve su emme deneylerini uygulamıştır. Elde ettiği sonuçlara göre elik lif polipropilen life göre malzeme özelliklerini iyileştirmede daha etkilidir ve makro özellikleri iyileştirmek için makro lif kullanımı daha yerinde bir karar olacaktır. Yazarlar, SIFCON yapı malzemesini fabrikasyon hazır yapı elemanı üretiminde önermiştir.

Alkayış ve Başyigit (2021) yaptıkları çalışmada lif içeriğinin, türünün ve incelik oranının beton darbe dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla önceki çalışmaları incelemiş ve bazı sonuçlara varmışlardır. Darbe dayanımı; basınç dayanımından, eğilme dayanımından, lif içeriğinden ve lif özelliklerinden etkilenmektedir. Dolayısıyla bu özellikleri etkileyen her bir parametre darbe dayanımını da etkilemektedir. Betona darbe dayanımı kazandırmada en etkili yöntemin lif katkısı olduğunu ve en çok elik liflerin kullanıldığını tespit etmişlerdir. Spiral ve kanca uçlu elik lifler betona en çok kenetlenmeyi sağlamıştır. Yazarlar, düşük maliyet sağlamak ve evre dostu olabilmek için karma lif kullanımı da bir seçenek olarak sunmuşlardır.

Nili ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada fiber takviyeli betonun yüksek hızlı darbe altındaki davranışını değerlendirmiş ve yarı statik olanla karşılaştırmıştır. 0,45 ve 0,3 olmak üzere iki ayrı su/imento oranı kullanmışlardır. Önceden hazırlanmış numunelere hacimce %1 oranında elik lif ilave etmişlerdir. Mermi yöntemini 600-1130 m/s hız aralığında kullanıp 3 m/s yarı statik çarpma gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak her iki hız koşulunda da

fiberin eklenmesinin numunelerin bütünlüğü için önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Yarı statik testte 0,3 su/çimento oranına sahip numuneler daha iyi dayanıma sahip olmuştur. Yarı statik testin başarısızlık modları, normal ve lifli numunelerde sırasıyla radyal ve diyagonal olmuştur. Yüksek hızlı darbe, lifli olmayan malzemede bir kesme başarısızlığına yol açarken lifli numunede mermi kırılmadan numune hedefine nüfuz etmiştir.

İpek ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmalarında lif türünün SIFCON'a mekanik ve fiziksel etkilerini araştırmak amacıyla çelik ve polipropilen lifleri yalın ve kombinasyonlu kullanmışlardır. Çelik lifi polipropilen lif ile kıyasladıklarında mekanik özellikleri iyileştirmede daha etkili olduğunu ve birim dayanım maliyeti göz önüne aldıklarında dalgalı geometrik şekle sahip çelik lifin daha ekonomik olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca korozyon riski olan bölgelerde veya manyetik alan oluşması istenmeyen durumlarda polipropilen lif kullanılmasını önermişlerdir.

Öztürk ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada lif ile güçlendirilmiş bir betonun mikrodalga ölçüm teknikleriyle lif yönlerini tespit etmişlerdir. Hacimce %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik lif kullanmış ve çelik lifleri 20x20x5 cm boyutlarındaki plaka kalıplara beton dökme aşamasında elle 5 farklı şekilde yerleştirmişlerdir. Lifler beton içerisine karışık, paralel, çapraz, dik ve içe dik şekilde yerleştirildikten sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün standart küre tabi tutulmuştur. Numunelerin içindeki lif dağılımı elektromanyetik dalgalar kullanılarak hasarsız bir şekilde tespit edilebilmiştir ve betonların kalite kontrolü için bu yöntem önerilmiştir.

Aydın ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada yüksek oranda uçucu kül kullanarak ürettikleri SIFCON kompoziti otoklavda kür ederek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %2, %6 ve %10 oranlarında çelik lif kullanmış ve 6 saat otoklavda bekletmişlerdir. Lif kullanımı arttıkça kompozitin tokluğu da artmıştır. Uçucu kül kullanımı SIFCON'un tüm mekanik özelliklerini genel olarak iyileştirmiştir. Ancak %2 çelik lifli numunede basınç dayanımı düşmüştür. Yazarlar bunu lif içeriğinin kalıpları üniform dolduramadığından üst tabakada kusur meydana gelmesine bağlamıştır.

Taşdemir ve arkadaşı (2002) yaptıkları çalışmada çimento esaslı kompozitlerle ilgili literatür araştırması yapmış ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre fiziksel ve kimyasal etkilere karşı yüksek performanslı lifli betonlar normal betonlara göre daha iyi performans göstermiştir. Betonda sünekliği arttırmak için çelik lif kullanımı gün

geçtikçe artmaktadır. Yazarlar, yeni bir çimento esaslı kompozit olan SIFCON'u stratejik yapılarda ve onarım güçlendirme çalışmalarında kullanılması için önermiştir.

Ramkumar ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada terör saldırıları sırasında sivil ve askeri altyapının güvenliği için üstün basınç ve darbe dayanımı özelliklerine sahip yeni bir düşük karbonlu çimento esaslı iki aşamalı katmanlı lifli beton tasarlama potansiyelini vurgulamıştır. İki aşamalı fiber takviyeli betonda, çelik fiberlerin hacmi iri agregalarla birlikte önceden karıştırılmış ve kalıba yerleştirilmiştir. Sonraki aşamada agregalar arasındaki boşlukların doldurulması yerçekimi ile akan enjeksiyon ile yapılmıştır. Çelik lif olarak kısa kıvrımlı lifleri ve uzun kancalı uç çelik lifleri kullanmışlardır. Numuneleri ACI 544 yönergelerine göre düşen ağırlık çarpışma testine tabi tutmuşlardır. Sonuçlar, önerilen düşük karbonlu çimento esaslı iki aşamalı fiber takviyeli beton numunesinin eşdeğer dozlarda fiber ile tamamen güçlendirilmiş numunelerden üstün darbe mukavemeti gösterdiğini ortaya koymuştur.

Khamees ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada kullandıkları çelik lifin uzunluğunun, çapının, en-boy oranının SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 3 seri numune üretmişlerdir: %6 mikro çelik lifli numune, %6 kanca uçlu çelik lifli numune ve %6 hibrit çelik lifli numune (%3 mikro çelik lif + %3 kanca uçlu çelik lif). Silis dumanını, çimento ağırlığının %10'u kadar kullanmışlardır ve su/çimento oranını 0,33'te tutmuşlardır. Ürettikleri numuneleri 7, 28 ve 90 gün kürde beklettikten sonra basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı ve statik Elastisite modülü tayini deneylerini yapmışlardır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre liflerin boyu ne kadar küçük ve kısa olursa birim alandaki lif sayısı o kadar fazla olur. Dolayısıyla daha yoğun lif ağına sahip SIFCON elde edilir. Mikro liflerin, kanca uçlu liflere göre SIFCON'un basınç dayanımını 90 günde %28,5 gibi önemli bir ölçüde arttırdığını ve hibrit lif kullanımının istenilen sonuçları verdiğini, neredeyse mikro lifin özelliklerine yaklaşıldığını gözlemlemişlerdir.

Algın ve arkadaşları (2022) çalışmalarında bazalt lif kullanmışlardır ve SIFCON üzerindeki mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Üretimde 24 mm uzunluğundaki bazalt lifi 30 mm uzunluğundaki çelik life %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame ederek kullanmışlardır. Numuneler 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Numuneler üzerinde basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, su emme, kılcal su emme, asit direnci ve Böhme aşınma direnci deneylerini uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre üretimde kullanılan bazalt lif arttıkça iç yapıdaki gözenek de artmış ve çimento bulamacının bazalt lifine sızamamasına, numunenin üniform olmamasına neden olmuştur. Lif arttıkça boşluk oranı ve

ağırlık kaybı artmış, asit çözeltisinin iç yapıya daha çok nüfuz etmiştir. Bütün yaşlarda bazalt lif oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır ve aynı oranda lif kullanımında yaş arttıkça basınç dayanımı artış oranı azalmıştır. Bu düşüş numune içinde oluşan boşluklara bağlanmıştır.

Morishima ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada 5 tip çelik lif ve 4 tip sentetik lif olmak üzere 9 seri numune üretmişlerdir. Önceden kalıba yerleştirilen lifler üniform bir yapı elde edebilmek için mala ile preslenmiştir. El mikserinde 4 dakika karıştırılan harç kalıplara kendi ağırlığı ile yerleşmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre çelik lif kullanımında, lif uzunluğu ne kadar uzun ve hacim oranı ne kadar yüksek olursa o kadar yüksek eğilme mukavemeti ve tokluk elde edilir. Sentetik lifli SIFCON'un bükülme mukavemeti ve tokluğu çelik lifli SIFCON'dan daha düşük olmasına rağmen bunların eğilme yükü taşıma kapasitesinin nispeten büyük deformasyonlara kadar arttığını doğrulamışlardır. Çelik lif uzunluğu arttıkça Young Modülü artmıştır. Lif uzunluğu sabit tutulduğunda uç kanca şeklinin değişmesi eğilme özelliklerinde çok az etkili olmuştur.

Jerry ve arkadaşı (2022) yaptığı çalışmada SIFCON'da iki farklı lif (çelik ve poliolefin) kullanıldığında liflerin yoğunluğun yanı sıra basınç ve eğilme dayanımlarına etkisini araştırmak istemişlerdir. Buradaki temel amaç, günümüzde en çok tercih edilen çelik lif dışında yeni bir lif türünün kullanımını denemektir. Ayrıca öz ağırlığı azaltmak ve bazı mekanik özelliklerin üstünlüğünü korumaktır. Üretilen numunelerin lif oranları %6 çelik lif, %6 poliolefin lif, %4 çelik lif + %2 poliolefin lif, %2 çelik lif + %4 poliolefin lif şeklindedir, kontrol amaçlı lifsiz numune de üretilmiştir. En yüksek basınç ve eğilme dayanımı sonucu %6 çelik lif kullanımında elde edilmiştir. Hibrit lif kullanımında çelik life çok yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır ve yazarlar hibrit lifin istenen özellikleri sağladığını belirtmişlerdir.

Bayrak ve arkadaşları (2019) SIFCON'un rijit kaplama olarak kullanımını araştırmışlardır. Bağlayıcı pastada mikro partiküllerin boşluklarını doldurmak için puzolanik bir malzeme olan silis dumanını kullanmışlardır. Deney tasarımı için her biri 4 düzeyli 4 faktör almışlardır. Silis dumanını çimento ağırlığının %0, %5, %10 ve %15'i; su / çimento oranını 0.30, 0.35, 0.40 ve 0.45; kanca uçlu çelik liflerin narinlik oranlarını 40, 55, 65 ve 80; çelik lifleri hacimce %3, %6, %9 ve %12 olacak şekilde üretim yapmışlardır. Basınç dayanımı için ikişer adet küp ve eğilme dayanımı için ikişer adet kiriş numune üretilip 28 gün kürde bekletmişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına bakıldığında lif oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğünü ve eğilme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Silis dumanı %0'dan %5'e çıktığında hem basınç hem eğilme dayanımlarında iyileşme görülmüştür, %5ten sonraki oranlarda bu değerlerde düşüş yaşanmıştır. Mekanik özelliklerde en çok etkili parametrenin lifin en/boy

oranı (narinlik), en az etkili parametrenin karışımında kullanılan silis dumanı oranı olduğu sonucuna varmışlardır.

Soylu ve arkadaşları (2019) çelik liflerin farklı narinlik oranlarında ve SIFCON'da farklı hacim yüzdelerinde kullanımının basınç ve eğilme dayanımına etkisini araştırmak amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Çelik lif narinlik oranları 40, 55, 65, 80 ve hacimce çelik lif kullanımı %4, %8, %12 şeklindedir. En / boy oranı arttıkça basınç dayanımı da artmıştır. SIFCON; geleneksel beton ile karşılaştırıldığında kırılma enerjisi 300 katı, eğilme dayanımı 7-15 katı fazla çıkmıştır. Eğilme dayanımı artışı basınç dayanımı artışına göre daha anlamlıdır. %8 lif oranından sonra yerleşme sorunu meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak basınç dayanımı düşmüştür. Bulamacın liflerin arasından girememesinden dolayı D_{max} 'ın 1 mm olmasının uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Mohammed ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada SIFCON'un betonarme kirişlerle birlikte eğilme kapasitesini arttırdığını araştırmışlardır. Çelik liflerin yüksek hacimsel oranı SIFCON'un gerilme bölgelerinde yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlamıştır. Ürettikleri kirişte 2Φ16 boyuna donatı, 2Φ4 etriyeleri destekleme amaçlı donatı ve Φ8'lik etriyeler kullanmışlardır. Yapı kirişlerinde çekme bölgelerinde ilk çatlama yükü artmıştır, yüksek bir süneklik özelliği göstermişlerdir.

Abd ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada SIFCON'un yapı kirişlerine etkisini incelemek amacıyla ürettikleri numuneleri basınç, eğilme ve çekme deneylerine tabi tutmuşlardır. Üretim aşamasında SIFCON karışımını kalıplara katmanlar halinde dökmüşlerdir. Kullanılan lif oranları sırasıyla %6, %7,5 ve %9'dur. Çelik lif oranı arttıkça iki nokta yüküne maruz kalan betonarme kirişlerin davranışında önemli bir iyileşme kaydedilmiştir. Aynı zamanda tokluk ve süneklik de artmıştır.

Sonone ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada SIFCON'un basınç, eğilme, kopma çekme dayanımlarını araştırmışlardır. Hazırlanan karışımında su / çimento oranı 0,4 tutulurken kimyasal katkı silis dumanı ve çimento ağırlığının %1,2'si kadardır. Çelik lifleri 80 ve 100 olmak üzere iki farklı en boy oranlarında ve hacimce %3, %5, %7, %9, %11 oranlarında kullanmışlardır. SIFCON numunelerinin dökümü 2 tabaka halinde yapılmıştır. İlk tabakadan sonra kalıplara vibrasyon uygulanmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarma çekme dayanımı %9 lif oranına kadar artış gösterirken %11 lif oranında düşmüştür. Yarma çekme ve eğilme dayanımlarında 7 ve 28 günlük numunelerin arasında önemli bir fark ölçülmüştür. Optimum sonuç %9 lif oranında kaydedilmiştir.

Özalp (2022) lif geometrisinin SIFCON'a etkilerini araştırmak amacıyla çalışmasında poliolefin sentetik lif, normal mukavemetli 3D çelik lif ve yüksek mukavemetli 5D çelik lif olacak şekilde 3 farklı lif türü kullanmıştır. 3D çelik lif %4 ve %8 oranlarında kullanılırken diğer lifler sadece %4 oranında kullanılmıştır. 5D çelik lifin betona tutunması daha iyi olduğundan kırılma enerjisi, çekme dayanımı, yarma çekme dayanımı diğer numunelere göre daha fazla çıkmıştır. Sentetik lif veya yüksek oranda çelik lif kullanımı geçirgenliği ve kılcal su emme değerlerini arttırmıştır. Poliolefin lif belirli oranların üzerinde kullanıldığında önemli homojenlik sorunlarına neden olmuştur ve bu sebeple basınç dayanımını düşürmüştür. Çelik lif kullanımı lifsiz numunelere göre basınç dayanımında artış sağlarken poliolefin lif tüm numunelere göre basınç dayanımını düşürmüştür. 5D çelik lif 3D çelik life göre mekanik özellikleri arttırmada daha etkindir ancak 5D çelik lifin maliyetinin daha çok olmasından dolayı yazar optimum koşulların hesaplanması gerektiğini önermiştir. Yazar ayrıca mikro ve makro liflerin hibrit kullanımını da önermiştir.

Morishima ve arkadaşları (2020) çalışmalarında lif tipinin SIFCON'un temas patlaması altında patlama dayanımını araştırmaya ilişkin deneyler yapmışlardır. Basınç dayanımı deneyi için 100 mm çaplı 200 mm uzunluğunda silindir numune, eğilme dayanımı deneyi için 100 x 100 x 400 mm boyutlarında kiriş numune ve patlama deneyi için 500 x 500 x 80 mm boyutlarında prizmatik numune üretmişlerdir. Çalışmada 5 çeşit çelik lif ve 4 çeşit polipropilen lif kullanılmıştır. Hacim yüzdesine göre miktarları belirlenen lifler kalıplara önceden elle yerleştirilmiş ve liflerin belirli bir yöne doğru zorlanmamasına dikkat edilmiştir. Kalıplara vibrasyon uygulanmamış harç kendi ağırlığıyla kalıba yerleşmiştir. Numunelerin kırılma davranışını ölçmek amacıyla 100 gram ve 130 gram patlayıcı kullanılarak yapılan deneylerde 130 gram patlayıcı kullanıldığında bile SIFCON'da parçalanma görülmemiştir. Sadece merkezde dairesel ve radyal çatlaklar gözlemlenmiştir. Yerel kırılma boyutları 100 gram patlayıcıda 110-130 mm arasındayken 130 gram patlayıcıda 120-140 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuca göre yakın aralıklı ince lifler sınırlayıcı etkisiyle plakanın taban gevrekleşmesini azaltma eğiliminde davranış göstermiştir. Çalışmada kullanılan liflerin kullanım yüzdeleri farklıdır ve bu nedenle lif tipinin etkisi nicel olarak değerlendirilememiştir.

Bozkırlı (2019) yaptığı çalışmada lif türünün ve lif kullanım oranının SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla ürettiği SIFCON numuneleri üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri uygulamıştır. Basınç dayanımı deneyi için 15x15x15 cm küp numune ve eğilme dayanımı için 6,5x6,5x21 cm prizmatik numune üretmiştir. Lif türünün etkisini karşılaştırmak amacıyla çelik lif, polipropilen lif ve iki lifi karma halde kullanmıştır.

Lif oranlarını %6, %8 ve %10 olarak belirlemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda basınç dayanımını arttırmada çelik lif polipropilen life göre daha üstün performans göstermiştir. Ayrıca polipropilen lifli numunelerin basınç dayanımı lifsiz referans numunesine göre daha düşük çıkmıştır. Eğilme deneyine bakıldığında tüm lifler dayanımı arttırmıştır. Yazar, SIFCON'un yüksek süneklik ve eğilme dayanımına ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabir bir malzeme olduğu sonucuna varmış ve endüstriyel zemin, köprü ayakları gibi alanlarda kullanılmasını önermiştir.

Canbay (2014) yaptığı çalışmada çelik ve polipropilen lifleri yalın ve kombinasyonlu olarak kullanarak SIFCON üretmiş ve mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Üretimde 4D kancalı çelik lif, dalgalı çelik lif, makro polimer lif ve mikro polimer lif kullanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri incelendiğinde çelik lifin polimer life göre bu iki özelliği de iyileştirmesi daha çok olmuştur. Ancak korozyon faktörü göz önüne alındığında polimer lifin tercih edilebileceğini belirtmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzeme türleri ve özellikleri detaylandırılmıştır. Karışım oranlarını belirleyebilmek amacıyla yapılan ön döküm ve taze beton deneylerine yer verilmiştir. SIFCON üretim tekniği aşama aşama anlatılmış ve üretimden sonra kürlenene numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneyleri gösterilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Üretimde Votorantim Çimento fabrikası üretilen gri renkte CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentoya ait özellikler üretici firmadan temin edilmiş, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Miktar	Özellik	Miktar
SiO ₂	19.2	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3.13
Al ₂ O ₃	4.56	Özgöl Yüzey (cm ² /g)	3750
Fe ₂ O ₃	3.09	Priz Başlangıcı (dk)	145
CaO	62.9	Priz Sonu (dk)	200
MgO	1.88	Hacim Genleşmesi (mm)	1
K ₂ O	0.63	Basınç Dayanımları (MPa)	
Na ₂ O	0.31	2 Gün	31.1
SO ₃	3.21	7 Gün	45.9
Cl ⁻	0.01	28 Gün	54.8

3.1.2. Silis Dumanı

Üretimde Etibank Elektrometalurji A.Ş. Antalya tesisinden alınan silis dumanı kullanılmıştır. Kullanılan silis dumanının rengi açık gridir, silis dumanının renginin koyuluğu arttıkça içerisindeki karbon miktarı daha yüksek demektir. Silis dumanının özgül ağırlığı 2.20 g/cm³, gevşek birim ağırlığı 330 kg/m³’tür. Kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	91.92
Al ₂ O ₃	0.42
Fe ₂ O ₃	0.20
CaO	2.06
MgO	3.28
Cl	0.03
SO ₃	0.83
Na ₂ O	0.55
K ₂ O	2.58
K.K.	1.68

3.1.3. Agrega

Üretimde Dağ-İş Madencilik firmasının Bilecik Gülümbe tesisinden alınan kireçtaşı kullanılmıştır. 0-5 mm kireçtaşı kumu temin edilmiş ve 1 mm elekten geçirilerek D_{max} 1 mm olacak şekilde üretimde kullanılmıştır. Agreganın elenmeden önce ve elendikten sonraki görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir. Kullanılan agregaya ait fiziksel ve kimyasal özellikler ilgili firmadan temin edilmiş ve fiziksel ve geometrik özellikler Çizelge 3.3’te, kimyasal özellikler Çizelge 3.4’te verilmiştir, deneyler TS 706 EN 12620 Beton Agregaları Standartlarına uygun olarak yapılmıştır. 1 mm’lik elekte elenen malzemenin elek analizi Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılan agreganın elenmeden önce ve elendikten sonra görünümü

Çizelge 3.3. Kullanılan agreganın fiziksel ve geometrik özellikleri

Uygulanan Deney	Sonuç
Metilen mavisi	0,75
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,62
Çok ince malzemenin muhtevası	%13,43
Su emme oranı (WA)	%1,56
Kuruma büzülmesi	%0,027

Çizelge 3.4. Kullanılan agreganın kimyasal özellikleri

Parametre	Sonuç
Klorür	%0,003
Asitte çözülebilen sülfat	%0,0283
Toplam kükürt	%0,0039
Hafif organik kirleticilerin tayini	Negatif
Potansiyel humus varlığının tayini	Negatif
Fulvo asit içeriğinin tayini	Negatif

Çizelge 3.5. Kullanılan agreganın elek analizi

Elek Ebatı (mm)	0-1
40	100
31,5	100
22,4	100
16	100
11,2	100
8	100
5,6	100
4	100
2	100
1	97
0,5	57
0,25	37
0,063	15

3.1.4. Su

Karma suyu olarak Bilecik şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suyu kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kullanılan karma suyuna ait kimyasal analiz sonuçları

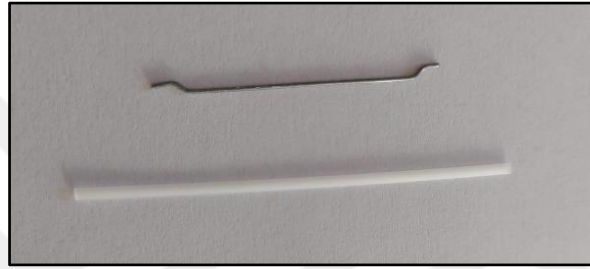
Parametre	Birim	Analiz Sonucu	TS EN 1008 Değerleri
pH (Sıcaklık: 25 °C)	-	7,45	pH > 4 olmalıdır
Elektriksel iletkenlik	µmhos/cm	756	-
Alkalinite	mg/L	619,53	Max 1500
Klorür (Cl⁻)	mg/L	5,32	Öngermeli Beton veya şerbet için 500
			Donatı bulunan beton için 1000
			Donatı bulunmayan beton için 4500
Sülfat (SO₄⁻²)	mg/L	15,332	Max 2000
Nitrat (NO₃⁻)	mg/L	26,7	Max 500
Çinko (Zn)	mg/L	0,816	Max 100
Kurşun (Pb)	mg/L	<0,01	Max 100
Fosfatlar (P₂O₅)	mg/L	<0,229	Max 100
Askıdaki Madde	ml	<4	Max 4
Organik Madde	-	O.R Uygun	NaOH ilavesi sonrası renk açık sarı veya daha açık olmalıdır
Sodyum Oksit (Na₂O)	mg/L	7,83	-
Potasyum Oksit (K₂O)	mg/L	<1,205	-
Koku	-	Yok	İçilebilir suya eşdeğer olmalıdır
Renk	-	Berrak	Açık sarı veya daha açık
Deterjanlar	-	Yok	Herhangi bir köpük 2 dk.da kaybolmalı
Sıvı ve katı yağlar	-	Yok	Görünür izlerden fazla olmamalıdır
Yoğunluk (20 °C)	g/cm ³	0,9994	-

3.1.5. Lif

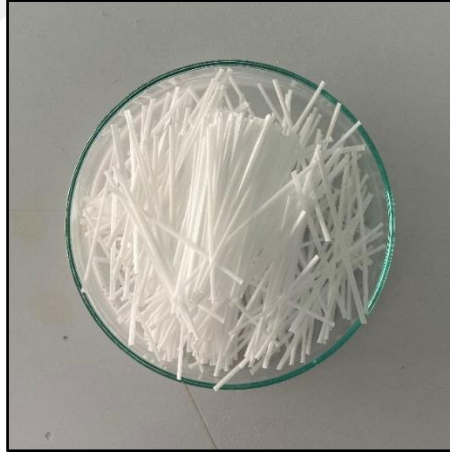
Deneylerde çelik ve polipropilen lifler kullanılmıştır. Çelik lif olarak Bekaert firmasına ait Dramix 3D 65/35BG kullanılmıştır. Polipropilen lif olarak FMY Kimya firmasına ait makro polipropilen lif kullanılmıştır. Çelik lif ve polipropilen life ait malzeme özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kullanılan liflerin özellikleri

	Çelik Lif	Polipropilen Lif
Marka	Dramix	OneShot
Tip	65/35	Makro Lif
Uzunluk (l) (mm)	35	55
Çap (d) (mm)	0.55	0.80
Nominal Çekme Dayanımı (N/mm ²)	1345	540
Elastisite Modülü (N/mm ²)	200000	7500
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	7,81	0,91



Şekil 3.2. Kullanılan çelik ve polipropilen lifler



Şekil 3.3. Polipropilen lif görünümü

Çelik lifler suda eriyen bir tutkal yardımıyla demetler halinde geldiği için 1 dk suda bekleyen lifler elle tek tek ayrılmış ve kalıplara homojen bir şekilde lifler tek yöne bakmayacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Demet halinde ve ayrılmış çelik lif görünümü

3.1.6. Katkı

Deneylerde kimyasal katkı olarak Sika Yapı Kimyasalları firmasına ait Sika ViscoCrete PC 15 süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kimyasal yapısı modifiye polikarboksilat esaslı polimer olan bu katkı 20°'de 1,07-1,11 kg/l yoğunluğa ve 3-7 arasında pH değerine sahiptir.

3.2. Üretim ve Yapılan Deneyler

SIFCON kompoziti teknolojinin gelişmesiyle beraber yeni hayatımıza giren bir yapı malzemesidir. SIFCON ile ilgili net bir standartlaşma söz konusu olmadığından dolayı üzerine geliştirilmesi gereken bir teknolojidir. Bu nedenle literatürde bu alanda yapılmış önceki çalışmalar araştırılarak daha önce kullanılan karışım oranları incelenmiş ve bunlardan faydalanılmıştır. Ayrıca taze beton işlenebilirlik deneyleri yapılmış, ön döküm üretimleri yapılmış ve deneylerde kullanılacak optimum karışım oranları, lif yüzdeleri, uygulanabilecek üretim teknikleri bulunmuştur.

İlk olarak uygun karışım oranlarını bulmak için taze beton deneyleri yapılmıştır. Bunlar V hunisi, L kutusu ve J halkası deneyleridir. Deneyler kendiliğinden yerleşen beton standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

3.2.1. Numune Tasarımı ve Hazırlanışı

Uygun karışım oranlarını bulabilmek amacıyla ön döküm üretimi yapılmıştır. Ön döküm deneylerinde 40x40x160 mm prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Çelik ve polipropilen lifler ayrı ayrı hacimce %5, %10, %15 oranlarında kullanılmıştır. Lifsiz numune, 3 farklı oranda çelik lifli numune ve 3 farklı oranda polipropilen lifli numune olmak üzere 7 seri ve her seriden ikişer adet olmak üzere 14 adet numune üretilmiştir. Karışım harç karıştırıcısında hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım önceden üretime hazır hale getirilen kalıplara

doldurulmuş ve harcın sarsma cihazı kullanılarak kalıba yerleşmesi sağlanmıştır. Kalıp hazırlığı yapılırken önce kalıplar kalıp yağı ile yağlanmış ardından hacim yüzdelere göre tartılan lifler kalıplara yerleştirilmiştir. %10 ve %15 hacim oranlarına gelindiğinde liflerin kalıplara yerleşmesi zorlaşmıştır ve bu sebeple tezde asıl uygulanacak olan deneylerde %3, %5 ve %7 oranlarında lif kullanımına karar verilmiştir.



Şekil 3.5. Ön döküm için prizmatik kalıpların hazırlanması

Üretilen numunenin doluluk oranı dayanım açısından önemli bir özelliktir. Doluluk oranı yüksek malzeme elde edebilmek amacıyla numuneye sıkıştırma ve yerleştirme işlemleri uygulanır. Sıkıştırma işlemi temel olarak matris içerisinde bulunan fazla havanın dışarı atılması olarak tanımlanabilir. Böylece numune içerisindeki katı madde oranı dolayısıyla yoğunluk artar. Yoğunluğun artmasıyla geçirimsizlik azalır ve basınç mukavemeti artar.



Şekil 3.6. Çimento harç karışım cihazı



Şekil 3.7. Prizmatik numunelerde uygulanan eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

Yapılan ön döküm üretiminden ve uygulanan deneylerden sonra en uygun karışım oranları belirlenmiş ve deneylerde kullanılacak SIFCON üretimi aşamasına geçilmiştir. SIFCON, liflerin arasından geçip kalıba yerleşebilen bir malzeme olduğundan su/bağlayıcı oranı 0.35 tutularak çimento ağırlığının %1'i kadar süper akışkanlaştırıcı ile bu kıvam sağlanmıştır. Silis dumanı, çimento ağırlığının %10'u kadar kullanılmıştır. Çimento bulamacı oluşturmak için kullanılan karışım oranları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.8. 1 m³ için kullanılan karışım oranları

Malzemeler	Malzeme Miktarı
Çimento (kg/m ³)	900
Silis dumanı (kg/m ³)	90
Kireçtaşı (kg/m ³)	925,68
Su (kg/m ³)	316,8
Katkı (kg/m ³)	9,9
Su/bağlayıcı oranı	0.35
Katkı/çimento oranı	0.01

SIFCON üretiminde yüksek oranda lif kullanılır ve bu lifler de kalıp içerisinde bir hacim kaplar. Lif oranına bağlı olarak 1 m³ içerisindeki çimento bulamacı miktarı da değişmektedir. Çizelge 3.6'da her bir SIFCON numune serisinin 1 m³ karışım oranı verilmiştir.

Çizelge 3.9. SIFCON numune serilerinin 1 m³ karışım oranları

Malzemeler	SIFCON Seri Kodları						
	REF	SÇL3	SÇL5	SÇL7	SPL3	SPL5	SPL7
Çimento (kg/m ³)	900	873	855	837	873	855	837
Silis dumanı (kg/m ³)	90	87,3	85,5	83,7	87,3	85,5	83,7
Kireçtaşı (kg/m ³)	925,7	897,9	879,4	860,9	897,9	879,4	860,9
Su (kg/m ³)	316,8	307,3	301	294,6	307,3	301	294,6
Katkı (kg/m ³)	9,9	9,6	9,4	9,2	9,6	9,4	9,2
Çelik lif (kg/m ³)	-	234,3	390,5	546,7	-	-	-
Polipropilen lif (kg/m ³)	-	-	-	-	27,3	45,5	63,7

Deneyde kullanılacak numunelerin üretimi için karışım hazırlanmadan önce kalıplar kalıp yağı ile yağlanmış ve kullanım oranlarına göre her bir kalıp için ayrı ayrı tartılan lifler homojen olmasına ve liflerin aynı yönde dizilmemesine özen gösterilecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra harç karıştırıcısında kuru malzemeler olan çimento, silis dumanı ve ince agrega homojen bir hale gelene kadar yaklaşık 3-4 dakika karıştırılmıştır. Karışım suyu ve kimyasal katkı, kuru karışıma üç aşamada eklendikten sonra 5 dakika daha karıştırılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken karışımı gereğinden fazla karıştırmayıp segregasyon oluşmamasını sağlamaktır. Karışım hazır olduktan sonra önceden lif eklenmiş kalıplara dökülmüş karışımın kendi ağırlığı ile liflerin arasından geçerek kalıplara yerleşmesi sağlanmıştır. Numuneler 28 ve 56 gün standart kürde bekletilmiştir. Kür sürelerinin ardından numuneler üzerinde eğilme, basınç, darbe dayanımları deneyleri yapılmış, çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3.8. Karışımın mikserde hazırlanması

3.2.2. Numunelerin Kodlandırılması

SIFCON numunelerinin kodlanması içerdiği lif türü ve kullanım oranına göre yapılmıştır.

Çizelge 3.10. Numunelerin kodlanması

	Çelik Lif Oranı (%)	Polipropilen Lif Oranı (%)
REF	0	0
SÇL3	3	0
SÇL5	5	0
SÇL7	7	0
SPL3	0	3
SPL5	0	5
SPL7	0	7



Şekil 3.9. Hazırlanan karışımın kalıplara yerleştirilmesi ve kalıptan çıkarılan numunelerin kodlanması

3.2.3. Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Yapı malzemeleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenekleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Taze beton deney düzenekleri

- V Hunisi Deneyi

V hunisi deneyi TS EN 12350-9 Standardına göre uygulanmıştır. Deneyin amacı betonun ya da kullanılacak olan harcın/bulamacın akış ve doldurma yeteneğini belirlemektir. Deney düzeneği önce nemli bir bezle silinmiştir. Ardından hazırlanan karışım alttaki kapağın kapalı olduğu kontrol edilerek deney düzeneğine sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulmuştur. Doldurma işleminden sonra 10 ± 2 saniye beklenip kapak açıldığı an kronometre çalıştırılmış ve üstten bakıldığında ışık gözüktüğü an kronometre durdurulmuştur. Ölçülen süre V hunisi akma süresi olarak kaydedilmiştir. Standartta göre bu değer 8-12 saniye aralığında olmalıdır ve çıkan sonuç 8 saniyedir (TS EN 12350-9, 2011).

V hunisi deneyi karışımın işlenebilirliğini gösteren bir deney olduğundan birden fazla kez uygulanarak deneme yanılma yöntemiyle istenen sonuca ulaşana kadar tekrar edilmiştir. Betonda dayanımın yüksek olması istenir, bu nedenle su ve kimyasal bir katkı olan akışkanlaştırıcı oranları düşük tutulur. İlk karışımda süperakışkanlaştırıcı oranı %0,8'de ve su/bağlayıcı oranı 0.24'te tutulmuştur. Deney düzeneğine yerleştirilen karışım katkının özelliğinden dolayı hızlı priz almaya başlamış ve düşük oranda su ve katkı kullanımından dolayı da hızlı bir şekilde huniden geçememiştir. Kullanılan katkı oranları sırasıyla %0,8, %0,9 ve %1 şeklindedir. Tekrarlanan deneyler sonucu %1 süperakışkanlaştırıcı kullanımına karar verilmiştir. SIFCON, yüksek dozajda çimento ve silis dumanı içerdiğinden dolayı su ihtiyacı da çok olmuştur. Başlangıçta 0.24 olan su/bağlayıcı oranı arttırılmış 0.35'te tutulmuştur.



Şekil 3.11. V hunisi deneyi uygulaması

- **L Kutusu Deneyi**

L kutusu deneyi TS EN 12350-10 Standardına göre uygulanmıştır. Deneyin amacı betonun veya harcın/bulamacın donatı aralarından ve dar boşluklardan ayrılmaya uğramadan geçme yeteneğini belirlemektir. İki ve üç çubuklu olmak üzere standartta iki çeşit L Kutusu deneyi vardır. Çubuk sayısının artması donatı sıklığının artması anlamına gelir. Bu çalışmada üç çubuklu L Kutusu kullanılmıştır. Öncelikle L Kutusu düz ve yatay bir zemine oturtulur, deney düzeneği nemli bir bez ile silinir, yatay ve dikey bölümler arasındaki kapak kapatılır. Ardından beton numunesi L Kutusunun dikey bölmesine dökülür ve yaklaşık 1 dakika beklendikten sonra kapak kaldırılır. Hacmi bilinen belli bir miktarda taze haldeki beton dikey konumdaki düz donatı çubukları arasından yatay düzlemde akar ve donatı arasından geçen betonun iki ucundaki yükseklikleri ölçülür. Deney sonunda geçiş yeterlilik oranının hesaplanması amacıyla yatay bölümün ucunda ölçülen beton tabakası ortalama kalınlığının, düşey bölümdeki beton tabakası ortalama kalınlığına bölünmesiyle bulunur. Standartta göre bu oran 0,8 cm ve 1 cm aralığında olmalıdır, bu çalışmada her iki ucta ölçülen ortalama kalınlık 9,2 cm'dir ve bulunan oran 1cm'dir (TS EN 12350-10, 2011).



Şekil 3.12. L kutusu deneyi uygulaması

- **J Halkası Deneyi**

J halkası deneyi TS EN 12350-12 Standardına göre uygulanmıştır. Deneyin amacı betonun veya harcın/bulamacın geçiş yeteneğini ve yayılmasını ölçmektir. Bu deney sonucunda karışımın boşluklara dolabilme özelliği ölçülür. L kutusu deneyi ile benzer özellikler taşır. Deneyde Abrahams konisi, yayılma tablası ve deneye adını veren, belli aralıklarla yerleştirilmiş donatılardan oluşan J halkası kullanılır. Deney aletlerinin yüzeyleri nemli bir bez yardımıyla nemlendirilir, yayılma tablası düz bir zemine oturtulur ve ortasına J halkası yerleştirilir. Yayılma tablasında 50 cm işaretlenir, 500 mm'lik daireye ulaşma süresi t_{500j} olarak ifade edilir. J halkasının içerisine Abrahams konisi yerleştirilir ve içerisine koninin üst yüzeyine kadar sıkıştırma işlemi yapılmadan karışım doldurulur ve 30 saniye geçmeden koni sabit bir hızla kaldırılır. Bu geçen 30 saniye içerisinde etrafa bulaşan karışım su kullanılmadan deney düzeneğinden temizlenir. Koni dikey olarak betonun akışına müdahale etmeden tek hareketle 1-3 saniye arasında kaldırılır. Beton koniden akmaya başladığı anda kronometre çalıştırılır ve yayılma tablasında 50 cm ve 70 cm'ye ulaştığı anlar kaydedilir. Akış yayılımının en büyük çapı ölçülür ve d_1 olarak kaydedilir. Daha sonra d_1 'e dik açılarda yayılan akışın çapı ölçülür ve d_2 olarak kaydedilir. J halkasının merkez noktasından ve halkanın dışındaki dört noktadan (iki adet x yönünden ve x yönüne dik iki adet y yönünden) yayılma tablası ile beton yüzeyi arasındaki bağıl yükseklik farkları ölçülür. Halkanın dışından ölçülen yüksekliklerin ortalaması alınır ve halka merkezinden ölçülen yükseklik sonucu ortalamadan çıkarılır. Bulunan değer PJ olarak ifade edilir (TS EN 12350-12, 2011).



Şekil 3.13. J halkası deneyi uygulaması

3.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

- Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımını ölçmek amacıyla 7 seri için her bir yaş dayanımından ikişer adet numune olmak üzere toplam 28 küp numune üretilmiştir. 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler 28 ve 56 gün süresince standart, suda kür işlemi uygulanmıştır. Kür sürelerinin sonunda TS EN 12390-3'e göre basınç dayanımı testi yapılmıştır.

Kür havuzundan çıkarılan küp numuneler yüzeylerindeki fazla su kurulandıktan sonra makinenin alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Standarda göre $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s ($N/mm^2.s$) sınırları içerisinde kalmak üzere sabit bir yükleme hızı seçilmelidir. Bu çalışmada kullanılan makinede yükleme hızı 0,6 MPa/s ($N/mm^2.s$) olacak şekilde ayarlanmıştır.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Yapı malzemeleri laboratuvarına ait olan Çevik makine üretimi 200 ton kapasiteli düşey eksenli basınç presinde kırılmıştır. Deneye ait görsel Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Küp numune üretimi



Şekil 3.15. Basınç dayanımı deneyi uygulaması

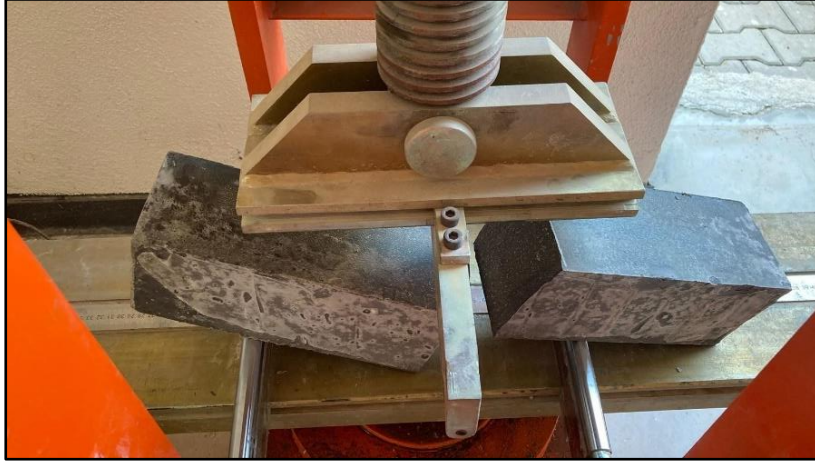
- Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımını ölçmek amacıyla 100x100x500 mm boyutlarında kiriş numune üretilmiştir. Kirişler 28 ve 56 gün boyunca standart küre tabi tutulduktan sonra TS EN 12390-5'e göre eğilme dayanımı testi uygulanmıştır.

Her deneyden önce deney makinesinin tüm yükleme yüzeyleri temizlenmiş, deney numunesinin silindirlerin temas edeceği yüzeylerindeki herhangi gevşek tane veya diğer fazlalık malzemeler alınmıştır. Kür havuzundan çıkarılan kiriş numuneler yüzeylerindeki fazla su kurulandıktan sonra makinede tam merkeze hizalanarak ve numune boyuna eksenine üst ve alt yükleme silindirleri boyuna dik açı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme hızı standarda göre 0,04 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$) ila 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$) arasında sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu çalışmada kullanılan makinede yükleme hızı 0,05 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$) olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.16. Kiriş numune üretimi



Şekil 3.17. Eğilme dayanımı deneyi uygulaması

- Darbe Dayanımı Deneyi

ACI 544.2R-89 standardına göre darbe direncini ölçmek için ağırlıklı sarkaç Charpy tipi darbe testi, ağırlık düşürme testi, sabit gerinim oranı testi, mermi darbe testi, split-Hopkinson çubuk testi, patlayıcı testi ve aletli sarkaç testi uygulanabilmektedir. Bu tür testlerden elde edilen sonuçlar, farklı karışımların göreceli değerlerini tespit etmek ve ayrıca belirli pratik sorunlara yanıt sağlamak için yararlıdır. Ancak numune geometrisine, test sistemi uygunluğuna, yükleme konfigürasyonuna, yükleme hızına ve öngörülen başarısızlık kriterlerine bağlıdır. Geleneksel testlerin en basiti, bir sonraki alt bölümde açıklanan “tekrarlanan darbe”, ağırlık düşürme testidir.

Bu deney, deney örneğinde önceden belirlenmiş seviyelerde bozulmaya neden olmak için gerekli olan darbe sayısını verir. Bu sayı, belirtilen tehlike seviyelerinde numune tarafından emilen enerjinin niteliksel bir tahmini olarak hizmet eder. Deney, farklı lifli beton karışımlarının göreceli değerlerini karşılaştırmak için kullanılabilir. Bu deneyin sonuçları yüksek değişkenlik gösterir ve farklı karışım türleri, lif içerikleri vb. ile önemli ölçüde değişebilmektedir.

Darbe dayanımını ölçmek amacıyla 64x150 mm boyutlarında disk numuneler üretilmiştir. Metal kalıp olmadığından dolayı 15 cm çapında PVC borular ahşap bir zemin üzerine silikon ile yapıştırılarak bu deney için araştırmacı tarafından özel olarak kalıp oluşturulmuş ve üretimde kullanılmıştır. 28 ve 56 gün standart küre tabi tutulan disk numuneler üzerinde ACI 544.2R-89 standardına göre ağırlık düşürme deneyi uygulanmıştır. Çekiç tekrar tekrar düşürülmüş, ilk gözle görülür çatlak oluşması ve nihai deformasyona neden olması için gereken vuruş sayısı kaydedilmiştir.



Şekil 3.18. Disk numune üretimi



Şekil 3.19. Ağırlık düşürme deney düzeneği ve numune üzerinde uygulaması



Şekil 3.20. Ağırlık düşürme deneyi uygulanan lifsiz numune



Şekil 3.21. Ağırlık düşürme deneyi uygulanan %7 çelik lifli ve %7 polipropilen lifli numuneler

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

SIFCON numuneleri üzerinde yapılan taze ve sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve farklı çıkarımlarda bulunulmuştur.

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Hazırlanan SIFCON karışımı üzerinde işlenebilirliği belirlemek için taze beton deneyleri yapılmıştır. SIFCON karışım hesabı için kendiliğinden yerleşen beton standartlarından faydalanılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonda işlenebilirliğin belirlenmesinde en çok kullanılan deneyler V hunisi, L kutusu ve J halkası deneyleridir.

V hunisi deneyinde kapağın açılıp akışın başladığı andan itibaren kronometre çalıştırılmış ve deney cihazına üstten bakıldığında ışığın görüldüğü an kronometre durdurulmuştur. Çıkan sonuç 8 saniyedir.

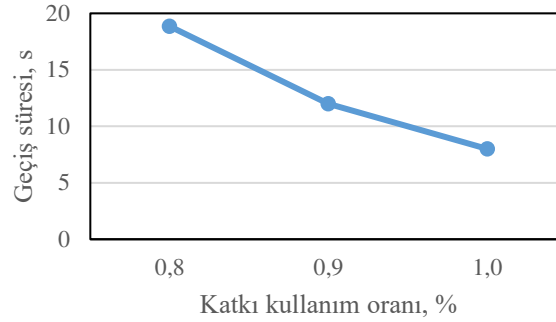
L kutusu deneyinde akışın olduğu yatay düzlemde biriken karışımın yüksekliği H_2 ölçülür ve dikey düzlemde kalan H_1 yüksekliğe oranlanır. Çıkan sonuç geçiş yeteneğidir. Bu deneyde H_1 ve H_2 9,2 cm olarak ölçülmüştür ve çıkan sonuç 1'dir. Hazırlanan karışım 3 donatı arasından istenen düzeyde geçiş yeteneğine sahiptir.

J halkası deney sonuçları incelendiğinde SIFCON karışımı üstün geçiş yeteneklerine sahiptir. Kullanılan yayılma tablasında 500 mm ve 700 mm çaplarında daireler işaretlenmiş ve karışımın bu noktalara ulaşma süreleri sırasıyla 1 saniye ve 3 saniye olarak ölçülmüştür. Halka içi, halka dışı ve merkezdeki çökme yükseklikleri sırasıyla 4mm, 3 mm, 4 mm olarak ölçülmüştür. J halkası ile ölçülen geçiş yeteneği, karşılıklı kenarlardan 4 farklı ring içi ve ring dışı yüksekliklerin ortalamalarından merkezde ölçülen yüksekliğin çıkarılmasıyla elde edilir. Bu deneyde hazırlanan karışımın J halkasından geçiş yeteneği 0,5'tir.

Çizelge 4.1. Taze beton deney sonuçları

Uygulanan Deney		Ölçüm Sonucu
V Hunisi		8 s
L Kutusu		1
J Halkası	t_{500}	1 s
	t_{700}	3 s
	PJ	0,5 mm

V hunisi deneyi uygulanırken en uygun sonuca ulaşmak amacıyla farklı oranlarda katkı kullanılmıştır. Düşük katkı oranında akıcılık yeteneği az olurken katkı oranı arttıkça akıcılık artmış dolayısıyla işlenebilirlik de artmıştır. Aşağıda verilen grafikte aynı su/bağlayıcı oranında farklı katkı kullanımının V hunisinden geçiş süresine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Katkı kullanım oranına bağlı olarak V hunisi geçiş süresi değişimi

4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

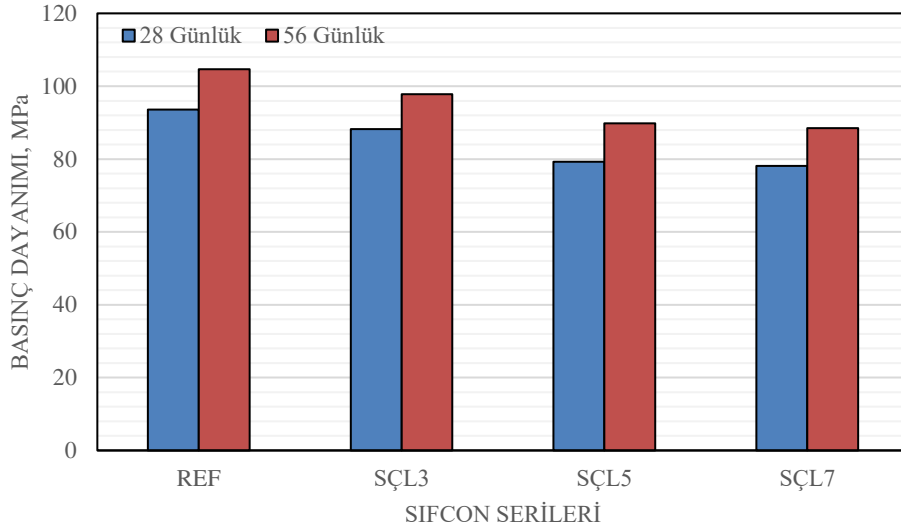
4.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Basınç dayanımı deney sonuçlarına bakıldığında zaman kür süresi arttıkça dayanımın arttığı görülmüştür. En yüksek değer 56 gün standart kürde bekleyen REF kodlu lif içermeyen numunede 108 MPa olarak ölçülmüştür. Lif içeren numunelerde her iki yaş dayanımında da çelik lifli numuneler aynı orandaki polipropilen lifli numunelerden daha yüksek basınç dayanımı sonucu vermiştir. Böylece çelik lifin, polipropilen life göre basınç dayanımını iyileştirmede daha çok etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki lif çeşidinde de lif hacmi artış gösterdikçe basınç dayanımı düşüş yaşamıştır. Bu sebeple lif hacmi ve basınç dayanımı parametreleri karşılaştırıldığında ikisi arasında ters orantı söz konusudur. Artan lif oranına bağlı olarak çimento bulamacının içinde liflerin etrafında oluşan boşluklardan dolayı kusurların arttığı düşünülmektedir.

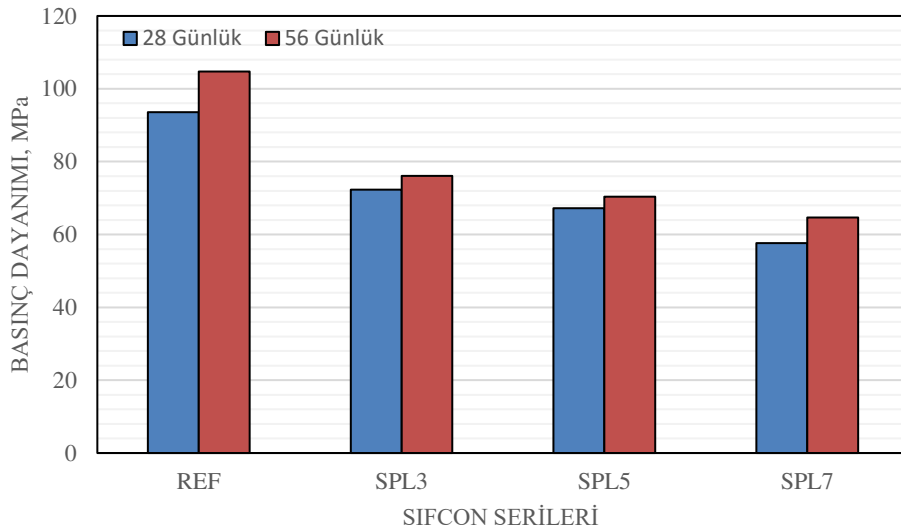
Çizelge 4.2. Basınç dayanımı deney sonuçları

Numune Kodları	Basınç Dayanımları (MPa)	
	28 Günlük	56 Günlük
REF	93,6	104,7
SÇL3	88,25	97,8
SÇL5	79,3	89,8
SÇL7	78,15	88,45
SPL3	72,3	76,05
SPL5	67,2	70,35
SPL7	57,65	64,7

SIFCON üretiminde lifsiz referans numunesi dışında çelik lif ve polipropilen lif kullanıldığından dolayı basınç dayanımı sonuçlarının daha anlaşılır bir şekilde karşılaştırılabilmesi için çelik lif ve polipropilen lifli seriler ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiş ve Şekil 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Referans numunesi ve çelik lifli numunelerin basınç dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi



Şekil 4.3. Referans numunesi ve polipropilen lifli numunelerin basınç dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi

Şimşek ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada çelik lifli beton numunelerinin 7 ve 28. günde basınç dayanımlarını ölçmüş ve her iki yaşta da lif oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü sonucuna varmıştır. Lif oranı ve basınç dayanımı arasında ters ilişki olduğunu

belirtmişlerdir. Taze betondaki hava yüzdesini incelemiş ve basınç dayanımı ile ilişkilendirmişlerdir. Buna göre taze betonda hava yüzdesi arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Lif kullanımı arttıkça betondaki hava yüzdesi artmış ve basınç dayanımını olumsuz etkilemiş olabilir.

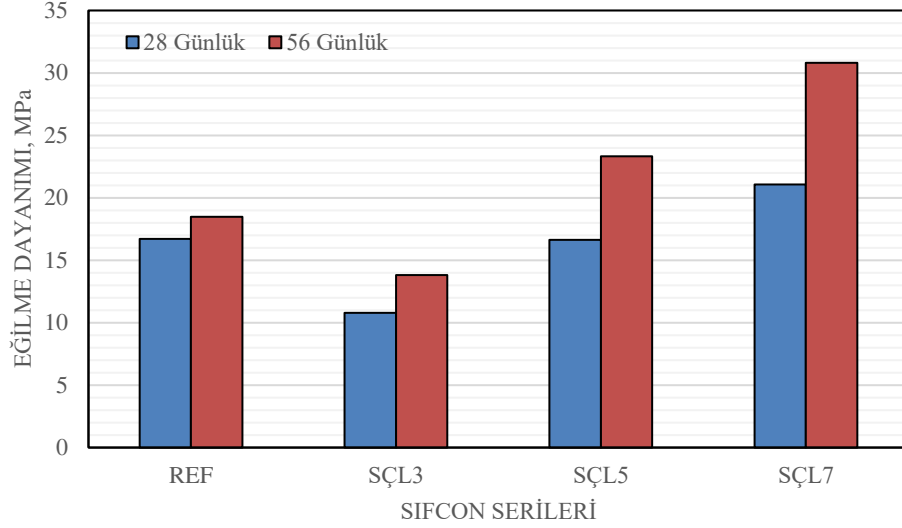
4.2.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde basınç dayanımında olduğu gibi kür süresi arttıkça dayanım artmıştır. Numunelerde kullanılan lif oranı arttıkça eğilme dayanımlarının arttığı böylece lif oranıyla eğilme dayanımı arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı değeri 30,82 MPa ile SÇL7 kodlu numunede ölçülmüştür. Çelik lifli numunelerin eğilme dayanımları polipropilen lifli numunelerin eğilme dayanımlarından yüksek çıkmıştır. Bu durum çelik lifin çekme dayanımının 1345 MPa olması ve polipropilen lifin çekme dayanımının 560 MPa olması ile açıklanabilir.

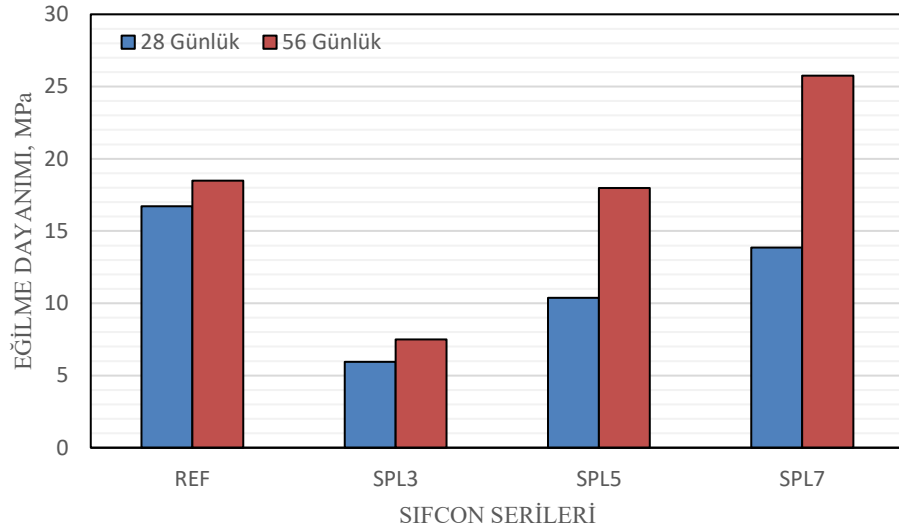
Çizelge 4.3. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Numune Kodları	Eğilme Dayanımları (MPa)	
	28 Günlük	56 Günlük
REF	16,704	18,48
SÇL3	10,8	13,816
SÇL5	16,641	23,325
SÇL7	21,08	30,82
SPL3	5,94	7,506
SPL5	10,386	17,987
SPL7	13,851	25,75

Çelik lifli ve polipropilen lifli numunelerin referans numunesi ile ayrı ayrı karşılaştırılabilmesi için Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Referans numunesi ve çelik lifli numunelerin eğilme dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi

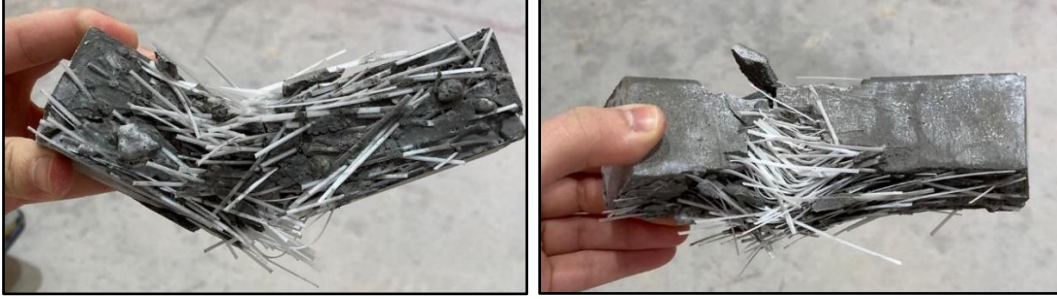


Şekil 4.5. Referans numunesi ve polipropilen lifli numunelerin eğilme dayanımlarının grafik üzerinde gösterimi

Kızılırmak ve arkadaşlarının (2019) yaptığı çalışmada da lif hacmi arttıkça eğilme dayanımında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durumu Sahmaran ve Yaman (2007), üretilen numune içerisinde artan lif kullanım oranıyla beraber numune üzerine gelen yükü taşıyan lif sayısının daha fazla olmasına bağlamıştır. Artan lif hacmi ve sayısıyla birlikte beton matrisi içerisinde yer alan lifler arası mesafe azalır ve lifler daha iyi köprü görevi görür. Betonda çatlak oluşumu ve oluşan çatlakın yayılması gecikir (Sahmaran ve Yaman, 2007:152).

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ön döküm deneylerinde üretilen 40x40x160 mm prizmatik numuneler eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Polipropilen lif içeren numunelerde kırılma anındaki yük en yüksek seviyeye gelmiş ve eğilme dayanımı ekranda belirtilmiştir.

Buna rağmen cihaz yüklemeye devam etmiş ve numune üzerinde oluşan deformasyon artmıştır. Kalıp boyutları dikkate alındığında kullanılan polipropilen lifin 55 mm uzunlukta ve 0,80 mm çapta olmasının buna neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.6. Eğilme deneyi uygulanmış polipropilen lifli prizmatik numuneler

Koç ve Birinci (2012) yaptıkları çalışmada farklı boyutlarda lifli beton numunesi üretmişler ve bu numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulamışlardır. Aynı karışım oranına ve aynı lif kullanım oranına sahip numunelerin kırılmalarında farklılık gözlemlemişlerdir ve eleman boyutları azaldıkça elemanın daha sünek davranış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Eleman boyutları, elemanın davranışını da değiştirmiştir (Koç ve Birinci, 2012: 36).

4.2.3. Darbe Dayanımı Deney Sonuçları

Bir darbe dayanımı deneyi olarak kabul edilen ağırlık düşürme deneyi sonuçları incelendiğinde kür süresi ve lif oranı arttıkça darbe dayanımı da artış göstermiştir. Betona lif ilavesinin sünekliği arttırdığı bilinmektedir. Referans numunede lif olmadığından dolayı gevrek davranış göstermiş ve darbe yükü altında ortadan ikiye ayrılmıştır. Çelik lif, polipropilen life göre darbe dayanımını arttırmada daha iyidir. En yüksek darbe dayanımını veren numune 56 gün küre tabi tutulan SÇL7 numunesidir. 28 ve 56 gün kürede bekletilen numunelere uygulanan ağırlık düşürme deneyinden elde edilen ilk çatlak için gereken darbe sayısı ve nihai deformasyon için gerekli darbe sayısı Çizelge 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. İlk çatlak için gerekli darbe sayıları

Numune Kodları	İlk Çatlak için Gerekli Darbe Sayıları	
	28 Günlük	56 Günlük
REF	25	23
SÇL3	28	40
SÇL5	35	65
SÇL7	70	105
SPL3	25	38
SPL5	40	50
SPL7	58	83

Çizelge 4.5. Nihai deformasyon için gerekli darbe sayıları

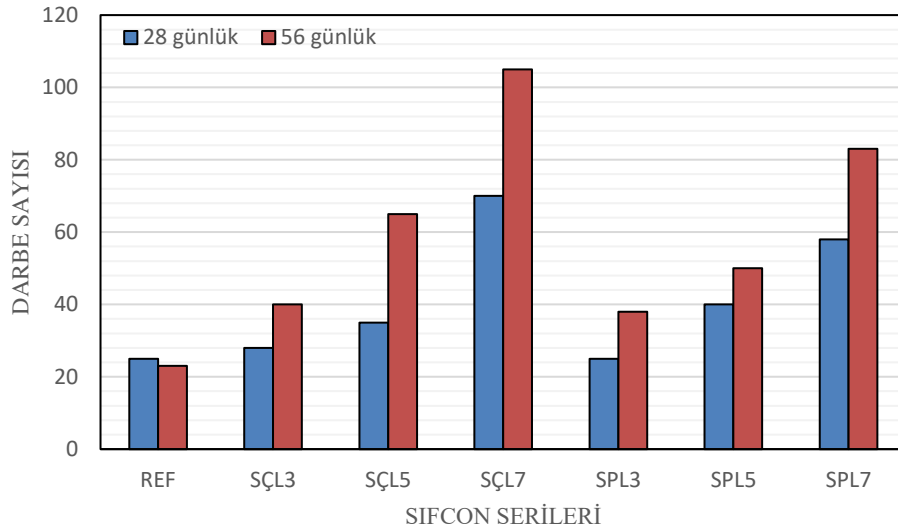
Numune Kodları	Nihai Deformasyon için Gerekli Darbe Sayıları	
	28 Günlük	56 Günlük
REF	63	43
SÇL3	90	190
SÇL5	110	178
SÇL7	175	320
SPL3	78	95
SPL5	80	173
SPL7	160	290

Ağırlık düşürme deney cihazının çalışma prensibi, numune üzerine gelen tekrarlı dinamik yüklere karşın malzemenin enerjiyi sönümleme yeteneğinin ölçülmesidir. Bu tezde yapılan deneysel çalışmalarda çelik lif ve polipropilen lif tercih edilmiştir. Lifsiz üretilen referans karışımında darbe yükünü sönümleyecek bir lif olmadığından malzeme tokluğu azdır, yani kırılmaya karşı gösterebileceği direnci azdır. Bu sebeple numune ortadan ikiye ayrılmıştır. Bu noktada lif kullanımının önemi ortaya çıkmıştır. Lif kullanımı sayesinde malzemenin sünekliği artmış ve deney cihazında kullanılan düşen ağırlık numune üzerinde fazla bir hasara yol açamamış ve lifler ilk çatlak oluşumunu geciktirmiştir.

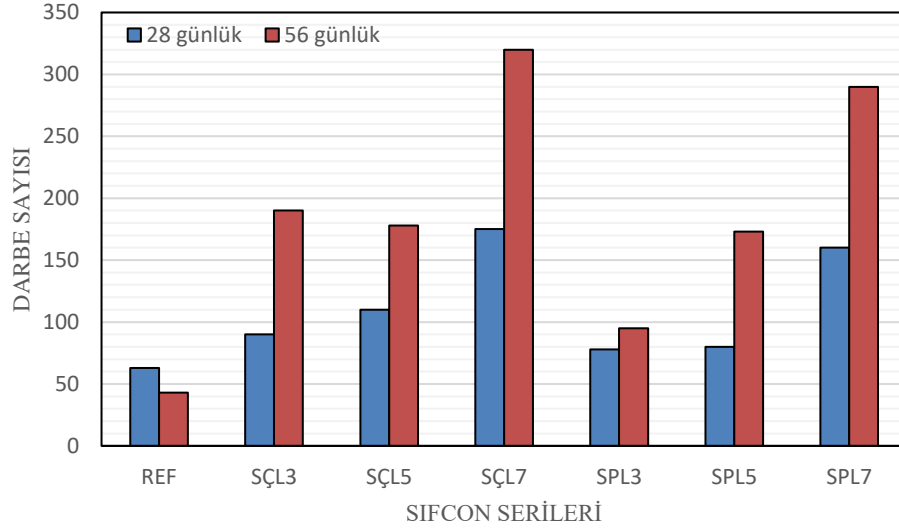
Kızılırmak ve arkadaşları (2019) yaptığı çalışmada üzerine çentik atılmış kiriş numune üzerine darbe yükü düşürerek darbe dayanımı deneyi uygulamıştır. Kullanılan deney yöntemi farklı olsa da aynı bu çalışmada olduğu gibi üzerine darbe yükü gelen lifsiz numune ortadan iki parçaya ayrılmıştır. Böylece darbe yüküne karşı yüksek dayanım istenen betonlarda lif kullanımının önemi ortaya çıkmaktadır.

Kıllı (2018) çalışmasında kür şartlarına bağlı olarak SIFCON'un mekanik özelliklerindeki değişimi incelemek istemiş ve bu amaçla darbe dayanımına da bakmıştır. 64x150 mm boyutlarında silindir numune üzerinde ağırlık düşürme deneyi uygulanmıştır. Kür şartlarından bağımsız olarak tüm numunelerde lif oranı arttıkça darbe dayanımı artmıştır. Yazar bu durumu lif miktarının artmasıyla liflerin köprü görevi görerek yükü homojen olarak yayması ile açıklamıştır.

28 ve 56 günlük disk numuneler üzerinde uygulanan ağırlık düşürme deneyinde ilk çatlak oluşumu ve nihai deformasyon oluşumu için gereken darbe sayıları grafikler üzerinde gösterilmiştir. İlk çatlak için gereken darbe sayısı Şekil 4.7'de, nihai deformasyon için gereken darbe sayısı Şekil 4.8'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kür süresi arttıkça darbe yüküne karşı gösterilen direnç de artmıştır. Çelik lifli SIFCON, polipropilen lifli SIFCON'a göre darbe dayanımında daha üstün performans göstermiştir.



Şekil 4.7. İlk çatlak için gerekli darbe sayılarının grafikte gösterimi



Şekil 4.8. Nihai deformasyon için gerekli darbe sayılarının grafikte gösterimi

4.2.4. Birim Maliyet Analizi

Üretilen SIFCON numunelerinde her bir seri için birim maliyet analizi yapılmış ve Çizelge 4.6’da verilmiştir. Çelik lif polipropilen life göre daha maliyetlidir ancak mekanik özellikleri iyileştirmede daha etkilidir. Fiyat/performans düşünülerek mühendislik çalışması yapılacaksa polipropilen lif iyi bir seçenek olabilir. Birim maliyet cetveli Ekim 2023 tarihinde oluşturulmuştur.

Çizelge 4.6. SIFCON birim maliyet cetveli

Malzemeler	SIFCON Seri Kodları						
	REF	SÇL3	SÇL5	SÇL7	SPL3	SPL5	SPL7
Çimento (TL/m ³)	1710	1658,7	1624,5	1590,3	1658,7	1624,5	1590,3
Silis dumanı (TL/m ³)	3861	3745,17	3667,95	3590,73	3745,17	3667,95	3590,73
Kireçtaşı (TL/m ³)	138,85	134,69	131,91	129,14	134,69	131,91	129,14
Su (TL/m ³)	15,2	14,75	14,45	14,14	14,75	14,45	14,14
Katkı (TL/m ³)	421,12	408,36	399,85	391,34	408,36	399,85	391,34
Çelik lif (TL/m ³)	-	16522,97	27538,28	38553,59	-	-	-
Polipropilen lif (TL/m ³)	-	-	-	-	5216,09	8693,48	12170,87
Toplam maliyet (TL/m³)	6146,17	22484,64	33376,94	44269,24	11177,76	14532,14	17886,52

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında farklı oranda çelik ve polipropilen lifler kullanılarak hazırlanan SIFCON kompozitleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan yola çıkarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Darbe dayanımını ölçmek için ağırlık düşürme deneyi, yüksek hızda mermi darbe deneyi kullanılan yöntemler arasındadır. Çalışmalarda bu deneyler kullanılabilir.
- Betonun darbe dayanımını basınç dayanımı da etkilemektedir. Dolayısıyla betonun basınç dayanımını etkileyen bütün parametreler darbe dayanımı da etkilemektedir.
- SIFCON kompozit malzemesi üretilirken lifler beton harç karıştırıcısına atılmayıp, kalıplara önceden yerleştirilmektedir. Bu sebeple liflerin kalıba homojen olarak ve liflerin tek yönde olmayacak şekilde dağıtılması çok büyük önem taşımaktadır. Piyasada bu yapı malzemesinin kullanılabilmesi için kalifiyeli eleman gerekmektedir.
- SIFCON'da kullanılacak lif oranları belirlenirken liflerin yerleşme sorunları da dikkate alınmalıdır.
- SIFCON'da kullanılacak lif türü belirlenirken kullanım alanı da dikkate alınmalıdır. Dar kesitli yapı elemanlarının üretiminde boy oranı yüksek liflerin kullanımı uygun olmayabilir. Örneğin bu tezde ön döküm üretimlerinde kullanılan 55 mm boyundaki polipropilen lifler 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara ancak tek yönlü olarak yerleştirilebilmiştir.
- SIFCON üretiminde polipropilen lif kullanıldığında kalıba önceden yerleştirilen lifler üzerine harç döküldüğünde lifler kalıp yüzeyine çıkmakta ve homojenlik bozulmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için kalıbın önce yarısını sonra kalanını olmak üzere iki aşamalı döküm yapılabilir.
- SIFCON üretiminde lifler kalıba önceden yerleştirilir ve hazırlanan karışım sonradan kalıba dökülür. Döküm işlemi tamamlandığında beton yüzeyinden lif parçaları gözükebilmekte ve beton sertleştikten sonra deney sırasında sorun çıkarabilmektedir. Döküm bittikten hemen sonra mala ile yüzey düzeltme işlemi yapılabilir.
- En yüksek basınç dayanımı lifsiz olan REF numunesinde 108 MPa olarak ölçülmüştür. Lif oranı arttıkça SIFCON numunelerinin basınç dayanımları azalmıştır. Artan lif oranıyla birlikte beton matrisi içerisinde kusurların arttığı düşünülmektedir.

- Eğilme dayanımı deney sonuçları çelik lifli numunelerde daha yüksek çıkmıştır ve en yüksek değer 56 gün küre tabi tutulan SÇL7 numunesinde 30,82 MPa olarak ölçülmüştür. Lif oranı arttıkça eğilme dayanımı artmıştır.
- Çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında hem basınç hem de eğilme dayanımında çelik lifin polipropilen life göre daha yüksek performans sergilediği, mekanik özellikleri daha çok iyileştirdiği görülmüştür.
- Birim maliyet düşünüldüğünde polipropilen lif kullanımı çelik life göre daha ekonomik olacaktır. Başka bir alternatif olan karma lif kullanımı düşünülebilir.
- Özellikle eğilme ve darbe dayanımları yüksek malzeme kullanılması gereken durumlarda çelik veya polipropilen lif takviyeli SIFCON kompozit malzemesinin kullanılmasının önemli bir çözüm olacağı görülmüştür.
- Bu çalışma da dahil olmak üzere literatürde çoğunlukla çelik ve polipropilen lif kullanılmaktadır. Çalışmalarda SIFCON kompozitinde bazalt lif, cam lifi, karbon fiber lif kullanımı birer alternatif olarak düşünülebilir.
- Bu çalışmada kullanılan çelik lif 3D geometriye sahiptir. Günümüzde 4D ve 5D lif geometrisine sahip çelik lifler de üretilmektedir. Lif geometrisinin etkilerini karşılaştırabilmek amacıyla çalışmalarda bu tip lifler de kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- Abd, M. S. & Abd. A. A.** (2021). Behavior of Slurry Infiltrated Fibrous Concrete (SIFCON) Deep Beams: With and Without Openings. *Journal of Physics: Conference*, 1173(012029), s. 1-15.
- ACI 544.2R-89**, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete”, American Concrete Institute.
- Açıkgenç, M.** (2015). *Çelik Lif Donatılı Betonların Tasarımı için Grafik Tabanlı Bir Yaklaşım*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Algın, Z., Özbebek, E., Gerginci, S. & Mermerdaş, K.** (2022). Effects of Basalt Fibre Utilization on Durability and Mechanical Properties of SIFCON. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 12(2), s. 231-241.
- Alkayış, M. H., & Başığit, C.** (2021). Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24, s. 455-462.
- Aydın, F.** (2019). Farklı Sıcaklıkların SIFCON Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *7th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, s. 22-24.
- Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H. & Baradan, B.** (2005). Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Otoklav Kürlü SIFCON'un Mekanik Özellikleri. *6. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, s. 307-316.
- Bayrak, O. Ü., Bingöl, M. Z. & Bayata, H. F.** (2019). SIFCON ile Üretilen Beton Yolların Bazı Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), s. 411-424.
- Bozkırlı, Ö. E.** (2019). *Farklı Lif Türü ve Hacminin SIFCON'un Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars.
- Bulutlar, Y. A.** (2006). *Çelik Tel İçeriğinin ve Dayanımının SIFCON'un Mekanik Davranışına Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Canbay, M.** (2014). *Çelik ve Polipropilen Liflerin Yalın ve Kombinasyonlu Olarak SIFCON'da Kullanılması*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Canbaz, M., & Ünüvar, C.** (2016). Lif ve Çimento Türünün Sifcon Özelliklerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), s. 400-404.

- İpek, M., Canbay, M., & Yılmaz, K.** (2015). Çelik ve Polipropilen Liflerin Yalın ve Kombinasyonlu Olarak Kullanılmasının SIFCON'un Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), s. 41-52.
- Jerry, A. H. & Fawzi, N. M.** (2022). The Effect of Using Polyolefin Fiber on Some Properties of Slurry-Infiltrated Fibrous Concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31, s. 170-176.
- Khamees, S. S., Kadhum, M. M. & Alwash, N. A.** (2020). Effects of Steel Fibers Geometry on the Mechanical Properties of SIFCON Concrete. *Civil Engineering Journal*, 6(1), s. 21-33.
- Koç, V. & Birinci, F.** (2012). Lifli Betonda Boyut Etkisi Tokluk ve Kırılma Enerjisi. *SDU International Technologie Science*, 4(3), s. 24-40.
- Kozak, M.** (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), s. 26-35.
- Kıllı, A.** (2018). *Kür Şartlarının SIFCON'un Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Kızılrnak, C., Aydın, S. & Yardımcı, M. Y.** (2019). Çelik Lif Kanca Geometrisinin Yüksek Dayanımlı Lifli Betonların Statik ve Darbe Yükleri Altında Eğilme Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), s. 1609-1627.
- Mert, N.** (2007). *Karbon Fiber Takviyeli Polimer Plakalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Morishima, S., Yamaguchi, M., Shibuya, S. & Kaneyasu, S.** (2020). Influence of Fiber Type on Fundamental Mechanical Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete. *Cement Science and Concrete Technology*, 73(1), s. 311-317.
- Morishima, S., Yamaguchi, M., Shibuya, S., Kaneyasu, S. & Sueishi, T.** (2020). Effects of Fiber Type on Blast Resistance of Slurry-Infiltrated Fiber Concrete Under Contact Detonation. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18, s. 157-167.
- Mohammed, G. K., Sarsam, K. F. & Gorgis, I. N.** (2020). Flexural Performance of Reinforced Concrete Built-up Beams with SIFCON. *Engineering and Technology Journal*, 38(5), s. 669-680.

Nili, M., Ghorbankhani, A. H., AlaviNia, A. & Zolfaghari, M. (2016). Assessing the Impact Strengh of Steel Fibre- Reinforced Concrete Under Quasi-Static and High Velocity Dynamic Impacts. *Construction and Building Materials*, 107, s. 264-271.

Oltulu, M., & Altun, M. G. (2018). Betonun Darbe Dayanımının Tespitinde Ağırlık Düşürme Deney Yöntemi ve Yapılan Çalışmalar. *GÜFBED*, 8(1), s. 155-163.

Öztürk, M., Sevim, U. K., Akgöl, O. & Karaaslan M. (2016). Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Betonlarda Lif Yönünü ve Dağılımını Belirlemede Yeni Bir Yaklaşım. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS 2), s. 187-192.

Ramkumar, V. R., Gunasekaran, M., Kothandapani, K. & Asrani, N. P. (2019). Development of a Novel Low Carbon Cementitious Two Stage Layered Fibrous Concrete With Superior Impact Strength. *Journal of Building Engineering*, 25.

Sahmaran, M. & Yaman, O. I. (2007). Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting with a High-Volume Coarse Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 21(1), s. 150-156.

Schneider, B. (1992). Development Of Sifcon Through Applications, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, *E&F Spon*, s. 177-194.

Sonone, R. G., Sharma, S. & Sharma, H. K. (2020). SIFCON-A High Performance Concrete- Experimental Investigations. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 10(2), s. 109-112.

Şimşek, O., Toklu, K. & Ünal, M. T. (2021). Çelik Liflerin Geometrik Şeklinin ve Oranının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 24(2), s. 409-415.

Taşdemir, M. A. & Bayramov, F. (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. *İTÜ Dergisi*, 1(2).

Taşdemir, M. A., Bayramov, F., & Yerlikaya, M. (2003). Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (426), s. 76-84.

TS EN 12350-9, “Taze Beton Deneyleri Bölüm 9: Kendiliğinden Yerleşen Beton- Çökme- V Hunisi Deneyi”, Türk standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 12350-10, “Taze Beton Deneyleri Bölüm 10: Kendiliğinden Yerleşen Beton- Çökme- L Kutusu Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 12350-12, “Taze Beton Deneyleri Bölüm 12: Kendiliğinden Yerleşen Beton- Çökme- J Halkası Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 12390-3, “Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 12390-5, “Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Xiao, J., Li, L., Shen, L. & Poon, C. S. (2015). Compressive Behavior of Recycled Aggregate Concrete Under Impact Loading. *Cement and Concrete Research*, 71, s. 46-55.

Yazıcı, Ş. & Sezer, G. İ. (2008). Çelik Lifli Betonların Darbe Direncine Agrega Maksimum Boyutunun Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14, s. 237-245.

