**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÇELİK TEL İÇERİĞİNİN VE DAYANIMININ SIFCON'UN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİLERİ

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**
**Programı: Yapı Mühendisliği**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Y. Alper BULUTLAR**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR**

**MAYIS 2006**

# ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan sayın hocam Prof.Dr. Canan Taşdemir'e,
Çalışmalarımda ilgi ve yardımları dolayısıyla sayın hocalarım Prof.Dr. M.Ali Taşdemir' e ve Prof.Dr. Mehmet Uyan'a, başta Araş.Gör. Cengiz Şengül ve Araş.Gör. Anıl Doğan olmak üzere tüm Yapı Malzemesi Anabilim Dalı araştırma görevlilerine, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuarı çalışanları ile,
Gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabır için aileme,

teşekkür ederim.

Mayıs 2006 Y.Alper BULUTLAR

# İÇİNDEKİLER

**TABLO LİSTESİ** **vi**
**ŞEKİL LİSTESİ** **vii**
**SEMBOL LİSTESİ** **viii**
**ÖZET** **ix**
**SUMMARY** **x**
**1.GİRİŞ** **1**
**2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER** **3**
2.1. Normal Betonlar 3
2.2. Özel Betonlar 3
2.2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar 4
2.2.2. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler 4
2.2.2.1. Yoğunlaştırılmış Çimento ve Ultra İnce Tane Esaslı Malzemeler (DSP) 4
2.2.2.2. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler (RPC) 5
2.2.2.3. Büyük Boşluklardan Arınmış Polimer Hamurlar (MDF) 6
2.2.2.4. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON) 7
2.3. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller 10
2.4. Çelik Lif Takviyesinin SIFCON Özellikleri Üzerindeki Etkileri 12
2.4.1. Lif-Matris Aderansının Beton Özelliklerine Etkisi 15
2.4.2. Lif Özelliklerinin Beton Özelliklerine Etkisi 16
2.4.2.1. Lif Boyunun Etkisi 17
2.4.2.2. Lif Geometrisinin Etkisi 18
2.4.2.3. Lif İçeriği, Lif Dağılımı ve Lif Narinlik Oranının Etkisi 19
2.5. Silis Dumanının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi 19
2.5.1. Silis Dumanının Özellikleri 21
2.5.2. Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri 23
2.5.3. Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri 23

2.5.4. Betonun Durabilitesine Etkileri 23
**3. SIFCON'UN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ 25**
3.1. Basınç Yüklemesi Altında Davranışı ve Dayanımı 28
3.2. Çekme Yüklemesi Altında Davranışı ve Dayanımı 28
3.3. Eğilme Yüklemesi Altındaki Davranışı ve Dayanımı 29
3.4. Darbe Etkisinde Davranışı ve Dayanımı 30
**4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 31**
4.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması 31
4.1.1. Çimento 31
4.1.2. Silis Dumanı 32
4.1.3. Silis Unu 33
4.1.4. Çelik Lif 33
4.1.5. Akışkanlaştırıcı Katkı 34
4.2. Beton Karışımı 34
4.3. Beton Üretiminde ve Üretim Sonrasında İzlenen Sıra 35
4.4. Numune Kodlarının Belirlenmesi 35
4.5. Numune Boyutları ve Şekilleri 36
4.6. Taze Beton Deneyleri 37
4.6.1. Birim Ağırlık Deneyi 37
4.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri 37
4.7.1. Silindir Yarmada Çekme Deneyi 37
4.7.2. Silindir Basınç Deneyi 38
4.7.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyleri 38
4.7.3.1. Kırılma Enerjisinin Hesaplanması 41
4.7.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması 41
4.7.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması 42
4.8. Sertleşmiş Beton Özelikleri 42
**5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ ve İRDELENMESİ 44**
5.1. Silindir Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 45
5.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 45

5.2.1. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi 46
5.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 47
5.4. Hesaplanan Karakteristik Boyların Değerlendirilmesi 49
**6. GENEL SONUÇLAR 51**
**KAYNAKLAR 53**
**EKLER 55**
**ÖZGEÇMİŞ 64**

# TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**

**Tablo 2.1:** NDB, YDB ve RPB'nun Mekanik Özelliklerinin Kıyaslanması ….....6

**Tablo 2.2:** Tek Eksenli Çekme Halinde SIFCON Üzerinde Elde Edilen Değerler....7

**Tablo 2.3:** SIFCON Numunesi Bileşim Değerleri…...……...8

**Tablo 2.4:** Bazı Tel Donatılı Betonların Özelikleri ……...……...…9

**Tablo 2.5:** Bazı Metalik Liflerin Tipik Özelikleri……..…….....11

**Tablo 2.6:** Lif Takviyeli Betonun Bazı Özelliklerinde Matris Malzemesine Oranla Görülen Artışın Yaklaşık Değerleri ……...14

**Tablo 4.1:** Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özelikleri……..…….....32

**Tablo 4.2:** Kullanılan Silis Dumanının Kimyasal Özelikleri …….....…...32

**Tablo 4.3:** Kullanılan Silis Ununun Fiziksel Özelikleri …….....33

**Tablo 4.4:** Kullanılan Silis Ununun Kimyasal Özelikleri ……...33

**Tablo 4.5:** OL 6/16, Dramix ZP305 Normal ve Yüksek Muk. Liflerin Teknik Özelikleri……...34

**Tablo 4.6:** Glenium 51 Tipi Hiperakışkanlaştırıcının Özelikleri ……....34

**Tablo 4.7:** Üretilen Betonların Kodları ve Karışımlardaki Lif Yüzdeleri ……..….36

**Tablo 4.8:** Beton Bileşimleri ve Taze Beton Özelikleri……..37

**Tablo 4.9:** Sertleşmiş Beton Özelikleri……..……....43

# ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa No**

**Şekil 2.1:** Farklı Oranlarda Lif İçeren Kompozitler için Tipik Yük–Sehim Eğrileri……17

**Şekil 2.2:** Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi …….……18

**Şekil 2.3:** Silis Dumanı İçeren ve İçermeyen Betonların Ara yüz Bölgesinin Şematik Gösterimi …….……...…….21

**Şekil 3.1:** SIFCON'un Birim Ağırlığının Lif İçeriği ile Değişimi ……..…….25

**Şekil 3.2:** SIFCON'un Çekme Altında Tipik Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi…....26

**Şekil 3.3:** SIFCON ve Çelik Tel Donatılı Harcın Gerilme-Uzama Eğrilerinin Karşılaştırılması ……...…..27

**Şekil 4.1:** Üretilen Her Bir Grubun Basınç Dayanım Ortalamaları ……..…….38

**Şekil 4.2:** RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi Yükleme Düzeni…….……....39

**Şekil 4.3:** RILEM Kırılma Enerjisi Deneyleri Veri Toplama Sistemi ……..40

**Şekil 4.4:** Örnek Bir Yük-Sehim Eğrisi ……....41

**Şekil 5.1:** Yarmada Çekme Dayanımları ……..……....45

**Şekil 5.2:** Silindir Basınç Dayanımları……... ……..46

**Şekil 5.3:** Elastisite Modülleri……...47

**Şekil 5.4:** Numunelerin Kırılma Enerjileri……..…….48

**Şekil 5.5:** Numunelerin Ortalamaları Alınarak Oluşturulmuş Yük-Sehim Eğrileri…….……..48

**Şekil 5.6:** Numunelerin Net Eğilme Dayanımları……..……..49

**Şekil 5.7:** Numunelerin Karakteristik Boyları……..…….50

# SEMBOL LİSTESİ

$V_f$ : Çelik lif hacmi
L : Lif uzunluğu
d : Lif çapı
$P_{max}$ : Maksimum yük
D : Silindirin çapı (mm)
L : Silindirin yükseklik (mm)
$\sigma$ : Yarma-Çekme dayanımı ($N/mm^2$)
$G_f$ : Kırılma enerjisi (N/m)
$W_o$ : Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m)
m : Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)
g : Yer çekimi ivmesi (9.81 $m/sn^2$)
$\delta_o$ : Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)
$A_{lig}$ : Etkin kesit alanı ($m^2$)
$F_{net}$ : Net eğilme dayanımı ($N/mm^2$ )
ao : Çatlak derinliği (mm)
B : Numune kesitinin genişliği (mm)
D : Numune kesitinin yüksekliği (mm)
$l_{ch}$ : Karakteristik boy (mm)
$f_t$ : Yarmada çekme dayanımı ($N/mm^2$)
E : Elastisite modülü ($KN/ mm^2$)

## ÇELİK TEL İÇERİĞİNİN VE DAYANIMININ SIFCON'UN MEKANİK DAVARANIŞINA ETKİLERİ


### ÖZET

Yarı gevrek bir malzeme olarak tanımlanan betonun kırılması sırasında yutulan enerji düşüktür. Gevrek kırılmayı önlemek ve sünek davranış elde etmek için kısa kesilmiş çelik lifler bu malzemelere eklenir. Böylece; son yirmi yıl içerisinde yüksek çekme dayanımına, yüksek enerji yutma kapasitesine ve yüksek basınç dayanımına sahip yeni çimento esaslı kompozitler geliştirildi. Sunulan bu çalışma, hamur enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON)'un mekanik özelliklerini incelemektedir.

SIFCON'da en belirgin performans artışı, kırılma sırasındaki enerji yutma kapasitesinden ileri gelmektedir. Mükemmel darbe dayanımı özelliklerine sahip olmaları nedeniyle betonarme köprülerin onarımında, stratejik yapılarda kullanılabilirler.

Bu çalışmanın amacı; SIFCON'un elastisite modülü, yarma-çekme dayanımı, net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerinin çelik lif içeriği ve dayanımıyla değişiminin incelenmesidir.

Yapılan çalışma kapsamında beş beton karışımı farklı metalik lifler katılarak üretildi. Çelik lifler karışım içindeki hacimsel yüzdeleri toplamı % 5 ve % 10 olacak şekilde karışıma farklı miktarlarda katıldı. SIFCON, çimento, silis dumanı, çok ince kum, süper akışkanlaştırıcı ve çelik liflerin kullanılmasıyla üretildi.

Bütün karışımlarda, kullanılan bağlayıcı ve karma suyu miktarı aynı oldu. Silis dumanı, çimento ağırlığının % 20'si oranında olmak üzere karışıma bulamaç şeklinde katıldı. İşlenebilirliği artırmak amacıyla polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanıldı. Su/bağlayıcı oranı da 0,25'de sabit tutuldu.

Standart basınç ve elastisite modülü deneyleri için 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindirler bütün karışımlar için hazırlandı. Yarmada çekme deneyleri için disk numuneler ve kırılma enerjisi deneyleri için de 280 mm uzunluğunda ve 70x70 mm kesitinde kirişler hazırlandı. Kirişlerde açıklığın ortasındaki etkin kesit alanı testere ile kesilerek 35x70 mm'ye düşürüldü. Net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi bu çentikli kirişlerden elde edildi. Yapılan deneylere dayanarak çelik lif içeriğinin ve dayanımının hamur enjekte edilmiş lifli betonun tepe noktası sonrası davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varıldı. Kırılma enerjisindeki ve mekanik özelliklerdeki artışlar çelik lif dayanımına ve miktarına bağlıdır. Çelik lif miktarına ve dayanımına bağlı olarak kırılma enerjisinde ve net eğilme dayanımında artışlar elde edildi. Üretilen numunelerin kırılma enerjilerinde lifsiz numunelerin 2000 katına varan değerler elde edildi. SIFCON'un basınç ve yarma dayanımları, SIFCON matrisininkilere kıyasla yaklaşık 2 kat arttı.

**EFFECTS OF CONTENT AND STRENGTH OF STEEL FIBERS ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF SIFCON**

## SUMMARY

Quasi-brittle materials such as concrete requires low relative fracture energy during the fracturing. To prevent the brittle failure and to attain a ductile behavior, short steel fibers are added into these materials. By the fact of this, within the past twenty years, new cement based materials with high tensile strength, high energy adsorption capacity and high compressive srength have been developed. In this research the mechanical behavior of SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) is investigated.

The enhanced performance of SIFCON deals with its improved capacity of absorbed fracture energy. Since this materials has excellent impact resistance properties, this can be employed for repairing of reinforced concrete bridges and also for constructing of stratejic structures.

The main objective of this work is to study the mechanical behavior of SIFCON with different amount of steel fibers and tensile strengths. Modulus of elasticity, splitting tensile strength, bending strength and fracture energy of these concretes are observed in this research. In this research, five different concrete mixtures with different steel fibers were produced. The volume fraction of each steel fibers was varied from % 0 to % 10 in steps of % 5. SIFCON is produced by using cement, silica fume, very fine sand, superplasticizers and steel fibers. The strength of steel fiber was also variable.

In all mixtures, the amount of binder and mixing water were the same. The silica fume used in the form of slurry was 20 % by weight of cement. Polycarboxylate ether based superplasticizer was used for all mixtures. In all mixtures the water-binder ratio was kept constant at 0,25.

For both the modulus of elasticity and the standard compressive tests, cylinders of 100 mm in diameter and 200 mm in height were prepared for all mixtures. Disc specimens were used for the splitting tensile tests. The beams prepared for the fracture energy tests were 280 mm in length and 70x70 mm in cross section. The effective cross-section at the mid-span was reduced to 35x70 mm. Thus, the net bending strength and the fracture energy were obtained using these specimens. It can be examined that both tensile strength and amount of steel fibers affect the postpeak response of the SIFCON. The increase in fracture energy and mechanical properties depends on the type and amouth of steel fibre used. The fracture energy of these materials are reached up to 2000 times of plain concretes. Compressive and splitting tensile strength of SIFCON increased

# 1. GİRİŞ

Geleneksel beton tipik olarak; çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çarpma dayanımı, deformasyon kapasitesi, kayma dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımı ve enerji yutma kapasitesi (tokluk) açısından düşük performans gösterir. Bu özeliklerin belirgin olarak gerektiği yerlerde, içerisine değişik malzemelerden üretilmiş ve teknik özelikleri yüksek olan liflerin katılması betonu güçlendirir [1].

SIFCON (Hamur Enjekte Edilmiş Lifli Beton) çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacmen yüksek oranlarda (%5–20) çelik tel ile takviye edilmiş mühendislik özellikleri yüksek, yeni çimento esaslı kompozitlerdendir. SIFCON'un yüksek dayanımlı betonlardan ayrılmasını sağlayan en önemli özellikleri kırılma sırasında sünek davranış göstermeleridir. Yüksek dayanımlı betonlarda en önemli sorun dayanım arttıkça malzeme gevrekliğinin de artmasıdır. Hamur enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON), gösterdiği düşük geçirimlilik, yüksek durabilite, dayanım ve süneklik özelikleri ile hacmen % 20'ye varan oranlarda çelik tel içeren yeni bir malzemedir. Çelik tel donatılı betonlarda çelik tel içeriğinin % 2- % 3 olduğu düşünülürse yaklaşık 10 kat fazla donatılan malzeme sünekliğinin mertebesi çok daha yüksek olmaktadır [2]. SIFCON uygulamada kullanılan üretim tekniğinin de verdiği avantajla yüksek oranlarda lif kullanılmasına izin vermektedir [3].

Shannag ve arkadaşları [4] tarafından yapılan bir çalışmada SIFCON içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığı ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı görülmüştür.

Yüksek performansa sahip SIFCON'un karışımında bulunan silis dumanı; hem taze hem de sertleşmiş halde beton özeliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmaktadır. İkincil bağlayıcı özeliği ve boşlukları doldurma etkisi ile sıkı

bir diziliş oluşmasına olanak sağlayarak; çimento hamuru ile agrega arasındaki bağı kuvvetlendirmektedir. Akışkanlaştırıcı katkısı ile de gerekli işlenebilme sağlanarak su miktarı da düşük mertebelere indirgenmektedir.

SIFCON, patlamaya ve yangına karşı korunması gereken sığınaklarda, patlayıcı malzemelerin saklanmasında, betonarme kirişler gibi bazı yapısal elemanların, köprülerin, yer betonlarının onarımlarında, prekast ürünlerde ve sıcaklığa dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir [5].

Bu çalışmanın amacı SIFCON'un mekanik özeliklerine lif miktarı ve dayanımının etkilerini incelemektir. Ayrıca aynı malzemeden üretilen lifsiz numunelerinde mekanik özeliklerini inceleyerek, lif etkisini araştırmaktır.

Bu amaç doğrultusunda biri çelik lif içermeyen olmak üzere beş ayrı grup beton üretildi. Çelik lif içeren betonlarda hacmen % 5 ve % 10 oranlarında Dramix ZP305 (normal ve yüksek mukavemetli olmak üzere iki çeşit) ve OL 6/16 kısa kesilmiş düz çelik teller kullanıldı. Uygun kür ortamında deney gününe kadar bekletilen numunelere silindir basınç, silindir yarma ve RILEM kırılma enerjisi deneyleri uygulandı. Deneyler sonucunda numunelerin eğilme, basınç ve çekme davranışları incelendi ; lif miktarı ve dayanımına bağlı olarak oluşan değişimler araştırıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda daha önce yapılan araştırmalara paralel olarak lif miktarının artmasının, kırılma enerjisini de artırdığı gözlemlendi.

# 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton, agrega, bağlayıcı faz ve boşluklardan oluşan heterojen bir malzemedir [2]. Yapıda kullanılan taze betondan beklenen nitelikler; işlenebilme, sıcaklığın denetimi, agreganın en büyük boyutunun yeterli işlenebilirlik için uygun olmasıdır.

Son yıllarda, beton teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi. Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/ $m^2$ olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir [6].

Fiziksel, mekanik ve ekonomik özellikler göz önüne alındığında kesin bir sınıflandırma yapmak güç olmakla beraber genel anlamda betonlar normal ve özel betonlar olmak üzere 2 ana başlık altında toplanabilir.

## 2.1. Normal Betonlar

Yapı mühendisliği uygulamalarında bina, yol, köprü, baraj, tünel ve prefabrik yapı elemanları gibi birçok alanda kullanılan normal betonlar yapının ekonomi boyutu göz önünde bulundurularak üretilirler. En önemli özellikleri ekonomik olması ve kolay ulaşılabilir olmasıdır.

20-50 MPa arasında basınç dayanımı değerlerine sahip normal betonlar, yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarla kıyaslandığında tek eksenli basınç ve çekme dayanımları yok sayılacak kadar düşüktür [7].

## 2.2. Özel Betonlar

Normal betonların kullanım amacına uygun olarak yoğunluk, düşük geçirimlilik, durabilite, süneklik gibi özelliklerinin geliştirilmesi ile oluşturulurlar. Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun arttırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Böylece durabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir [2].

### 2.2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Günümüz koşullarına göre belirlenen standartlarda 60-115 MPa arasında basınç dayanımına sahip betonlar yüksek dayanımlı beton sınıfına girerler. Normal betonlardan daha üstün iç yapı ve mekanik davranış özelliklerine sahip malzemelerdir.

Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar için, en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji daha düşük dayanımlı betonlarınkinden düşüktür [2].

Yüksek dayanımlı betonlar kabloları aderanslı ön gerilmeli profiller, açık deniz platformları, köprüler gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

### 2.2.2. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler

Yaklaşık 20 yıl önce, homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) ve büyük boşluklarından arındırılmış (MDF) çimento gibi yeni malzemeler geliştirildi. İlki (DSP) sıkıştırılmış taneli yapıya sahip matris içeren beton olup çimento, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve kalsine olmuş boksit veya granit gibi ultra sert agregalar kullanılarak üretilir. İkincisi (MDF) çimento ise 150 MPa'lık veya daha yüksek çekme dayanımına sahip alüminli çimentolarla üretilmiş olan bir polimer hamurudur [7]. Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin sünekliği düşük olduğundan, sünekliklerini arttırmak için çelik teller kullanılmaktadır. SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) gibi ürünler ise çelik tellerle kalıbın doldurulması ve bir akıcı harç bulamacının enjeksiyonu ile üretilirler. Reaktif pudra betonları Fransa'da yaklaşık yedi yıl önce geliştirildi. Bu ultra yüksek dayanımlı sünek betonların basınç dayanımları 200 MPa'dan 800 MPa'ya kadar değişmekte ve kırılma enerjileri 40000 J/ $m^2$ 'ye varmaktadır [2].

#### 2.2.2.1. Yoğunlaştırılmış Çimento ve Ultra İnce Tane Esaslı Malzemeler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka'daki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir.DSP bağlayıcılar çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında çimento ve silis dumanının topaklanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Bu DSP esaslı kompozitler Densit adı altında söz konusu firma tarafından uygulayıcılara sunulmaktadır. 16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa'dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa'ya kadar ulaşabilmektedir. DSP esaslı malzemeler ise çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan da gevrektir.

#### 2.2.2.2. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler (RPC)

Reaktif pudra betonları Fransa'da yaklaşık yedi yıl önce geliştirildi. Yapısındaki en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir.

RPC ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve aşırı derecede düşük geçirimliliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir. Bu malzemeler ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirildi. Reaktif Pudra Betonları küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/ $m^2$ ve birim ağırlıkları 2500-3000 kg/ $m^3$ aralığında değişen yeni kuşak betonları temsil etmektedir. Reaktif Pudra Betonunun iç yapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikro yapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığıyla güçlendirilmektedir.

Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas biçimde ayarlanması,
- Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- Betondaki su miktarının azaltılması,

- Yüksek inceliğe sahip silis dumanının puzolanik özeliklerinin yoğun biçimde kullanımı,
- Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
- Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcak koşullarında sertleştirme.

Reaktif pudra betonlarında kullanılan agregaların boyutları çimento tanelerinin boyutuna yakındır. Bu, hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. Bu betonlarda su/çimento oranı çok düşük olup 0.15 mertebesindedir. İşlenebilme fazla miktarda kullanılan bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için, hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunları mikserde karıştırma sırası önemlidir [2]. Tablo 2.1'de (NDB), (YDB) ve RPC'lerin dayanım değerleri karşılaştırılmaktadır.

**Tablo 2.1.:** Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton ve RPB'nun mekanik özeliklerinin karşılaştırılması [2].

| Mekanik Özelikler | NDB | YDB | RPB |
|---|---|---|---|
| Basınç Dayanımı (MPa) | 20-60 | 60-115 | 200-800 |
| Eğilme Dayanımı (MPa) | 4-8 | 6-10 | 50-140 |
| Kırılma Enerjisi (N/m) | 100-120 | 100-130 | 10000-40000 |
| Tepe noktasına karşı gelen şekil değiştirme ($10^{-6}$) | 1500-2000 | 2000-2500 | 5000-8000 |
| Elastisite Modülü (GPa) | 20-30 | 35-40 | 60-75 |

#### 2.2.2.3. Büyük Boşluklardan Arınmış Polimer Hamurlar (MDF)

MDF polimer hamurların üretiminde ana fikir çimento hamurunun yoğunluğunun dolayısıyla dayanımın arttırılmasıdır. MDF üretiminde kullanılan suda çözülebilen bir polimer olan hidroksipropilmetil selüloz veya hidrolize polivinilasetat, çimento hamuru süspansiyonu içerisinde dağılır ve buradaki çimento taneciklerinin hareketini kolaylaştırır [8]. MDF çimentolu malzemeler Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Polimer, çimento tanelerinin topaklanmasını önler, düşük su/katı oranındaki karışımın viskozitesi artar [2].

#### 2.2.2.4. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON)

SIFCON çelik lifler kullanılarak elde edilen, çimento esaslı kompozit bir malzemedir. SIFCON; çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacmen % 20'ye varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur. Çelik tel donatılı betonlarda çelik tel içeriğinin % 2-% 3 olduğu düşünülürse yaklaşık 10 kat fazla donatılan malzeme sünekliğinin mertebesi daha iyi anlaşılmaktadır [2].

Fritz tarafından kancalı uçlu çelik tel (çap=0.5 mm, uzunluk=30 mm) kullanılarak üretilen SIFCON üzerinde tek eksenli çekme altında elde edilen deney sonuçları Tablo 2.2.'de verilmektedir. Bu tablonun incelenmesinden görüldüğü üzere SIFCON'un kırılma enerjisi su/çimento oranına bağlı olarak değişmekte olup normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 1340 katına varan değerler elde edilebilmektedir.

**Tablo 2.2.:** Tek eksenli çekme halinde SIFCON üzerinde elde edilen değerler [2].

| Su/çim. Oranı w/c | Lif İçeriği [%] | Çekme Dayanımı [N/ $m^2$] | Ölçülen Sehim [mm] | Kırılma Enerjisi [J/ $m^2$] |
|---|---|---|---|---|
| 0,45 | 8,5 | 9,2 | 19,0 | 30500 |
| 0,35 | 8,5 | 12,5 | 14,1 | 57100 |
| 0,45 | 13,5 | 14,1 | 34,9 | 134100 |

SIFCON üretiminde kullanılan çelik teller; değişik uzunluklarda, çaplarda yada şekillerde olabilirler. Lif uzunluğu genellikle 30 mm ile 60 mm arasında değişirken lif narinlik oranıda 60 ile 100 arasında değişim göstermektedir. Çimento hamuru ve lifler arasındaki aderansa direk etki eden bu husus üretilecek numunenin içereceği maksimum lif miktarını da etkiler [5]. Lif hacim oranının % 9 ile % 11 arasında olması durumunda maksimum gerilme değerlerine ulaşılmakta ve malzeme maksimum performans göstermektedir [5].

Coimbatore Teknoloji Enstitüsü'nde üretilen SIFCON'un yapı mühendisliği alanında kullanılabilirliği araştırılmış ve sonuçlar Tablo 2.3.'te verilmiştir. Yapılan çalışmada hacimce % 8 lif içeren numunelerin ilk çatlak anındaki yük taşıma kapasitelerinin % 100, enerji yutma kapasitelerinin % 57 ve sünekliğin % 180 arttığını göstermektedir [9].

**Tablo 2.3.**: SIFCON numunesi bileşim değerleri.

| Karışım No. | Matris Bileşenleri | **Bağıl Ağırl** | Su/Bağlayıcı Oranı | Basınç Dayanımı (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1. | Tip 1 Çimento<br>Uçucu Kül<br>Su<br>Süperakışkanlaştırıcı | 1,00<br>0,20<br>0,36<br>0,03 | Su/Çimento+Uçucu Kül=0,30–0,40 | 56–120 |
| 2. | Tip 1 Çimento<br>Uçucu Kül<br>Silis Dumanı<br>Su<br>Süperakışkanlaştırıcı | 1,00<br>0,20<br>0,20<br>0,36<br>0,02 | Su/Çimento+Uçucu Kül+Silis | 56–100 |

Fritz, ürettiği SIFCON numunelerini; normal dayanımlı beton (NDB) ve çelik tel donatılı beton (ÇTDB) ile kıyaslamış ve Tablo 2.4.'deki değerlere ulaşmıştır [10].

**Tablo 2.4.:** Bazı tel donatılı betonların özellikleri [10].

| | Çelik tel içeriği,% | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü, GPa | Kırılma enerjisi, J/ $m^2$ | Karakteristik Boy, m | Kaynak |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NDB | - | 2–5 | 15–30 | 100–200 | 0,25–0,40 | Mishra (1995);Van Mier ve diğ. (1995) |
| ÇTDB | 1 | 4–5 | 32,5 | 5000 | 8 | Li (1998) |
| SIFCON | 4–20 | 6–32 | 30–70 | 20000–30000 | 2–17 | Naaman (1991) |

Tablo 2.4.'de de görüldüğü gibi % 1 oranında çelik telin betona eklenmesi kırılma enerjisini normal betonunkine (NDB) kıyasla yaklaşık 25–50 kat, karakteristik boyu ise 20–32 kat artırmaktadır. SIFCON'un kırılma enerjisinde normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 300 katına, karakteristik boyda ise yaklaşık 70 katına varan değerler elde edilebilmektedir. Ayrıca SIFCON'un çekme dayanımı da normal betonun çekme dayanımının yaklaşık 15 katına, ÇTDB'un çekme dayanımının yaklaşık 7 katına varmaktadır [10].

SIFCON üretim tekniği incelendiğinde diğer yüksek dayanımlı betonlardan farklılıklar gösterir. Lifler önceden kalıba dizildiğindiğinden hacmen % 20 lif oranlarına çıkabilmekte, ileri mühendislik özellikleri ile de önümüzdeki yılların gelişmeye açık ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Üretim tekniği genel olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

- Liflerin önceden hazırlanmış kalıplara yerleştirlmesi,
- Çimento ile silis dumanının karıştırılması,
- Elde edilen karışıma silis ununun ilave edilip, karıştırılması,
- Su ile akışkanlaştırıcının farklı bir kapta karıştırılması,
- Su ile akışkanlaştırıcı karışımının çimento, silis dumanı ve silis unu karışımına eklenerek karıştırılması,
- Gerçek birim ağırlık deneyinin yapılması,
- Betonun önceden lif yerleştirilmiş kalıplara alınması ve vibrasyonu.

SIFCON, patlamaya ve yangına karşı korunması gereken sığınaklarda, patlayıcı malzemelerin saklanmasında, öngerilmeli betonarme kirişler gibi bazı yapısal elemanların, köprülerin kaldırımların onarımlarında, prekast ürünlerde ve ısıya dayanıklılık gerektiren ürünlerde ve ısıya dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir [6].

### 2.3. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller

Çelik lifler, betona katılan liflerin en yaygın olanıdır. Ortaya çıkan üründe ÇLTB (çelik lif takviyeli beton) veya MLTB (metal lif takviyeli beton) diye adlandırılır. Yapıda takviye görevini üstlenen çelik lifler, aynı uzunluktaki cam ve polimer liflere göre daha kalın ve daha serttir. Dairesel kesitli çelik liflerin çapları 0.2

ile 1.00 mm arasında değişmektedir. Uzunlukları ise genelde 20 ile 60 mm arasında değişmektedir.

Metallerin en önemli özelliklerinden bir taneside plastik şekil değiştirme yetenekleridir. Bu sebeple çok basit şekillerden başlayarak çok karmaşık şekil ve formlarda üretim yapılabilmesine olanak sağlar [11]. Bazı önemli metalik liflerin özelikleri Tablo 2.5.'de verilmektedir.

**Tablo 2.5.:** Bazı Metalik Liflerin Tipik Özelikleri

| Metal | Özgül Ağırlık (gr/ $cm^3$) | Ergime Sıcaklığı | Elastisite Modülü (GPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| Al | 2,7 | 660 | 70 | 300 |
| Be | 1,8 | 1350 | 310 | 1100 |
| Cu | 8,9 | 1083 | 125 | 450 |
| Mo | 10,2 | 2625 | 330 | 2200 |
| W | 19,3 | 3410 | 350 | 2890 (<250 ∅ m)<br>3150 (<125 ∅ m)<br>3850 (<25 ∅ m) |
| 0,9 Karbon Çeliği (0,1 mm çapında) | 7,9 | 1300 | 210 | 4000 |

Beton numunelerde kullanılan çelik telleri sınıflandıran ve özelliklerini belirten Amerikan Standardı ASTM A 820-96'da [12] çelik lifler dört farklı sınıfta gruplandırılmıştır.

Bunlar;

- Tip 1:Soğuk Çekilmiş Lifler
- Tip 2:Plakadan Kesilmiş Çelik Lifler
- Tip 3:Eritilip Çekilmiş Lifler
- Tip 4:Diğer Lifler

Türk Standardı TS 10513/92 [18] ise çelik lifleri aşağıdaki gibi sınıflandırmaktadır:

- A:Düz, Pürüzsüz Yüzeyli Lifler
- B:Bütün Uzunluğunca Deforme Olmuş Lifler
- C:Sonu Kancalı Lifler

B sınıfı lifler,uzunluğu boyunca deforme olma şekline göre;

- Üzerinde Girintiler (Çentikler) Açılmış Lifler
- Uzunluğu Boyunca Dalgalı (Kıvrımlı) Lifler
- Ay Biçimi Dalgalı Lifler olmak üzere üçe ayrılır.

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

- İki Ucu Kıvrılmış Lifler
- Bir Ucu Kıvrılmış Lifler olmak üzere ikiye ayrılır.

TS 10513/92 bu sınıflandırmayı yaparken iki öemli parametreyi gözönünde bulundurmaktadır. Bunlar;

1. Liflerin çekme-kopma gerilmesi ortalaması en az 345 N/ $mm^2$ olmalıdır ve her bir lif için çekme-kopma gerilmesi 310 N/ $mm^2$ ‘den az olmamalıdır.
2. 15–17 °C’lik ortamda,3.18 mm’lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyinde teste tabi tutulan liflerin % 90’ının kırılmaksızın 90° eğilme yapabilmesi koşuludur [12].

Çelik liflerin sünek davranış göstermeleri özellikle yüksek dayanımlı betonların gevreklik sorununu çözmeleri açısından önemlidir.

## 2.4. Çelik Lif Takviyesinin SIFCON Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Yarı gevrek bir malzeme olan beton karmaşık boyut etkisi sergiler, hem yüksek dayanımlı hem de ultra yüksek dayanımlı yalın betonların kırılmaları sırasında yutulan enerji düşüktür [13]. Bu yüzden yüksek dayanım özelliği gösteren SIFCON'da meydana gelecek gevrek kırılmayı önlemek ve sünek davranış elde etmek için kısa kesilmiş çelik teller bu malzemelere eklenir. Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktadır [14]. Genel olarak SIFCON'un davranışını eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu belirlediğinden kullanılan çelik telin dayanımı, miktarı ve narinliği malzemenin özelliklerine etki eden en önemli unsurlardır.

Çelik tellerin SIFCON'da kullanılmasının başlıca beş yararı vardır. Bunlar;

- Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton,
- Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi,
- Etkin çatlak kontolü,
- Dayanıklılık,
- Donatı işçiliğinde belirgin azalma olarak sıralanabilir.

SIFCON içerisinde çelik teller yüzey ve kenarlarda dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında, hidratasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir [13].

Bayramov ve diğ. [2] tarafından İstatistiksel Tepki Yüzey Modellemesi kullanarak yapılan bir çalışmada çelik tellerin yüksek performanslı betonlar üzerindeki etkileri incelenmiş; çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılana kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.

Son yıllarda çekme dayanımı 200 MPa'ı aşan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilebilmektedir. Üretilen SIFCON numunelerinde de kullanılan bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir:

Üretilen betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma

yerine kopma oluşur. Böylece, SIFCON'da üretim tekniğinin de verdiği avantajlar kullanılarak yüksek dayanımlı ve yüksek oranda (% 10) lifler kullanılıp, tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilmiştir.

Lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı gibi değişkenlere birinci dereceden bağlıdır. Lif takviyesinin betonda sağladığı iyileşmeler Tablo 2.6.'da verilmektedir.

**Tablo 2.6.:** Lif takviyeli betonun bazı özelliklerinde matris malzemesine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [1].

| Betonun Özeliği | Artış (%) |
|---|---|
| Tokluk | 100–1200 |
| Darbe Dayanımı | 100–1200 |
| İlk Çatlak Dayanımı | 25–100 |
| Çekme Dayanımı | 25–150 |
| Basınç Dayanımı | 75–125 |
| Yorulma Dayanımı | 50–100 |
| Şekil Değiştirme Oranı | 50–300 |
| Eğilme Çekme Dayanımı | 25–200 |
| Kavitasyon-Erezyon Direnci | 200–300 |
| Elastisite Modülü | 75–125 |

Yapılan bir araştırma ışığında; çelik tel takviyesinin betonun mühendislik özelliklerinde kayıda değer iyileşmeler meydana getirdiği bilinmektedir. Tablo 2.7.'da çelik tel donatılı betonların normal betonlara kıyasla genel özelikleri verilmektedir.

**Tablo 2.7.:** Çelik tel donatılı betonların normal betonlara kıyasla genel özellikleri

| Özelik | Açıklama |
|---|---|
| Aşınma Direnci | Kısmi olarak darbe aşınmasının neden olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol eder. |
| Yorulma Direnci | Düşük tel içeriklerinde bile 1,25–2 kat iyileşme. |
| Donma-Çözünme Direnci | Donma-çözünme çevrimlerinin neden olduğu hasarın azaltabilir. Hava sürükleyici katkıların kullanılması önerilir. |
| Darbe Dayanımı | 2–20 kat iyileşme. |
| Kopma Modülü | 20–50 kg/ $m^3$ çelik tel içeriklerinde ilk çatlak yükünde küçük değişiklik. |
| Önleşmiş Rötre | Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde % 70'e varan azalma. |
| Kayma Dayanımı | Düşük tel içeriklerinde bile 1,25–2 kat artış. |
| Pullanma-Dökülme Direnci | Bütün matris içerisinde dağılan çelik takviyesi öncelikle bağlantı köşelerinin ve kenarlarının korunması. |
| Isı Şoku Direnci | Düşük çelik tel içeriklerin bile önemli ölçüde iyileşme. |
| Basınç Dayanımı | Küçük değişiklik. |
| Tokluk | Düşük tel içeriklerinde bile en belirgin iyileşme. |

### 2.4.1. Lif-Matris Aderansının Beton Özelliklerine Etkisi:

Lif-matris arasındaki aderans, malzemenin performansını etkileyen en önemli unsurdur. Kullanılan liflerin, özellikle betonda çatlama başladıktan sonra yükün tamamını karşılayabilmeleri için matris ile kuvvetli bir mekanik bağ oluşturabilmeleri gerekmektedir.

Lif-matris etkileşimi tanımlanırken, verilen özellikler gözönünde bulundurulur.

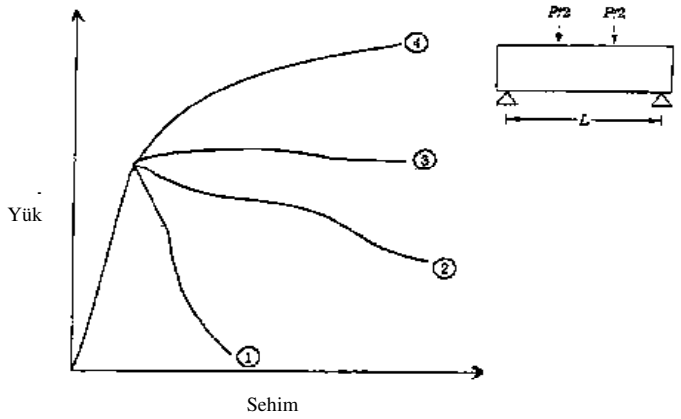
- Matrisin niteliği,
- Lif yüzeyinin özellikleri,
- Lif tipi: mineral, polimer, çelik, doğal yollarla oluşan lifler gibi,
- Lifin hacimsel yüzdesi,
- Yükleme hızı,
- Liflerin yönlenmesi,
- Matrisin durumu: çatlamış veya çatlamamış olması

Lif etkinliğini artıran en önemli özellik mekanik diş kuvveti olarak tanımlanabilir. Farklı geometrik yapılarından kaynaklanan özellikleri liflerin harç ile kuvvetli aderans yapabilmeleri amacıyla oluşturulur. Lifler bu özellikleri ile matrise kenetlenmiş birer mekanik diş gibi çalışırlar.

### 2.4.2. Lif Özelliklerinin Beton Özelliklerine Etkisi

Çimento matrisi ve lifler olmak üzere iki ana faz lif donatılı kompozitleri oluşturur. Lifler, ilerleme eğilimindeki çatlak ucunda köprü kurarak çatlağın büyümesini yavaşlatıp, malzemedeki yükün büyük bir kısmını alırlar. Matris çatladığı andan itibaren yük liflere transfer edileceğinden lif miktarı yeterli ise malzemenin taşıma kapasitesi artar, değilse yük taşıma kapasitesi azalır [5].

Şekil 2.1.'de farklı oranlarda yük içeren dört farklı kompozite ait yük-sehim eğrileri görülmektedir.




**Şekil 2.1.:** Farklı Oranlarda Lif İçeren Kompozitler için Tipik Yük-Sehim Eğrileri

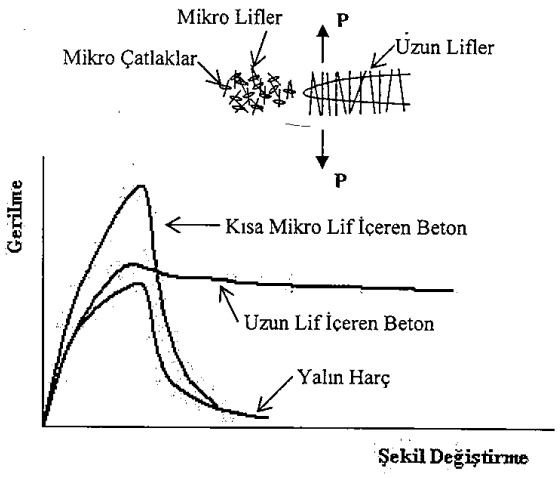
1 no'lu kompozit malzeme en az lif içeren kompozite aittir. 1. ve 2. nolu kompozit malzemelerde lifler tarafından taşınan yük, matrisin taşıdığı yük miktarından daha azdır. 3. ve 4. malzemelerde ise sırasıyla matrisin taşıdığı yüke eşit ve daha fazladır [5].

### 2.4.2.1. Lif Boyunun Etkisi:

Liflerin matristen sıyrılmasının engellenmesi ile oluşan yüksek performans aynı zamanda kullanılan lifin karakteristiklerine de bağlı olmaktadır. Bu özelliklerden bir taneside lif boyunun malzeme üzerindeki etkisidir.

Beton içerisinde kullanılan kısa lifler mikroçatlaklar arasında köprü görevi görürler. Uzun liflerle aynı hacimsel yüzdede kullanılsalar dahi birbirlerine daha sık aralıklarla konumlanacaklarından, çekme dayanımını daha çok artırırlar. Uzun lifler mikroçatlaklar bölgesinden uzakta iseler oluşan mikro çatlakları önleyemezler; bunun yanında mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşürse uzun lifler çalışmaya başlar. Mikro lifler; boyutları nedeniyle beton içerisinde daha sıkı bir dağılım gösterirler. Çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar ve elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro lifler ise elastisite modülünü, çekme ve eğilme

dayanımlarını artırırlar. Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler ve maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler. Şekil 2.2.'de farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi verilmektedir [15].




**Şekil 2.2.:** Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi [15].

Şekil 2.2.'de de görüldüğü biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır [2].

### 2.4.2.2. Lif Geometrisinin Etkisi:

Farklı uygulama alanları için aderans kuvvetini arttırmak amacı ile çeşitli geometrilerde lifler üretilmektedir. Bunlar kullanım amacına göre düz, dalgalı, pürüzlü, kanca uçlu, zigzaglı gibi çeşitli geometrilerde lifler günümüz uygulamalarında yer almaktadır.

Soroushian ve Bayasi [15] farklı şekil ve geometrilerdeki çelik liflerin performansını araştırdıkları çalışmada, % 2 oranında eklenen ve narinlik oranları 60 ve 75 civarında olan uçları çengelli liflerin düz ve zigzaglı liflerden daha yüksek kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı sağladıklarını görmüşlerdir.

### 2.4.2.3. Lif İçeriği, Lif Dağılımı ve Lif Narinlik Oranının Etkisi:

Lif narinlik oranı ve karışıma katılan lif miktarı betonun işlenebilirliğini dolayısıyla da mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı lifin karakteri hakkında yorum yapabilmek için gerekli en önemli parametredir. Çelik tel uzunluğunun çapa bölünmesiyle ( L/d ) bulunur.

Bayramov ve diğ. [2] tarafından İstatistiksel Tepki Yüzey Modellemesi kullanarak yapılan bir çalışmada geleneksel çelik tel donatılı betonların kırılma parametrelerine çelik telin narinliğinin( uzunluk/çap=L/d ) ve tel içeriğinin ( Vf ) aşağıda verilen sınırlardaki etkisi incelenmiştir.

$55 < L/d < 80$

$20 < V_f < 50$ kg/ $m^3$

Sonuç olarak çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılana kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır. Çelik tel narinliğinin ( L/d ) 80 ve tel içeriğinin ( $V_f$ ) 50 kg/ $m^3$ değerlerinde optimum (minimum gevrekliğin) çözümün elde edildiği görülmüştür [2].

Narinlik oranı ve lif içeriği üretilen betonun performansına etki eden önemli özelliklerdir. SIFCON'da bu etki diğer lifli betonlar kadar hissedilmez çünkü SIFCON sahip olduğu farklı üretim tekniği ile yüksek lif oranlarına çıkılabilmektedir. Betonun liflerin arasına girebilmesi ve homojen bir yapının oluşturulabilmesi için lif geometrisine göre yeterli vibrasyonun uygulanması SIFCON için en önemli unsurdur.

SIFCON'da iri agrega kullanılmamasına rağmen, yerleşim probleminden dolayı lif hacminin belirlenen bir optimum değeri aşmaması istenir. Matris içersinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olan topaklanmaların önüne geçmek amacı ile araştırılan bu optimum değerin, yapılan deneyler sonucunda liflerden elde edilen performansların kıyaslanması ile %9 ile %11 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

## 2.5. Silis Dumanının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halakadır. Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun arttırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Böylece durabilite iyileşir ve dayanım artar. Silis dumanı veya diğer bir deyişle mikrosilika, silis ve ferrosilis endüstrilerinin bir yan ürünüdür; 1950'lerden beri betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır [2].

Silis dumanı içeren betonlar üzerine ilk deneyler 1950'li yılların başlarında Norveç Teknoloji Enstitüsü'nde yapılmıştır. Bir ilk uygulama olarak, silis dumanının betonda kullanımı 1971'de yine Norveç'te gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, betonda silis dumanının pratik kullanımında ve araştırmalarda giderek artış görülmüştür. Silis dumanı içeren bir çimento hamurunda sıkı bir diziliş elde edilir. 1980'li yıllardan itibaren betonda süperakışkanlaştırıcıların ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlamıştır [13].

Son 15 yıl boyunca,yüksek dayanımlı beton üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar, şartnamelerin kapsamının genişlemesine ve basınç dayanım sınıfları C 100'ü aşan betonarme yapıların tasarımına neden olmuştur.

Silis dumanı (SD) içeren betonların özeliklerini gözönüne alarak SD'nı iki şekilde kullanılmaktadır:

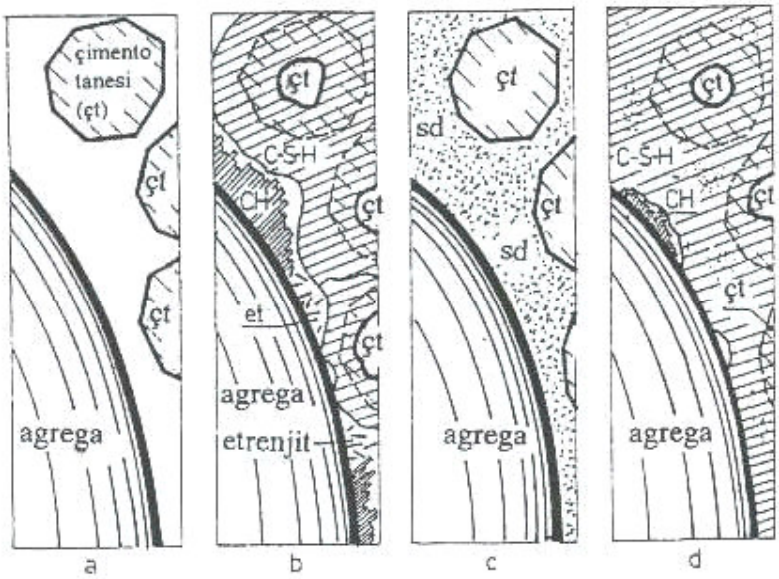
- Durabilitenin yükseltilmesi ve hidratasyon hızının azaltılması gibi nedenlerde çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak, çimento ile yer değiştiren bir malzeme olarak kullanılması,
- Hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özeliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır.

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi artırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı arttırır, sonuçta da betonun dayanımı ve durabilitesi artar [16]. Ancak, SD'nın betonda kullanılmasındaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür. Diğer

taraftan, bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performanslarında oluşan gelişme de göz önünde bulundurulmaktadır.

Yakın zamandaki gelişmelere dayanarak mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etki kadar önemli olduğu veya bazı araştırmacılara göre boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılabilir [2].

Şekil 2.3.'de silis dumanı içeren ve içermeyen betonlarda çimento hamuru-agrega arayüzeyinin şematik gösterimi verilmektedir.




**Şekil 2.3**. Silis Dumanı İçeren ve İçermeyen Betonların Arayüz Bölgesinin Şematik Gösterimi

a) Silis dumanı içermeyen taze beton, terleme ve etkili olmayan çimento taneleri (su ile dolu hacim),

b) $Ca(OH)_2$ nin agrega yüzeyinde çökelmesi, boşluklu geçiş bölgesi,

c) Silis dumanı ile boşlukları dolmuş taze beton,

d) Daha az boşluklu geçiş bölgesi [16].

### 2.5.1. Silis Dumanının Özellikleri

Literatürde mikro silis, ferrosilikon tozu ve amorf silisi olarakta isimlendirilen silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının

üretimleri sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek sıcaklıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur.

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren durumlarda kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak; erken dayanımı yüksek, yerinde dökülmüş, prefabrike yüksek dayanımlı beton elemanları, zararlı kimyasallara maruz betonları beton elemanların onarılması ve güçlendirilmesi ve çelik donatının korunması sayılabilir.

Silis dumanının rengi içerdiği karbon miktarına göre açık griden koyu griye değişen tonlardadır. Akışkanlaştırılmış, çimento ile harmanlanmış veya yoğunlaştırılmış olanları vardır. Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli ve küresel taneciklerden meydana gelir. Özgül yüzeyi, malzeme çok ince taneli ve hafif olduğundan taneler arasından geçen havanın geçiş hızını esas alan Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Bunun yerine çok ince taneli malzemelerde tercih edilen azot absorpsiyonu (BET) metodu tercih edilmektedir.

Özellikle zirkonyum endüstrisinden elde edildiğinde en iyi sonucu veren silis dumanının üretim aşamasında, büyük elektrik ocaklarında 2000 ºC' ye kadar ısıtılan kuvars ($SiO_2$), doğal silikon ve gaz halindeki silikon monoksite indirgenir. Daha sonra gaz halindeki silikon monoksit, hava ile temasta olan açık elektrik ocağında oksitlendirilerek tekrar $SO_2$ oluşturulur.

Karışım ısıtıldığında;

$SiO_2 + C \longrightarrow SiO + CO$

$SiO + 2C \longrightarrow SiC + CO$

$SiO_2 + 3C \longrightarrow SiC + 2CO$

$2SiO_2 + SiC \longrightarrow 3SiO + CO$

$3SiO_2 + 2SiC \longrightarrow Si + 4SiO + 2CO$

Fırın gazı soğutulduğunda;

$2SiO \longrightarrow SiO_2 + Si$

$3SiO + CO \longrightarrow SiO_2 + SiC$

$SiO + CO \longrightarrow SiO_2 + C$

Çimentodan yaklaşık olarak 100 kat daha ince olan silis dumanının ortalama tane boyutu 0.1µm civarındadır.

Silis dumanı kullanımının betona hem fiziksel hem de kimyasal açıdan önemli etkileri vardır.

### 2.5.2. Silis Dumanının Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Özellikle kimyasal etkilere ve donma-çözünme gibi tepkimelere yoğun olarak maruz kalan ve bu nedenle boşluksuz yapının tercih edildiği yüksek dayanımlı betonlarda, silis dumanının kullanılması ile oluşan yoğun yapı nedeni ile betonda segregasyon ihtimali de azalmaktadır. Silis dumanı içeriği betonda serbest su miktarını azalttığından çimento hamuru ve agrega arayüzeylerinde boşluksuz bir yapı meydana gelir dolayısıyla aderans ve dayanım artar. Bünyesinde yüksek oranda silis dumanı bulunduran betonlarda işlenebilme geleneksel betonlara göre zorlaşır; çünkü silis dumanının getirdiği kohezif yapı ve kullanılan düşük su/çimento oranı işlenebilmeyi olumsuz yönde etkiler. SIFCON üretiminde kullanılan Glenium 51 tipi süper akışkanlaştırıcı ile bu sorun giderilmiştir.

### 2.5.2. Silis Dumanının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

SIFCON'un içerdiği düşük su/çimento oranı dayanımını artırmaktadır. Beton üretiminde kullanılan suyun bir kısmı çimentonun hidratasyonunda işlev görürken, bir kısmı da hidratasyon tepkimelerine girmeden serbest su olarak kalır. Silis dumanının kullanılması, betondaki serbest su miktarını azaltarak çimento hamuru ara yüzeylerinde daha boşluksuz bir yapı oluşmasını sağlar. Bu sayede hidrate olmuş çimento tanelerinin, birbirleri ile ve agrega ile aderansı artarak dayanım artmaktadır. Silis dumanının bir diğer olumlu özelliği de puzolanik yani ikincil bağlayıcılık özelliğidir. Betonun mikroyapısı üzerinde olumlu etkiler oluşturan bu özellik malzemenin durabilite ve dayanıklılığını da pozitif yönde etkilemektedir.Mükemmel mühendislik özelliklerine sahip SIFCON; bu olumlu etkilerin yanında oluşan gevreklik sorununu yapısındaki yüksek lif oranı ile gidermektedir.

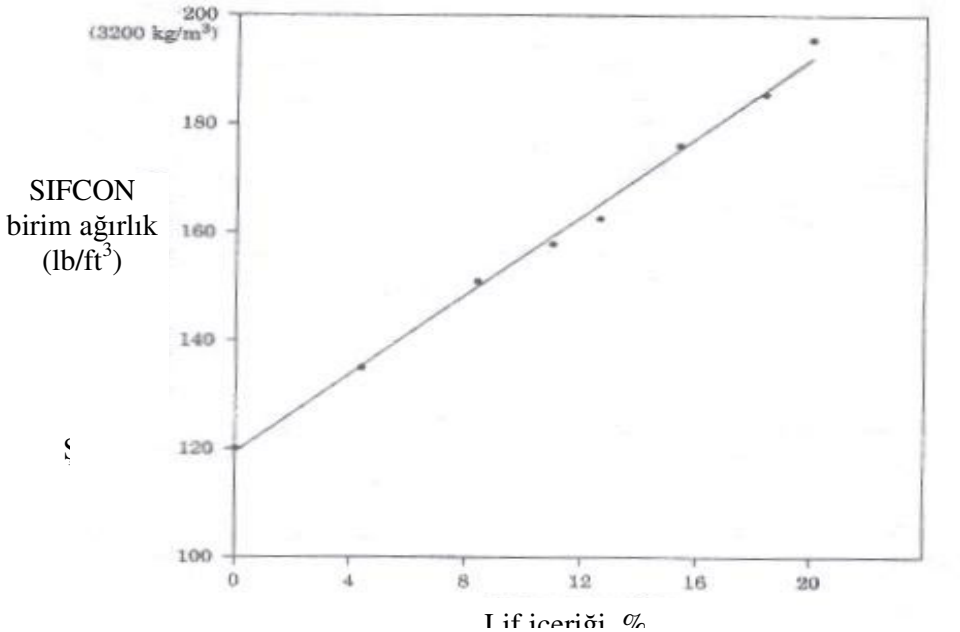
### 2.5.2. Silis Dumanının Betonun Dürabilitesine Etkileri

Kullanılan silis dumanı ile azaltılan malzeme içi boşluklar, betonun geçirimliliğini azaltmakta ve dürabilite üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır. Geçirimliliğin azalması ile betonda; zararlı kimyasalların malzeme içerisine difüzyonu önlenir. Hidratasyon sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan kalsiyumhidroksiti de bağlayan silis dumanı, zararlı kimyasalların ve dışarıdan gelmesi muhtemel suyun difüzyonunu engelleyerek dürabiliteyi olumlu yönde etkilemektedir. Bunun yanında beton içerisinde azaltılan su miktarı ile donma-çözünme, ıslanma-kurumaya karşıda dayanım artırılmaktadır. Beton içerisinde kullanılan silis dumanı alkali-agrega reaktivitesine karşı dayanımı artırmaktadır. Yapay puzolan olan silis dumanının ortamda bulunması halinde ise silis dumanının bu alkalileri hızla bağlamasından dolayı bu reaksiyon zorlaşmakta ve betonun zarar görmesi engellenmektedir.

# 3. SIFCON' UN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Günümüzde kullanılan lif donatılı betonlarda karıştırma ve yerleştirme tekniklerinin sınırlayıcı etkisinden dolayı lif hacminde maksimum %2 değerine ulaşılmıştır. Üretim tekniği ve bileşim özellikleri ile SIFCON hacimce %5 ile %20 arasında lif içermektedir [17]. Böylece çimento esaslı kompozit malzemelerde görülen gevreklik sorunu ortadan kalkmakta, yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi mükemmel mühendislik özelliklerine sahip yeni bir malzeme kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar lif hacim oranının %9 ile %11 arasında olması durumunda maksimum gerilme değerlerine ulaşıldığını göstermektedir [10].

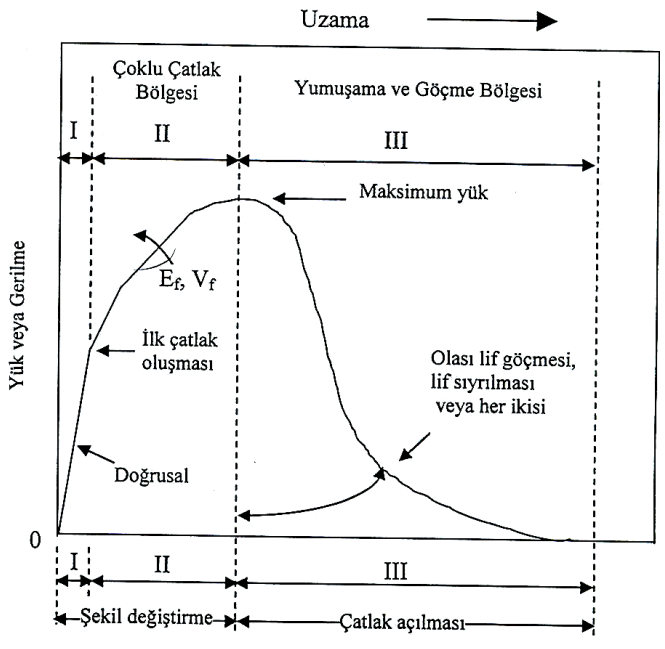
SIFCON, normal lif donatılı betonlara göre daha yüksek birim ağırlık değerlerine sahiptir. Yapısında bulunan 7.8 g/cm$^3$ birim ağırlığa sahip çelik liflerin hacimce yüksek değerlere ulaşması bu sonucu doğurmaktadır. Şekil 3.1.'de birim ağırlıktaki artışın lif içeriği ile değişimi görülmektedir.




**Şekil 3.1.** SIFCON'un Birim Ağırlığının Lif İçeriği ile Değişimi

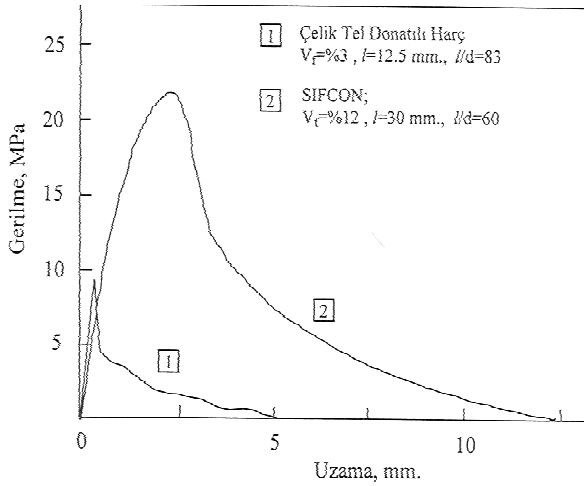
Çelik lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerde betonun kırılma mekaniği değişiktir. Bu kompozitlerde ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik liflere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Bunun sonucunda beton içerisindeki miktar ve geometrik özelliklerine bağlı olarak çelik lifler, bu gerilmelerin bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar. Yükler altında zorlanan matrisin, en zayıf olduğu noktada taşıma kapasitesinin aşılması ile çatlaklar oluşmaya başlar ve bu olayı takiben lif miktarı yeterli ise ve matris rijit, boşluksuz, yoğun bir yapıda ise bu lifler yükün tamamını alarak çatlakların önünde bir köprü vazifesi görürler. Liflerden elde edilen bu performans sonucunda, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanma imkanı oluşmaktadır.

Çelik tel içeriği SIFCON'un gerilme-şekil değiştirme veya yük-sehim davranışını etkileyen en önemli faktördür. SIFCON'un çekme altında tipik gerilme-uzama eğrisi Şekil 3.2.'de verilmektedir [14].




**Şekil 3.2.:** SIFCON' un çekme altında tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [14].

Şekil 3.3.'de de görüldüğü gibi SIFCON, çelik tel donatılı betonlarla karşılaştırıldığında üstün süneklik özelliği, eğilme dayanımı ve tokluğu ile mükemmel mühendislik özellikleri gösterir [17].




**Şekil 3.3.:** SIFCON ve çelik tel donatılı harcın gerilme-uzama eğrilerinin karşılaştırılması [11].

Çelik lif takviyesi betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Bu durum Tablo 3.1'de verilmektedir.

**Tablo 3.1.:** Matris malzemesi ve lif takviyeli betonun bazı özelliklerinin karşılaştırılması.

| Betonun Özelliği | Artış (%) |
|---|---|
| Tokluk | 100–1200 |
| Darbe Dayanımı | 100–1200 |
| İlk Çatlak Dayanımı | 25–100 |
| Çekme Dayanımı | 25–150 |
| Basınç Dayanımı | ±25 |
| Yorulma Dayanımı | 50–100 |
| Şekil Değiştirme Oranı | 50–300 |
| Eğilme Çekme Dayanımı | 25–200 |

### 3.1. Basınç Yüklemesi Altında Davranışı ve Dayanımı

SIFCON'un basınç yüklemesi altındaki davranışı lif hacmine, lif dağılımına, matris dayanımına, üretim tekniği ve lif geometrisine bağlı olarak farklılık gösterir. Basınç dayanımı betonun istenilen özellikleriyle paralellik gösterir. Yüksek basınç dayanımlı bir beton doludur, serttir, dış etkilere dayanır, su geçirmez.

SIFCON'un basınç dayanımında lif etkisi ve matris kompozisyonu önemli rol oynar. Çelik lif miktarının basınç dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı ve liflerle sağlanan dayanımın nadiren %25'i geçtiği söylenebilir.

Basınç yüklemesi altında davranış incelendiğinde lif hacmine göre, beton içerisinde lif yöneliminin daha etkili olduğu söylenebilir. Basınç yüklemesi altındaki silindir numunelerde çatlaklar çap boyunca genişlediği için, yükleme eksenine dik olarak yerleştirilen lifler basınç dayanımına pozitif etki eder. SIFCON'da liflerin kalıba yerleştirilmesi ve vibrasyon süreside önemlidir.

Matris kompozisyonunun yapısı, dayanım ve enerji yutma kapasitesine en azından iki yolla katkıda bulunur. Bunlardan ilki lif malzemesi ile oluşturduğu bağdır. Bu esnada üretimde SIFCON yapısında kullanılan silis dumanının liflerle daha iyi bir bağ oluşturup etkinliğini artırdığı söylenebilir. İkincisi ise matrisin gevrekliğidir ve SIFCON'un yapısında önemli rol oynar. Normal dayanımlı betonlar, SIFCON'a göre daha sünek davranış gösterirler. Silis dumanı veya uçucu kül eklenmesi de gevrekliği biraz artırır. Bu noktada SIFCON farklı üretim tekniği ve kompozisyonu ile yapısında bulundurduğu yüksek lif oranı sayesinde normal betonlara göre çok daha sünek, enerji kapasitesi yüksek bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır.

SIFCON'un basınç altındaki davranışı özetlenecek olursa; matris kompozisyonunun iyi olması yani matris dayanımının yüksek olmasının, dayanımı artırdığı, birim şekil değiştirme enerjisinin yüksek olduğu, kullanılan çelik liflerin basınç yükü altında betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini sadece çatlak sonrasında değil aynı zamanda tepe yükünden öncede artırdığı görülmektedir.

### 3.2. Çekme Yüklemesi Altında Davranışı ve Dayanımı

Betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemeti ile kıyaslandığında çok az olduğu için, yapılan hesaplarda betonun çekmeye çalışmadığı kabul edilir. Yapılan statik hesaplarda kesitin çekme gerilmesine maruz kaldığı bölgelere donatı takviyesi yapılarak, donatılar çekme gerilmesinin oluştuğu doğrultularda dizayn edilir. Amaç; çekme gerilmelerini donatıya taşıtmak hem de donatının şekil değiştirme kapasitesinden yararlanarak sünek davranışı ortaya çıkarmaktır. Aynı prensip SIFCON numuneleri içinde geçerli olmaktadır. Liflerin özelliklerinden maksimum seviyede yararlanabilmek için, liflerin matriste maksimum çekme gerilmelerinin oluştuğu yönde yerleştirilmeleri gerekmektedir. Diğer yüksek mukavemetli betonlara nazaran, farklı üretim tekniği sayesinde lifler kalıba istenilen doğrultuda yerleştirilebilmekte ve donatı gibi etkinlik kazanmaktadır. Lifler kuvvetin uygulandığı yöne paralel ise dayanım da artmaktadır.

SIFCON'un çekme dayanımı, matrisin çekme dayanımının yaklaşık iki katıdır. Çekme dayanımı incelendiğinde lif hacmi, lif tipi, lif geometrisi gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gereklidir. Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kısa kesilmiş lif takviyeli kompozitleri tek eksenli çekme gerilmesi altında 3 farklı lif tipi ve % 2 ile % 6 arasında değişen lif yüzdeleri için incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar yüksek lif yüzdesinin, çekme dayanımını artırdığı yönündedir.

Çekme dayanımını etkileyen bir diğer etken de silis dumanı ya da uçucu külün kullanılması ile liflerin matris ile oluşturduğu bağın kuvvetlenmesidir. Bunun sonucunda liflerin kopması liflerin sıyrılmasına göre daha fazla gerçekleşir ve daha yüksek yarmada çekme dayanımları elde edilir.

### 3.3. Eğilme Yüklemesi Altında Davranışı ve Dayanımı

SIFCON'un en belirgin özelliği eğilme altındaki davranışıdır. Yapı uygulama alanının tamamına yakınında eğilme yüküne maruz kalır. SIFCON'un üretim tekniği itibarıyla yapısında bulundurduğu yüksek lif oranı eğilme dayanımının bu denli

yüksek olmasının en belirgin sebebidir. Eğilme sertliğini etkileyen başlıca faktörler; lif geometrisi, lif tipi, lif miktarı, numunenin boyutu ve matrisin yapısıdır.

Normal betonlara kıyasla çok daha yüksek eğilme dayanımlarına sahip SIFCON'da sabit bir lif tipi için, eğilme dayanımı lif hacminin belirli bir limit değerine kadar lif miktarına paralel olarak artmaktadır. Lif miktarı söz konusu değerin üzerine çıktığında lif-matris etkileşimi azalacağından eğilme dayanımıda azalacaktır. Yapılan çalışmalar lif hacminin % 8 ile % 10 arasında tutulduğunda maksimum dayanım değerlerine ulaşıldığını göstermektedir.

SIFCON içerdiği yüksek lif oranı sayesinde diğer lif donatılı betonlara göre daha yüksek eğilme dayanımlarına ulaşır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi kısa bir aralıkta lineer elastik davranış gösterirken, tepe noktasında önemli şekil değiştirmeler oluşturarak bu değerlerde maksimum yüke çok yakın değerlerin taşınabildiğini göstermektedir.

SIFCON öngerilmeli kirişlerin sadece çekme bölgesine kısmi olarak lif ilavesi istenen performans artışlarının ekonomik bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Bu özelliği sayesinde büyük şekil değiştirmeye sahip veya yorulmaya maruz yapılarda da kullanılmaktadır.

### 3.4. Darbe Etkisinde Davranışı ve Dayanımı

Betonun ani olarak uygulanan bir kuvvete karşı gösterdiği direnç darbe dayanımı olarak tanımlanır. SIFCON gösterdiği üstün mühendislik özelliklerine paralel olarak yüksek darbe dayanımına sahiptir.

Naaman [17], yaptığı çalışmalarında SIFCON'da silis dumanı ve çelik lif etkisini beraber incelemişlerdir. Bu ikilinin darbe etkisi altında ve yorulma sırasında oluşan hasarları farklı şekillerde olsa da birbirlerini tamamlayıcı şekilde engellediklerini belirtmişlerdir.

# 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, yapılmış olan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmektedir.

## 4.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

### 4.1.1. Çimento:

Beton üretiminde kullanılan çimento PÇ 42,5 cinsi çimento kullanıldı. Fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmektedir.

**Tablo 4.1:** Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

**Fiziksel Özellikler :**

| | Çimento | Standard | Birim |
|---|---|---|---|
| Priz Başlangıcı | 178 | min. 60 | dakika |
| Priz Sonu | 233 | - | dakika |
| Özgül Ağırlık | 3.21 | - | g/cm*3* |
| Hacim Genleşmesi | 1 | maks. 10 | cm |
| Özgül Yüzey (Blaine) | 3290 | - | cm*2*/g |
| Litre Ağırlığı | 1010 | - | g/l |
| 2 Günlük Dayanım | 26 | min. 20 | N/mm*2* |
| 28 Günlük Dayanım | 57 | min./maks. 42.5/62.5 | N/mm*2* |

**Tablo 4.1**: Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

**Kimyasal Özellikler :**

| | Çimento | Standard | Birim |
|---|---|---|---|
| $SO_3$ | 2.4 | maks. 4 | % |
| MgO | 1.0 | - | % |
| Kızdırma Kaybı | 2.1 | maks. 5 | % |
| Çözünmeyen Kalıntı | 0.6 | maks. 5 | % |
| Cl- | 0.01> | maks. 0.1 | % |
| ToplamAlkali $Na_2O + 0.658\ K_2O$ | 0.50 | - | % |
| Serbest Kireç | 1.0 | - | % |

### 4.1.2. Silis Dumanı :

Silis dumanı olarak, Elkem firmasına ait Norveç'ten ithal edilen Elkem Microsilica Grade 940-U kullanıldı. Çok ince taneli ve gri-mavi renkli olup, azot adsorbsiyon metodu ile ölçülen özgül yüzeyi 22,13 m²/g'dir.

Üretim sırasında, çimento ve silis unu ile karıştırılarak, karışıma su ve akışkanlaştırıcıdan önce katıldı. Kullanılan silis dumanının, özgül ağırlığı 2,25 gr/cm³ olup kimyasal bileşimi Tablo 4.2'de verilmektedir.

**Tablo 4.2:** Kullanılan silis dumanının kimyasal bileşimi

**Kimyasal Özelikler :**

| | |
|---|---|
| $SiO_2$ | :%91,80 |
| $SO_3$ | :%0,36 |
| MgO | :%1,07 |
| CaO | :%0,50 |
| $Na_2O$ | :%0,49 |
| $K_2O$ | :%1,34 |
| $Al_2O_3$ | :%0,84 |
| $Fe_2O_3$ | :%2,06 |
| Cl | :%0,12 |

### 4.1.3. Silis Unu :

Üretimlerde kullanılan silis unu, cam üretiminde kullanılan öğütülmüş kuvars kumudur. Silis ununun özgül ağırlığı 2,62 gr/cm³olup, elek analizi sonuçları Tablo 4.3'de verilmektedir.

**Tablo 4.3:** Kullanılan silis ununun granülometrisi

**Silis Unu Granülometrisi :**

| Elek Göz Boyutu, (mm) | Elekten Geçen % |
|---|---|
| 0,25 | 96,7 |
| 0,5 | 99,8 |
| 1 | 99,92 |
| 2 | 100 |
| 4 | 100 |
| 8 | 100 |
| 16 | 100 |
| 31,5 | 100 |

### 4.1.4. Çelik Lif:

Üretimlerde; 3 çeşit çelik lif kullanılmıştır. Dramix ZP305 tipi çelik tellerin sonu kancalı, iki ucu kıvrılmış, birbirine suda eriyen tutkalla birleştirilmiş, soğuk çekilmiş tellerdir. Aynı karakteristiklere sahip iki tip lif çekme dayanımları açısından farklılık göstermektedir. Düz şekilli kısa kesilmiş OL 6/16 çelik lifleri ise üstü pirinç kaplı ve sarı renklidir. Çalışmada kullanılan liflerin özellikleri Tablo 4.5'da verilmektedir.

**Tablo 4.5:** OL 6/16, Dramix ZP305 normal ve yüksek muk. liflerin teknik özellikleri

| **Teknik Özellikler** | **OL 6/16** | **Dramix ZP305(N)** | **Dramix ZP305(Y)** |
|---|---|---|---|
| Boy (mm) | 6 | 30 | 30 |
| Çap (mm) | 0.16 | 0.55 | 0.55 |
| Narinlik (l/d) | 37.5 | 55 | 55 |
| Özgül Ağırlık (gr/cm³) | 7.17 | 7.85 | 7.85 |
| Çekme Dayanımı (N/mm²) | 2250 | min 1100 | min 2250 |

### 4.1.5. Hiperakışkanlaştırıcı:

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak yeni kuşak akışkanlaştırıcılardan olan Glenium 51 kullanıldı. Glenium 51'in çimento dağılımının etkinliğini büyük ölçüde artıran sterik bir etki mekanizmasına sahip olması naftalin ve melamin sülfonatlı süperakışkanlaştırıcılardan farklı kimyasal yapısından kaynaklanır.

Yapılan çalışmada su/çimento oranı (w/c=0.30) düşük olduğundan işlenebilirliği artırması için bütün beton karışımlarında çimento ağırlığının %2'si oranında G 51 hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanıldı.

Glenium 51 tipi hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri Tablo 4.6'de verilmektedir.

**Tablo 4.6:** Glenium 51 tipi hiperakışkanlaştırıcının özellikleri

| | |
|---|---|
| Form | Viskoz sıvı |
| Renk | Açık kahverengi |
| Özgül Ağırlık ( $g/cm^3$ ) | 1,07 |
| PH | 6,6 |
| Viskozite | 128 +/- 30 cps |

## 4.2. Beton Karışımları

Bu çalışmada üretilen betonların çimento dozajı 1050 kg/m³ de, su / çimento oranı 0,30'da, su / bağlayıcı oranı ise 0,28'de sabit tutuldu. Silis dumanı çimento ağırlığının % 20'si oranında kullanılırken, 4 tanesi lif içeren, bir tanesi de lifsiz olmak üzere 5 grup beton üretildi. Lif miktarı %5'i ve %10'u olan, normal ve yüksek mukavemetli lif içeren dört farklı grup beton üretildi. Üretilen bu betonlarda % 2.5 oranında performans artırıcı yüksek karbonlu üstü pirinç kaplı kısa çelik lifler kullanıldı. Her bir grup için bileşen miktarlarını değiştirmeden betona çelik lif ilavesi yapılarak, lif etkisi incelendi. Katkı miktarı bütün numunelerde aynı işlenebilmeyi ve homojenliği sağlamak için çimento ağırlığının % 2'si oranında sabit tutuldu.

### 4.3. Beton Üretiminde ve Üretim Sonrasında İzlenen Sıra

Çalışmada, üretim sırasında takip edilen sıra aşağıdaki gibidir.

- Liflerin önceden hazırlanmış kalıplara yerleştirilmesi,
- Çimento ile silis dumanının karıştırılması,
- Elde edilen karışıma silis ununun ilave edilip, karıştırılması,
- Su ile akışkanlaştırıcının farklı bir kapta karıştırılması,
- Su ile akışkanlaştırıcı karışımının çimento, silis dumanı ve silis unu karışımına eklenerek karıştırılması,
- Gerçek birim ağırlık deneyinin yapılması,
- Betonun önceden lif yerleştirilmiş kalıplara alınması ve vibrasyonu.

### 4.4. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada lifsiz, % 5 ve % 10 oranında çelik tel içeren toplam 5 farklı bileşimde betonlar oluşturuldu. Bütün lif içeren beton gruplarında % 2,5 oranında performans artırıcı yüksek karbonlu kısa çelik lif kullanıldı. Bu şekilde üretilen betonlara lifsiz beton için "SİFO" kodu verildi. Kullanılan lif çeşidine göre de normal mukavemetli çelik lif kullanılan betonlara "SİFN", yüksek mukavemetli çelik lif kullanılan betonlara "SİFY" kodu verildi. Bu kodları takip eden rakamlar ise çelik lif yüzdelerini ifade etmektedir.

Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri Tablo 4.7'de görülmektedir.

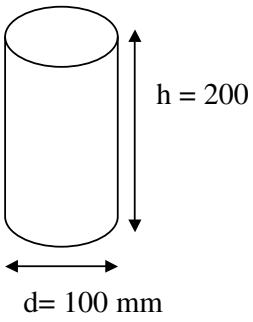
**Tablo 4.7:** Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri

| Numune Kodu | OL 6/16 | ZP 305 (N.Muk.) | ZP 305 (Y.Muk.) | Toplam Çelik Lif (%) |
|---|---|---|---|---|
| SİFO | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SİFN5 | 2,5 | 2,5 | 0 | 5 |
| SİFY5 | 2,5 | 0 | 2,5 | 5 |
| SİFN10 | 2,5 | 7,5 | 0 | 10 |
| SİFY10 | 2,5 | 0 | 7, | 10 |

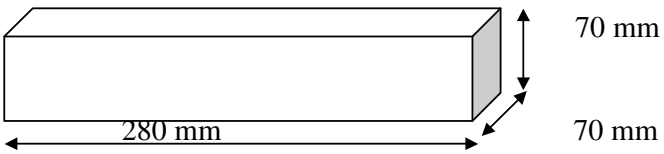
### 4.5. Numune Boyutları ve Şekilleri

Her bir beton karışımından; 6 adet disk, 6 adet silindir ve 6 adet kiriş olmak üzere toplam 18 numune üretildi.

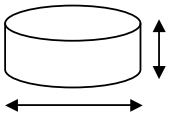
SİLİNDİR ( d = 100 mm, h = 200 mm )




KİRİŞ ( 70*70*280 mm )



DİSK (d = 150 mm, h = 60 mm)




### 4.6. Taze Beton Deneyleri

#### 4.6.1. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen betonlar kalıba yerleştirilmeden önce hacmi bilinen silindir biçiminde bir kaba taze beton gerçek birim ağırlıklarını bulmak için vibrasyon uygulayarak yerleştirildi. Beton bileşimleri ve taze beton özellikleri Tablo 4.8.'de verilmiştir.

Tablo 4.8: Beton bileşimleri ve taze beton özellikleri

| Özellikler/Kodlar | SİFO | SİFN5 | SİFY5 | SİFN10 | SİFY10 |
|---|---|---|---|---|---|
| Çimento, kg/m³ | 1155 | 1100 | 1100 | 1045 | 1045 |
| Su, kg/m³ | 347 | 330 | 330 | 314 | 314 |
| Çelik lif, kg/m³ | --- | 393 | 393 | 785 | 785 |
| Silis Dumanı, kg/m³ | 231 | 220 | 220 | 209 | 209 |
| Silis Unu, kg/m³ | 370 | 353 | 353 | 335 | 335 |
| Süperakışkanlaştırıcı katkı, kg/m³ | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| Su/Çimento | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Su/Bağlayıcı, kg/m³ | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Birim Ağırlık, kg/m³ | 2126 | 2417 | 2417 | 2708 | 2708 |
| Hava Boşluğu (%) | 2,4 | 2 | 2 | 0,8 | 0,8 |

### 4.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri

#### 4.7.1. Silindir Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyi için h=60 mm. yüksekliğinde, ∅ = 150 mm. çapında disk numuneler üretildi. Üretilen numunelere çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri hesaplandı. Bu kuvvetler kullanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla yarmada çekme dayanımları elde edildi.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL}$$

$\sigma$ = Yarma-Çekme dayanımı (MPa)

P; Yük (N)

D; Çap (mm)

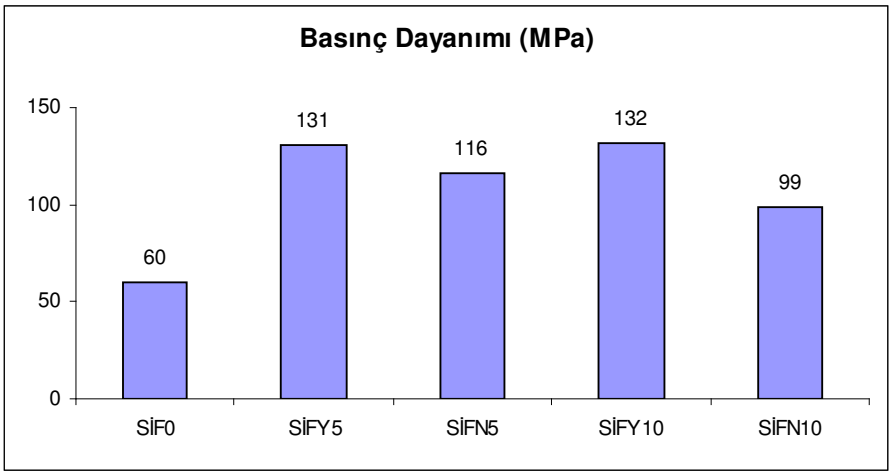
L;Yükseklik (mm)

Yarmada çekme deneylerinden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 4. 10'da verilmektedir.

#### 4.7.2. Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyleri d = 100 mm çapında ve h = 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde yapıldı. Her 12.5 KN'luk yüke karşı gelen düşey yerdeğiştirme değerleri okundu ve elde edilen grafiklerden elastisite modülleri hesaplandı. Ayrıca numunelerin kırılma yükleri kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplandı.

Elastisite modülü hesaplanırken gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, maksimum yükün % 5'i ile % 33'ü arasında kalan bölgedeki gerilme şekil değiştirme değerleri kullanıldı. Her bir grubun ortalaması alınarak; elde edilen ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 4.1'de verilmektedir.




**Şekil 4.1:** Her bir grubun ortalama basınç dayanımları

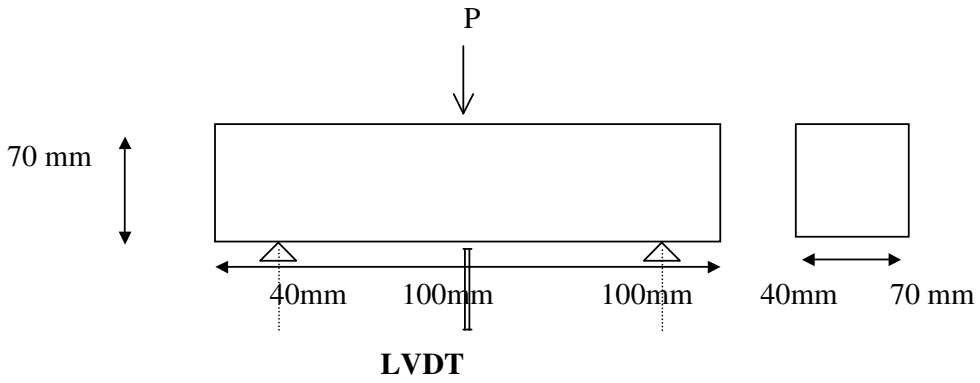
Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.9'da verilmektedir.

### 4.7.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyleri

Kırılma enerjisi deneyleri İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuarlarında INSTRON 5500R marka yer değiştirme kontrollü yükleme makinesi ile yapıldı. 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyine tabi tutulan numunelerin, eğilme dayanımları, kırılma enerjileri ve süneklikleri incelendi.

Üretim tarihinden itibaren 65–75 gün sonra deneye tabi tutulan numunelerin, deneyler sonucunda yük-sehim eğrileri elde edildi. Farklı tip ve miktardaki liflerin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinde meydana getirdiği etkiler saptandı.

Numunelerin orta noktasından tekil yük uygulanarak yapılan deneylerde, çentikli numunelerin etkin kesit alanı 35x70 mm olacak şekilde 70x70x280 mm boyutundaki prizma numunelerin orta noktasından 35 mm derinliğinde çentik açıldı. Şekil 4.2'de RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni verilmektedir.

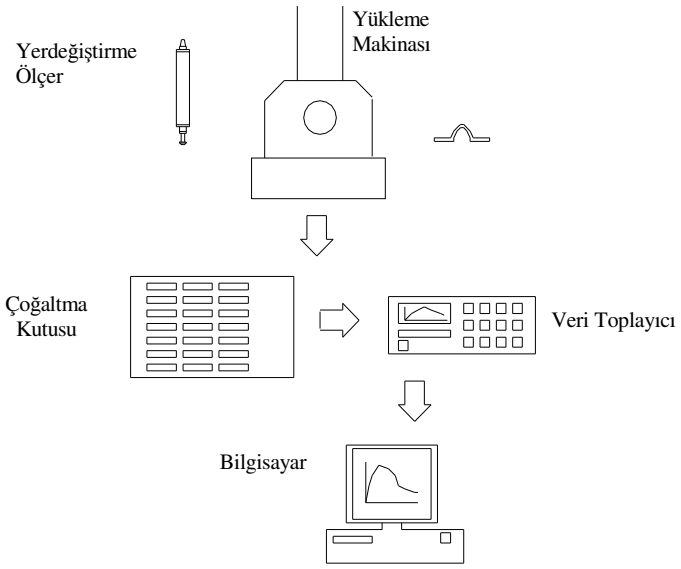



**Şekil 4.2:** RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

Deneye başlamadan önce numunenin yan yüzeyine sehim değerlerini ölçmek için 1 adet LVDT alıcı yerleştirildi.

Bu sayede uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen düşey deplasmanlar bilgisayara aktarıldı. Bu değerler kullanılarak yük-sehim grafikleri oluşturuldu.

Şekil 4.3.'te RILEM kırılma enerjisi deneyleri veri toplama sistemi gösterilmektedir.

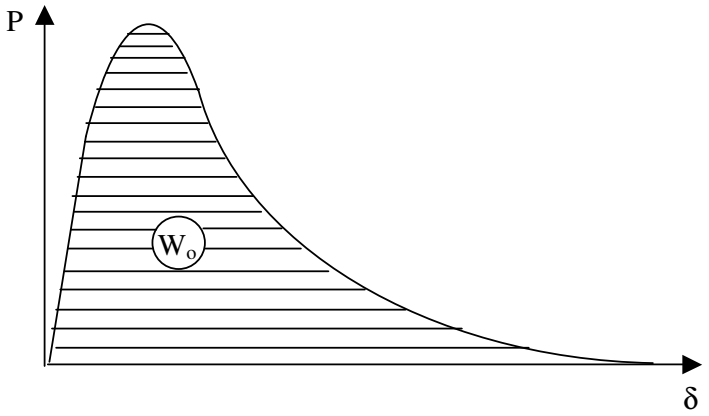



**Şekil 4.3:** RILEM kırılma enerjisi deneyleri veri toplama sistemi

#### 4.7.3.1. Rilem Kırılma Enerjisi Deneylerinden Kırılma Enerjisinin Hesaplanması

Elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılarak kırılma enerjileri hesaplandı. Eğri altında kalan alan kırılma süresince harcanan enerji ile orantılıdır. Sünek malzemeler yapıları gereği büyük sehim ve yavaş kırılma özelliği gösterirler. Geverek malzemelerde ise göçme anına kadar oluşan sehim küçüktür. Üretilen numunelerde iki çeşit metalik lif kullanıldığı için kırılma yavaş gerçekleşmiş ve yüksek sehim değerlerine ulaşılmıştır.

Şekil 4.5'de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.




**Şekil 4.5:** Örnek bir Yük-Sehim Eğrisi

$G_f = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig}$

$W_o$ = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn$^2$)

$\delta_o$ = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

$A_{lig}$ = Etkin kesit alanı (m$^2$)

#### 4.7.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki bağıntıyı kullanılarak hesaplandı.

$$\mathbf{F_{net} = (\ 3PL\ ) / [\ 2B\ (D\text{-}a_o)^2]}$$

$F_{net}$ = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D= Numune kesitinin yüksekliği (mm)

$a_o$= Çatlak Derinliği (mm) 'dir.

Oluşturulan her bir grup için hesaplanan net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi değerlerinin ortalaması Tablo 4.9'da verilmektedir.

### 4.7.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması

Üretilen numunelerin karakteristik boyları Hillerborg tarafından önerilen şekilde aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplandı.

$$l_{ch} = \frac{E.G_f}{f_t^{\,2}}$$

$l_{ch}$ : Karakteristik boy (mm)

E : Elastisite Modülü ($kN/mm^2$)

$G_f$ : Kırılma Enerjisi (N/m)

$f_t$ : Yarmada Çekme Dayanımı ($N/mm^2$)

Oluşturulan her bir grup için hesaplanan karakteristik boy değerlerinin ortalaması Tablo 4.10'da verilmektedir.

## 4.7. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Üretilen numunelere ait sertleşmiş beton özellikleri Tablo 4.9'da verilmektedir.

Tablo 4.9: Sertleşmiş beton özellikleri

| Numune Kodları | SİF0 | SİFY5 | SİFN5 | SİFY10 | SİFN10 |
|---|---|---|---|---|---|
| Basınç Dayanımı-$f_c$ (MPa) | 61,7 | 105 | 118,4 | 133,2 | 136,8 |
| Elastisite Modülü-E (GPa) | 31,7 | 34,7 | 35,6 | 34,9 | 30,6 |
| Yarmada Çekme Dayanımı-$f_t$ (MPa) | 7,4 | 13,1 | 12,9 | 16,2 | 14,8 |
| Net Eğilme Dayanımı-$f_{fnet}$ (MPa) | 2,6 | 16,4 | 18,3 | 47,4 | 29,5 |
| Kırılma Enerjisi-$G_F$ (N/m) | 15,5 | 8402 | 9757 | 30973 | 19248 |
| Karakteristik Boy-$l_{ch}$ (mm) | 9,1 | 1739 | 2061 | 4267 | 2675 |

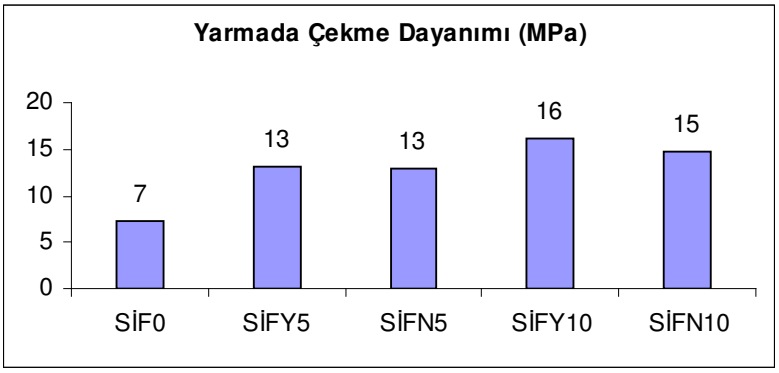
# 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

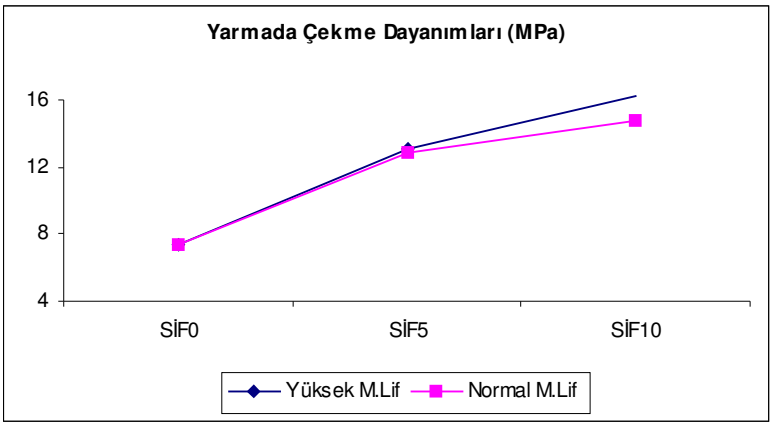
## 5.1. Silindir Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarma deneylerinden elde edilen yarma çekme dayanımları Tablo 4.10. 'da sertleşmiş beton özelikleri tablosunda verilmiştir. Şekil 5.1'de de görüldüğü gibi beton içerisindeki çelik lif miktarı arttıkça yarma çekme dayanımı da artmaktadır. Çelik lif içermeyen SİF0 numunesi ile diğer numuneler kıyaslandığında lif takviyeli betonların daha yüksek dayanımlara ulaştıkları görülmektedir.

Çelik tel içermeyen SİF0 numunesinde yarmada çekme dayanımı 7,4 MPa iken, % 5 çelik tel içeren SİFY5 numunesinde % 77 artış ile 13,1 MPa'a, SİFN5 numunesinde % 74 artış ile 12,9 MPa değerine ulaşmıştır. % 10 çelik tel içeren SİFY10 numunesinde % 119 ile maksimum artış elde edilmiş ve yarmada çekme dayanımında 16,2 MPa'a ulaşılmıştır. % 10 lif içeren SİFN10 numunesinde % 100 artış ile 14,8 MPa'a ulaşmıştır.

Çalışmada üretilen numuneler kıyaslandığında; %5 ve %10 çelik tel içeren grupların lif geometrilerinde ve narinlik oranlarında fark olmamaktadır. Bu da göstermektedir ki kullanılan lifin çekme dayanımı arttıkça üretilen numunelerin yarma çekme dayanımları artmaktadır. Ayrıca üretilen betonun yüksek mukavemetli oluşu lif-matris bağını kuvvetlendirmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen yarmada çekme dayanımları Şekil 5.1' de verilmektedir.





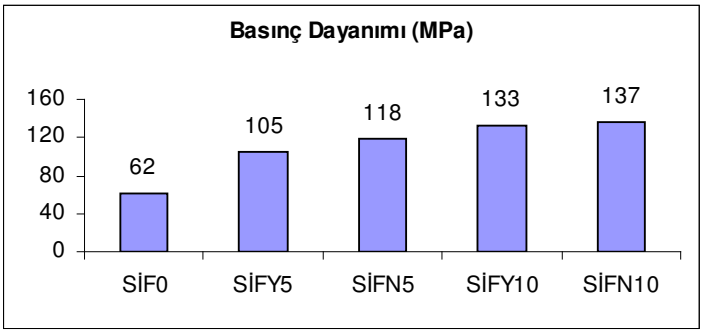

**Şekil 5.1.:** Yarmada Çekme Dayanımları

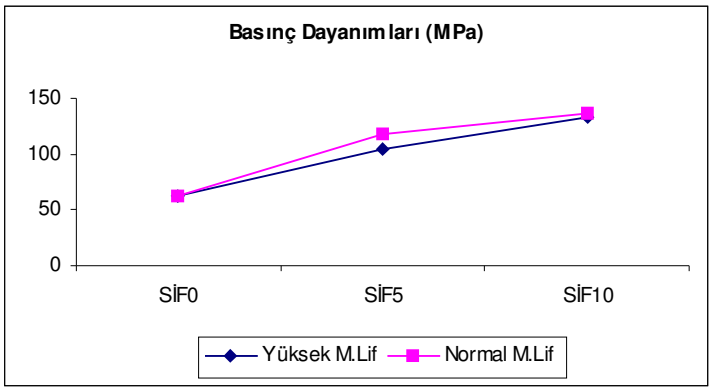
### 5.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.10. Sertleşmiş beton özellikleri tablosunda verilmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi aynı cins lif içeren betonun içinde; artan çelik lif miktarına paralel olarak silindir basınç dayanımlarının da arttığı görülmektedir. Bu sonuca göre çelik tel içeren betonlarda teller ağ oluşturarak çatlağın ilerlemesine engel olur ve basınç dayanımını artırırlar.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda çelik lif içermeyen SİF0 betonuna göre basınç dayanımındaki artış en fazla % 122 ile SİFN10 numunesinde gözlenmiştir.

Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 5.2' de verilmektedir.





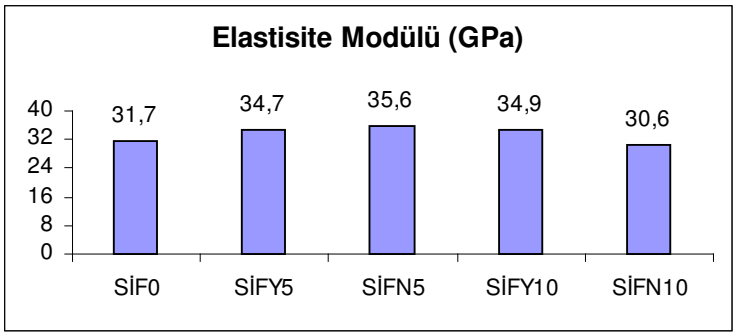

**Şekil 5.2:** Silindir Basınç Dayanımları

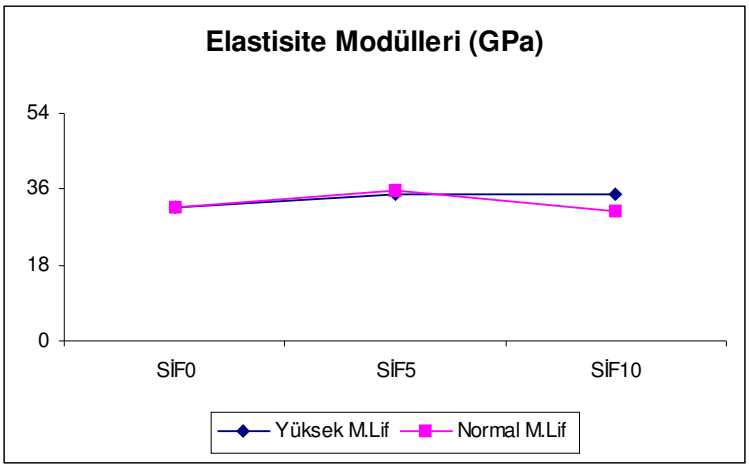
Bu değerlere göre lif içermeyen SİF0 betonunun basınç dayanımı 61,7 MPa iken, yüksek mukavemetli % 5 çelik lif içeren SİFY5 betonunun basınç dayanımı % 70,1 artışla 105 MPa değerine ulaşmış yine normal mukavemetli % 5 çelik lif içeren SIFN5 betonunda da % 92 artışla 119 MPa değerine ulaşmıştır. % 10 çelik lif içeren SİFY10 betonunda % 116 artışla 133 MPa değerine, SİFN10 betonunda ise % 122 artışla 137 MPa'a ulaşmıştır.

Numunelerde kullanılan çelik tellerin çekme dayanımlarına göre bakıldığında; normal mukavemetli çelik tellerin kullanıldığı numunelerin daha yüksek basınç dayanımlarına sahip oldukları görülmektedir.

### 5.1. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Çelik lif içermeyen SİF0 numunesinde elastisite modülü 31,7 GPa iken en yüksek olarakta SİFN5 numunesinde % 12 artış oranı ile 35,6 GPa değerine ulaşmıştır. SİFY5 numunesinde % 10 artış göstermiş ve 34,7 GPa'a ulaşmıştır. SİFY10 numunesinde % 10 artış ve 34,9 GPa değerine ve son olarakta SİFN10 numunesinde % 4 azalma ile 30,6 GPa değerine ulaşmıştır. Şekil 5.3' de elde edilen elastisite modülü değerleri verilmektedir.



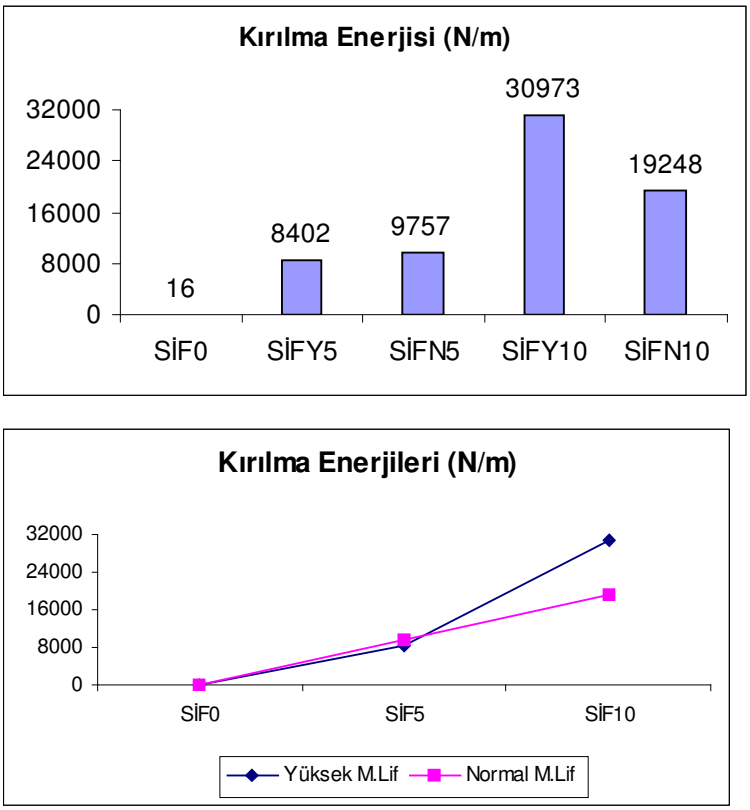



**Şekil 5.3.:** Elastisite Modülleri

### 5.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

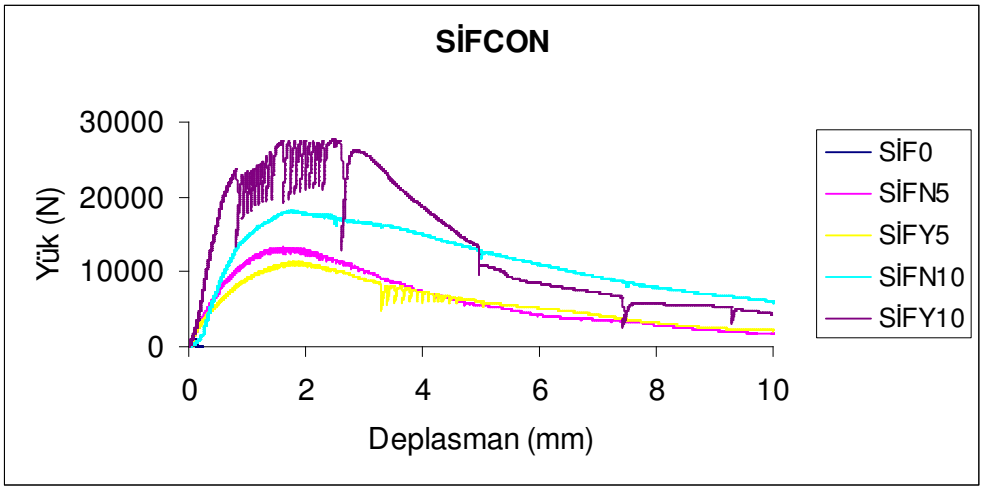
RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde çelik tel içeren numunelerin, çelik tel içermeyen numunelere göre çok daha yüksek eğilme dayanımı ve şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğu görüldü. Yüksek mukavemetli lifler söz konusu iken düşük mukavemetli liflere göre daha yüksek performans elde edilmiştir. Betona çelik tel ilavesi ile betonun dayanımı artmakta, lif ile aderansı da daha yüksek olduğundan çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşmekte ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma ayrılması oluşmaktadır. Böylece yüksek dayanımlı kompozitlerdeki gibi gevreklik sorunu ortadan kalkmaktadır.

Çelik tel içermeyen SIF0 numunesinin kırılma enerjisi 15,5 N/m. iken % 5 normal mukavemetli lif içeren SIFN5 numunesinde bu değer 630 katına çıkarak 9757 N/m. değerine ulaşmıştır. % 5 yüksek mukavemetli lif içeren SIFY5 numunesinde ise 542 katına çıkarak 8402 N/m.ye ulaşmıştır. % 10 normal mukavemetli lif içeren SIFN10 numunesinde 1242 katına çıkarak 19248 N/m. ye ulaşmıştır. En yüksek artış ise %10 yüksek mukavemetli lif içeren SIFY10 numunesinde ulaşılarak kırılma enerjisi 2000 katına çıkarak 30973 N/m. olmaktadır. Şekil 5.4' te eğilme deneyinden elde edilen kırılma enerjileri görülmektedir.




**Şekil 5.4.:** Numunelerin kırılma enerjileri

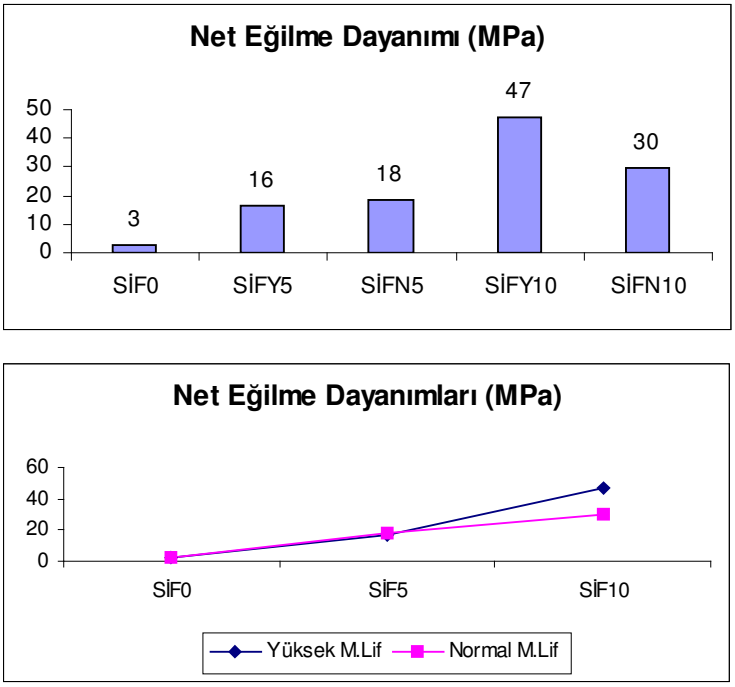
Her bir karışımın 6 numunesinden ortalamaya en yakın olana ait yük-sehim eğrisi Şekil 5.5'te verilmektedir.




**Şekil 5.5.:** Her bir grubun ortalaması alınarak oluşturulmuş yük-sehim eğrileri

Lif katılması ile normal betonun eğilme direnci arttırılır. Liflerle daha iyi bağ yapan betonlarda eğilme dayanımındaki artış, yarmada çekme dayanımından daha fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar.

Çelik lif içermeyen SIF0 numunesinde eğilme dayanımı 2,6 MPa iken, % 5 normal mukavemetli lif içeren SIFN5 numunesinde 7 katına ulaşarak 18,3 MPa'a, % 5 yüksek mukavemetli lif içeren SIFY5 numunesinde 6 katına ulaşarak 16,4 MPa'a,% 10 normal mukavemetli lif içeren SIFN10 numunesinde 11 katına ulaşarak 29,5 MPa'a, % 10 yüksek mukavemetli lif içeren SIFY10 numunesinde 18 katına ulaşarak 47,4 MPa'a ulaşmıştır. Şekil 5.6.'da net eğilme dayanımlarının ortalama değerleri görülmektedir.

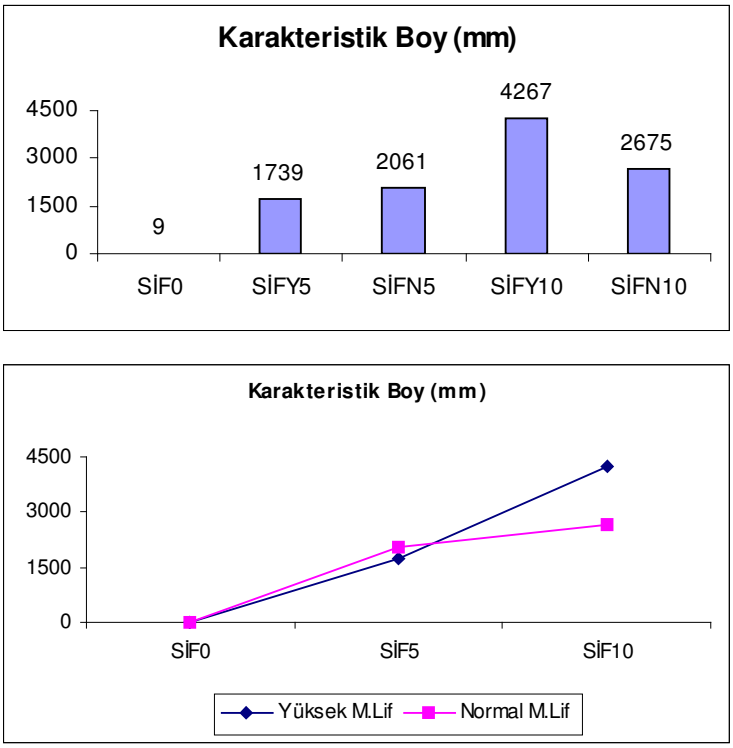



**Şekil 5.6.:** Her bir grubun ortalaması alınarak oluşturulmuş net eğilme dayanımları

### 5.4. Hesaplanan Karakteristik Boyların Değerlendirilmesi

Betonda $l_{ch}$ (karakteristik boy) azaldıkça malzemenin daha gevrek bir davranış sergilediği bilinmektedir. Çelik lif içermeyen SIF0 numunesinde 9,1 mm iken % 5 normal mukavemetli çelik lif içeren SIFN5 numunesinde 226 kat artarak 2061 mm, % 5 yüksek mukavemetli çelik lif içeren SIFY5 numunesinde 191 kat artarak 1739 mm. , % 10 normal mukavemetli lif içeren SIFN10 numunesinde 297 kat artarak 2675 mm. , %10 yüksek mukavemetli çelik lif içeren SIFY10

numunesinde ise 469 kat artarak 4267 mm. ye çıkmıştır. Şekil 5.7' de numunelerin karakteristik boyları verilmektedir.




**Şekil 5.7.:** Numunelerin karakteristik boyları

# 6. GENEL SONUÇLAR

- Hacimce % 5 ve % 10 oranında çelik lif içeren SIFCON numunelerinin kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı başta olmak üzere basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında çelik lif içermeyen numunelere göre artışlar sağlanmıştır. Bu artışlar karışımda kullanılan çelik lif tiplerine ve yüzdelerine göre değişik oranlarda olmuştur.
- Silindir basınç dayanımlarında çelik lif içermeyen betona göre % 70–122 oranında artış, elastisite modüllerinde % 4 azalma ile % 12,3 artış arasında değişim, yarmada çekme dayanımlarında % 74–119, kırılma enerjilerinde % 54109- 199726, net eğilme dayanımlarında % 533–1730 ve karakteristik boylarda da % 19013–46785 arasında artışlar elde edilmiştir.
- Çelik lif kullanılması malzemenin kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellemektedir. Çelik tel içermeyen numuneler çok gevrek bir şekilde kırılırken, çelik tel içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmaktadır. Bu durum gevrek davranışı da önlemekte ve ani göçme ihtimalini çok azaltmaktadır. Hacimce % 5 çelik lif içeren numuneler kıyaslandığında; lifin çekme dayanımının kırılma enerjisine belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Hacimce % 10 çelik lif içeren numunelerde bu fark çok belirgin olarak görülmektedir. Malzeme içerisindeki çelik tel oranı arttıkça kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı artmaktadır. Ulaşılan en yüksek kırılma değeri kıyaslandığında normal betonun yaklaşık 2000 katına varan değerlere ulaşmıştır.
- SIFCON'un yarma-çekme dayanımı da artan çelik lif miktarı ile birlikte artmaktadır. Çelik lifin dayanımının artması; malzemenin çekme dayanımını hacimce düşük lif içeren numunelerde belirgin bir şekilde etkilememekte, hacimce yüksek lif içeren numunelerde lifin çekme dayanımına olarak paralel

bir miktar artırmaktadır. Bu sonuçlar SIFCON içindeki çelik tel donatının malzemenin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir.

- En yüksek çekme dayanımları ve kırılma enerjileri; hacimce % 10 yüksek mukavemetli çelik lif içeren numunelerde görülmüştür.

# KAYNAKLAR


[1] **DSİ,** Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Kasım 1994, Ankara.

[2] **Taşdemir, M.A. ,Bayramov, F. ,** 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı.

[3] **Arslan, A. ,** 1999. Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri,Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sempozyum Bildirileri.

[4] **Shannag, M. J., Barakat, S. Ve Jaber, F.** , 2001. Structural Repair of Shear-Deficient Reinforced Concrete Beams Using SIFCON, Magazine of Concrete Research, 53,6, 391-403.

[5] **Balaguru, P. N. , Shah, S. P. ,** 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York.

[6] **Balaguru, P. N. , Shah, S. P. ,** 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill Inc., pp. 413-449.

[7] **Özyurt, N. ,** 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[8] **Regourd, M.M.,** 1991. Microstructure of High Performance Concrete, High Performance Concrete From Material to Structure,E&FN SPON,London,pp. 3-14.

[9] **Kaushik, S. K. ,** 1999. High Performance Cement Composites, http://www.geocities.com/asiaconstruct/tech22.htm

[10] **Naaman, A. E. ,** 1985. High Strength Fiber Reinforced Cement Composites, Proceedings of Symposium on Potential of Very High Strength Cement-Based Materials, pp. 217-229, Materials Research Society; Ed. By J. F. Young.

[11] **Chawla, K.K.,** 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Press, United Kingdom.

[12] **ASTM A 820,** 1996. Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete,The American Society for Testing and Materials, USA.

[13] **Taşdemir, M.A. ,Kocatürk, N. A. , Yerlikaya, M. ,** 2004. Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler.

[14] **Köksal, F.,** 2004. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[15] **Bayramov, F. , İlki, A. , Taşdemir, C., Taşdemir, M. A. , Yerlikaya, M. ,** 2004. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 2 , İstanbul ,Turkey , April 4-7, 73-82.

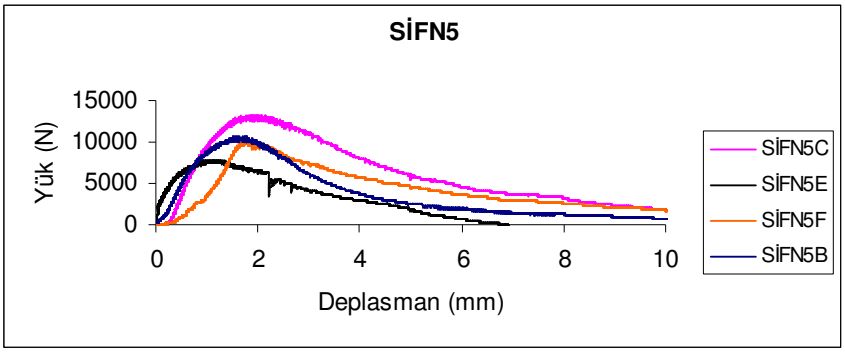
[16] **Taşdemir, C. ,** 1994. Agrega Çimento Hamuru Arayüzeyi Mikro Yapısının Yüksek Mukavemetli Betonların Kırılma Parametrelerine Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[17] **Naaman, A. E. ,** 1991. Proceedings of the International Workshop, SIFCON: Tailored Properties for Structural Performance. Edited by H. W. Reinhart and A.E. Naaman. RILEM. Published by E & FN Spon, London.

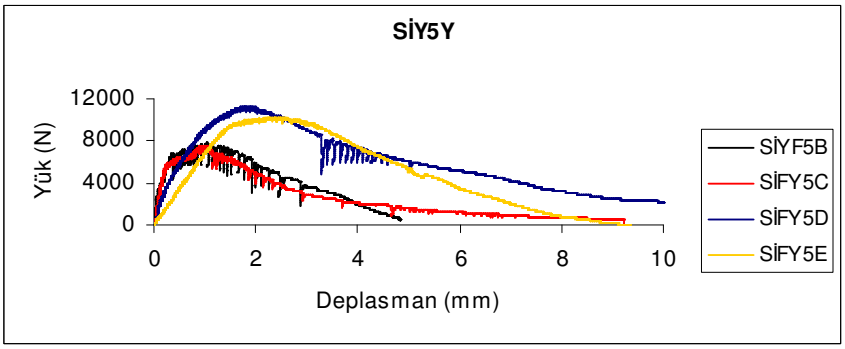
[18] **TS 10513,** 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

**EKLER**

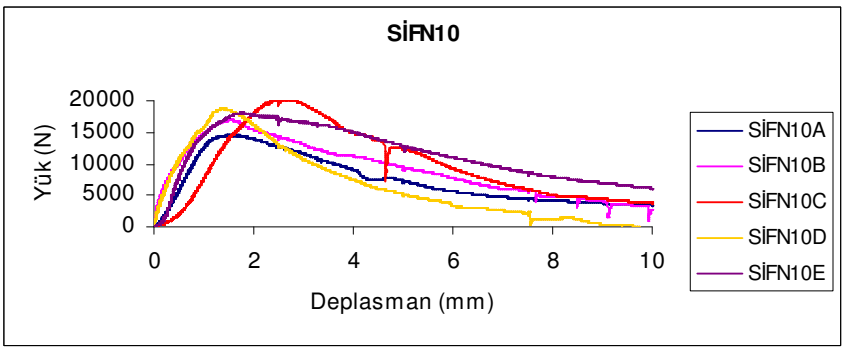
**EK A:** 3 Noktalı Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Yük-Sehim Grafikleri



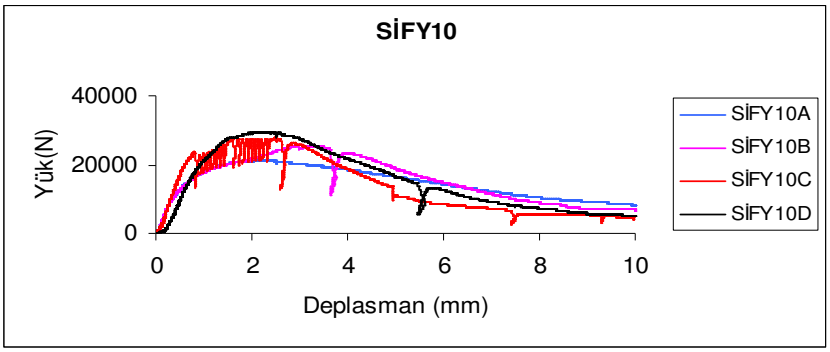

**Şekil A.1:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %5 normal mukavemetli lif oranına sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri



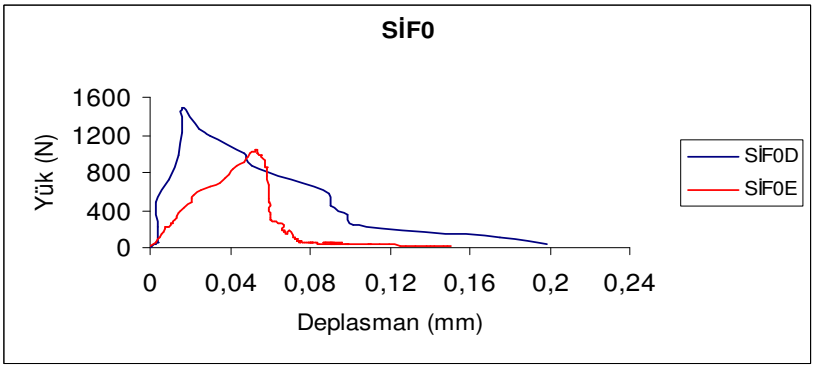

**Şekil A.2:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %5 yüksek mukavemetli lif oranına sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri



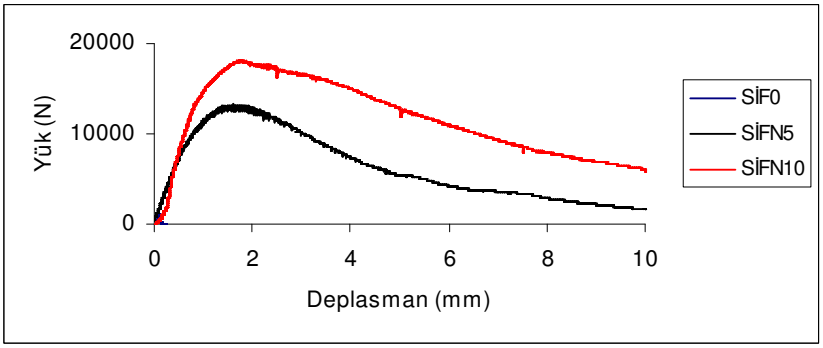

**Şekil A.3:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %10 normal mukavemetli lif oranına sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri



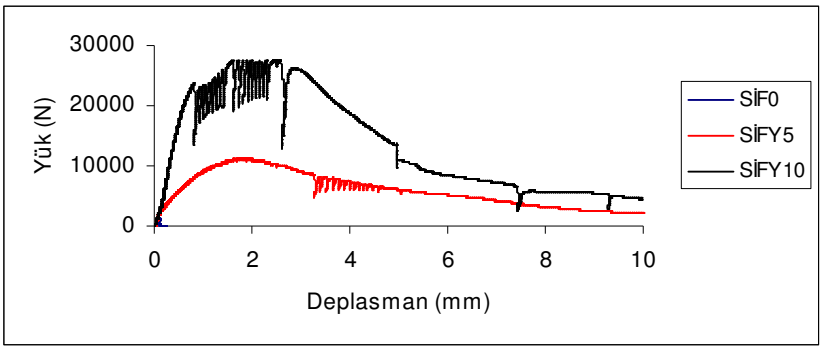

**Şekil A.4:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %10 yüksek mukavemetli lif oranına sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri



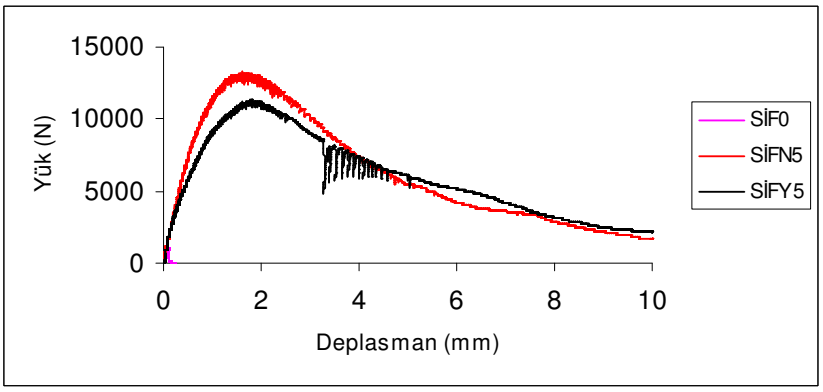

**Şekil A.5:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen lifsiz numunelere ait yük-sehim grafikleri



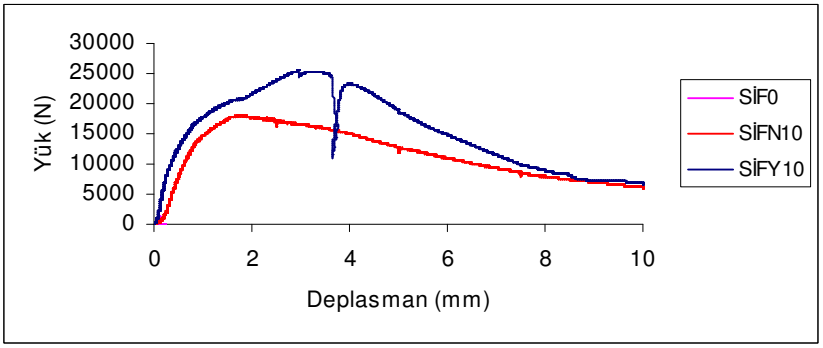

**Şekil A.6:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen normal mukavemetli lif içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri



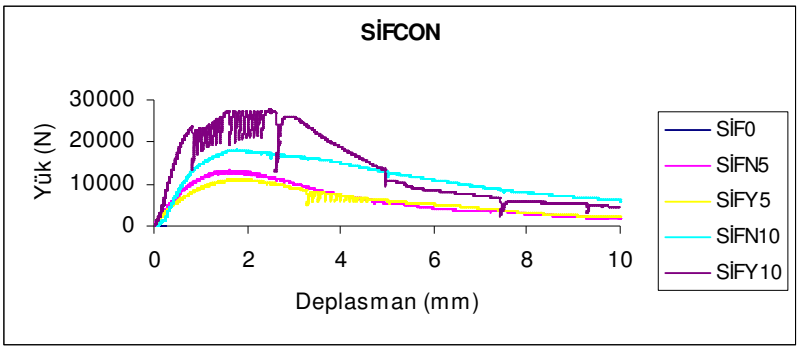

**Şekil A.7:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen yüksek mukavemetli lif içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri




**Şekil A.8:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen aynı lif hacmi, farklı lif cinsine sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri




**Şekil A.9:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen aynı lif hacmi, farklı lif cinsine sahip numunelere ait yük-sehim grafikleri




**Şekil A.10:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen tüm numune gruplarının ortalamaları alınarak oluşturulmuş yük-sehim grafikleri

**EK B:** Kırılma Enerjileri

**Tablo B 1:** Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjileri

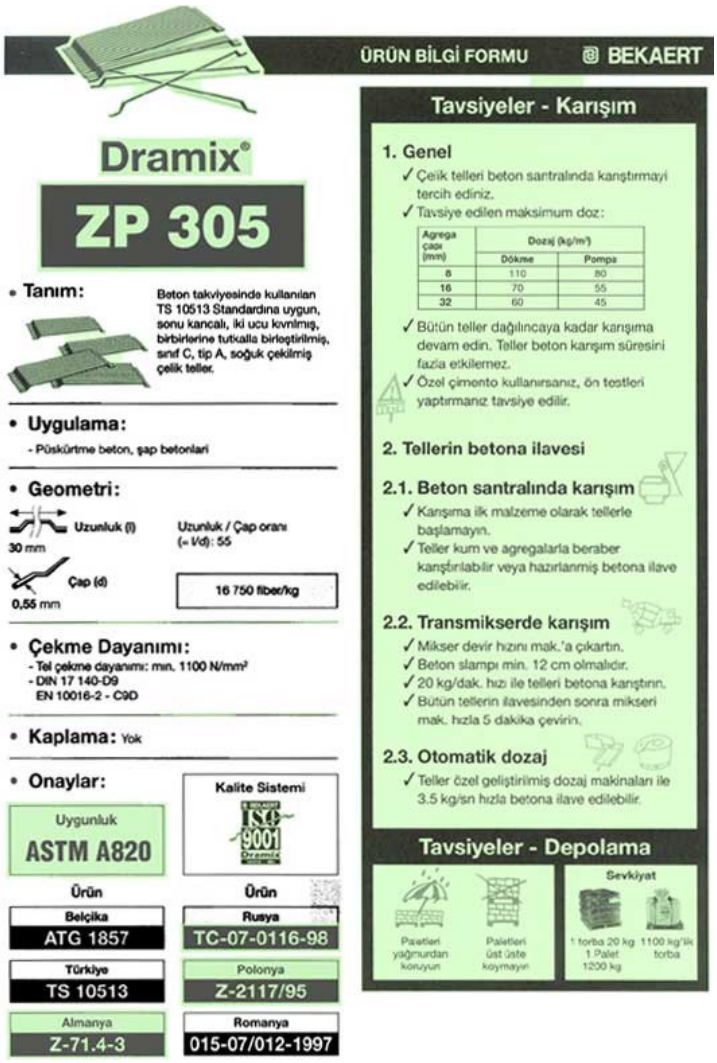
| Numune Kodu | Kırılma Enerjileri (Nm) | Ortalama |
|---|---|---|
| SIF0A | 15 | 16 |
| SIF0C | 17 | |
| SIF0D | 21 | |
| SIF0E | 8,2 | |
| SIFN5B | 11623 | 9757 |
| SIFN5C | 13709 | |
| SIFN5D | 8308 | |
| SIFN5E | 5549 | |
| SIFN5F | 9595 | |
| SIFY5A | 8053 | 8402 |
| SIFY5B | 5153 | |
| SIFY5C | 5321 | |
| SIFY5D | 13005 | |
| SIFY5F | 10130 | |
| SIFN10A | 16149 | 19248 |
| SIFN10B | 19539 | |
| SIFN10C | 21388 | |
| SIFN10D | 14006 | |
| SIFN10E | 25158 | |
| SIFY10A | 31077 | 30973 |
| SIFY10B | 28679 | |
| SIFY10C | 30736 | |
| SIFY10D | 33400 | |

**EK C:** Net Eğilme Dayanımları

**Tablo C. 1:** Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları

| **Numune Kodu** | **Net Eğilme Dayanımı ($N/mm^2$)** | **Ortalama ($N/mm^2$)** |
|---|---|---|
| SIF0A | 4 | 3 |
| SIF0C | 2 | |
| SIF0D | 3 | |
| SIF0E | 1,9 | |
| SIFN5B | 19 | 18 |
| SIFN5C | 23 | |
| SIFN5D | 19 | |
| SIFN5E | 13 | |
| SIFN5F | 18 | |
| SIFY5A | 9,5 | 16 |
| SIFY5B | 16 | |
| SIFY5C | 13 | |
| SIFY5D | 19 | |
| SIFY5F | 17 | |
| SIFN10A | 25 | 29 |
| SIFN10B | 28 | |
| SIFN10C | 34 | |
| SIFN10D | 30 | |
| SIFN10E | 31 | |
| SIFY10A | 34 | 47 |
| SIFY10B | 46 | |
| SIFY10C | 48 | |
| SIFY10D | 48 | |

**EK D:** Numunelerde Kullanılan Metalik Liflerin Genel Özellikleri




Şekil D.1: Üretilen numunelerde kullanılan metalik liflerin genel özellikleri

**EK E:** Numunelerde Kullanılan Metalik Liflerin Genel Görünümü



**Şekil E.1:** Üretilen numunelerde kullanılan metalik liflerin görünümü

**EK F:** Silindir Basınç Deneyi Düzeneği







**Şekil F.1:** Silindir basınç deneylerini yapmada kullanılan Amsler marka yükleme makinesi

**EK G:** Silindir Yarmada Çekme Deneyi Düzeneği




**Şekil G1:** Üretim sürecinde kullanılan silindir yarmada çekme deneyi düzeneği

**EK H:** RILEM Kırılma Enerjisi Deney Düzeneği



**Şekil H.1:** RILEM kırılma enerjisi tayininde kullanılan deney düzeneği

## ÖZGEÇMİŞ

Y. Alper BULUTLAR, 1981 yılında Kars'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Eskişehir'de tamamladı. 1999 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 1999–2000 öğretim yılında İ.T.Ü. İngilizce Hazırlık Bölümünü tamamlayarak, 2000 yılında başladığı lisans öğrenimini 2004 yılında tamamladı. 2004 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yazar, 2005 yılında başladığı Garanti Koza A.Ş.-Alsim Alarko A.Ş. ortak girişimindeki görevini halen sürdürmektedir.