

**LİF İÇERİĞİ VE SU/ÇİMENTO ORANININ
FİBROBETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA
ETKİLERİ**

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gözde KURT**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

MAYIS 2006

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan değerli hocam Prof.Dr. Mehmet Ali Taşdemir' e,
Çalışmalarımda ilgi ve yardımları dolayısıyla sayın hocalarım Prof.Dr. Canan Taşdemir' e, Doç. Dr. Yılmaz Akkaya' ya ve başta Araş.Gör. Cengiz Şengül olmak üzere, Araş.Gör. Anıl Doğan, Araş. Gör. Bekir Y. Pekmezci, Araş.Gör. Nilüfer Özyurt ve Dr. Fikret Bayramov'a, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarı çalışanları ile, Deneysel çalışmalara yaptıkları üretim desteklerinden dolayı FİBROBETON Yapı Elemanlar Ltd. Şti.' ne ve İnş. Müh. Erhan Güney' e,
Çalışmalarım süresince her an yanımda olup, yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma,
Gösterdikleri sonsuz sevgi, hoşgörü ve destekleri için çok sevgili aileme,

teşekkür ederim.

Mayıs 2006

Gözde KURT

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
KISALTMALAR	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER	3
2.1. Tarihçe	3
2.2. Lifler Hakkında Genel Bilgi	6
2.2.1.Lif Çeşitleri	7
2.2.1.1. Doğal olarak Elde Edilen Lifler	8
2.2.1.2. Metalik Lifler	9
2.2.1.3. Polimerik Lifler	11
2.2.1.4. Cam Lifler	12
2.3. Matris ve Lifler Arasındaki Etkileşim	14
2.3.1. Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim	14
2.3.2. Çatlamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim	15
2.4. Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler	16
2.4.1. Taze Betonun İşlenebilirliğine Lif Etkisi	20
2.4.2. Lif Özelliklerinin Kompozit Özelliklerine Etkisi	21
2.4.2.1. Lif Geometrisinin Etkisi	22
2.4.2.2. Lif Boyunun Etkisi	22
2.4.2.3. Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri	23
2.5. Lif Takviyeli Betonların Özellikleri	24
2.5.1. Çelik lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri	24
2.5.2. Polimer Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri	26
2.5.3. Cam Lifi Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri	27
2.6. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	31

2.6.1. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Matris Olarak Kullanılan	
Malzemeler	31
2.6.2. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Donatı Malzemesi	32
2.6.3. Taneli Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Katkı Maddeleri	34
2.6.4. Genel Donatı Türleri	35
2.7. Liflerle Donatılı Kompozitlerde Gerilme ve Şekil Değiştirme	38
2.8. Liflerle Donatılı Kompozitlerde Eğilme Dayanımı ve Gerilme Şekil	
Değiştirme Davranışı	39
2.9 Lif Takviyeli Kompozitlerin Kullanım Yerleri	41
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	43
3.1.1. Beton Karışımı	43
3.1.2. Cam Lifleri	44
3.1.3. Süperakışkanlaştırıcı	45
3.2. Beton Üretimi	46
3.2.1. Numune Kodlarının Belirlenmesi	46
3.2.2. Numune Boyutları ve Şekilleri	46
3.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri	47
3.3.1. Silindir Basınç Deneyi	47
3.3.2. Yarmada Çekme Deneyi	48
3.3.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi	49
3.3.3.1. Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması	51
3.3.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması	52
4.DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	53
4.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların	
Değerlendirilmesi	53
4.1.1. Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi	54
4.1.2. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi	54
4.2. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların	
Değerlendirilmesi	56
4.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların	
Değerlendirilmesi	57
4.3.1. Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi	57
4.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	58

4.4. Elde Edilen karakteristik Boyların Değerlendirilmesi	60
4.4. Elde Edilen karakteristik Boyların Değerlendirilmesi	60
5. CAM LİFLİ BETONLARIN OPTİMUM TASARIMI	
5.1. Çok Amaçlı Optimizasyon: 1. Yöntem	62
5.2. Çok Amaçlı Optimizasyon: 2. Yöntem	65
5.3. Optimizasyon Sonucu	67
6. GENEL SONUÇLAR	69
6.1. Cam Lifi Etkisi ile İlgili Sonuçlar	69
6.2. Su/Çimento Oranının Etkisi ile İlgili Sonuçlar	69
KAYNAKLAR	71
EKLER	74
ÖZGEÇMİŞ	87

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1: Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler.....	8
Tablo 2.2: Bazı metalik liflerin tipik özellikleri.....	9
Tablo 2.3: Polimer liflerin fiziksel özellikleri.....	12
Tablo 2.4: Bazı cam liflerin tipik özellikleri	13
Tablo 2.5: Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin tokluk değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması	19
Tablo 2.6: Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin eğilme dayanımı değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması	19
Tablo 2.7: Lif takviyeli kompozitlere katılan lifler ve uygulama alanları.....	20
Tablo 2.8: Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri	25
Tablo 2.9: Cam elyafı üretilen çeşitli camların bazı özellikleri.....	29
Tablo 2.10: Liflerle donatılı betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri.....	36
Tablo 2.11: Çelik tellerle donatılı betonlarda elastik şekil değiştirme indeksleri değerleri.....	40
Tablo 3.1: Harç karışım tablosu.....	43
Tablo 3.2: Fibre içeriği.....	44
Tablo 3.3: Cam elyaf takviyeli betonların fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 3.4: Numune kodları ve Lif Yüzdesi.....	46
Tablo 3.5: Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Karma lifli kompozitlerin eğilme dayanımları.....	17
Şekil 2.2: Cam : Polipropilen karma lifli beton, toplam lif hacmi $V_f = \%5$	18
Şekil 3.1: Döküm akış diyagramı.....	43
Şekil 3.2 Numune boyutları ve şekilleri.....	47
Şekil 3.3 Silindir basınç dayanımı-şekil değiştirme ilişkisi.....	48
Şekil 3.4 RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.....	49
Şekil 3.5: RILEM kırılma enerjisi deneyleri veri toplama sistemi.....	50
Şekil 3.6: 3 noktadan yüklemeli eğilme deneylerinden elde edilen yük - sehim eğrileri.....	50
Şekil 3.7: Örnek bir Yük-Sehim Eğrisi.....	51
Şekil 4.1: Silindir Basınç Dayanımları.....	53
Şekil 4.2: Elastisite Modülleri.....	55
Şekil 4.3: Yarmada Çekme Dayanımları.....	56
Şekil 4.4: Numunelerin kırılma enerjileri.....	58
Şekil 4.5: Net eğilme dayanımlarının ortalama değerleri.....	59
Şekil 4.6: Numunelerin karakteristik boyları.....	60

KISALTMALAR

YPB: Yüksek Performanslı Beton

YMB: Yüksek Mukavemetli Beton

GFRC: Glass Fibre Reinforced Concrete - Cam Lifi Takviyeli Beton

HPC: High Performance Concrete - Yüksek Performanslı Beton

ÇTDB: Çelik Tellerle Donatılı Beton

BRE: Yapı Araştırma Grubu

AD: Alkali Dayanımlı

CLTK: Cam Lifi Takviyeli Beton

SFRC: Steel Fibre Reinforced Concrete – Çelik Lif Takviyeli Betonlar

FRC: Lif Takviyeli Betonlar

CTP: Cam Takviyeli Plastik

LİF İÇERİĞİ VE SU/ÇİMENTO ORANININ FİBROBETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİLERİ

ÖZET

Son yıllarda beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce inşaatta kullanılan betonun basınç dayanımları en fazla 40 MPa iken, günümüzde yapılarda kullanılan betonların basınç dayanımı geçmiş yıllara göre yaklaşık üç kat artmıştır. Özel koşullar altında daha yüksek dayanımlara da ulaşılabilmektedir.

Yüksek dayanım; betondaki ve arayüzey bölgesindeki homojenliğin artırılması, boşluk oranının ve mikro çatlakların azaltılması ile olasıdır. Bu da süperakışkanlaştırıcılarla birlikte uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, doğal puzolan gibi puzolanik özellikleri de olan ultra incelikteki taneli malzemelerin betona eklenmesi ile sağlanabilir.

Günümüzde yüksek performanslı beton (YPB); yüksek binalar, köprüler, deniz yapıları, sığınaklar, nükleer reaktörler gibi çeşitli inşaat projelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yüksek dayanım ve dayanıklılık gösteren yüksek performanslı betonlarda ortaya çıkan en önemli sakınca; betonun gevrek bir davranış göstermesidir. Gevreklik nedeniyle betonun enerji yutma yeteneği azalmaktadır. Ayrıca, YPB' ların geçirimsiz bir yapıya sahip olmaları nedeniyle yangına karşı dayanıksızlığı bilinmektedir. Yüksek performanslı betonların bu olumsuz özelliklerini yok etmek için betona çeşitli tip ve oranlarda lif katılması yoluna gidilmiştir. Farklı özellikte ve miktarda liflerin betona katılması ile bu sorun ortadan kaldırılabilir. Liflerin aynı zamanda YPB' nun basınç ve çekme dayanımını da olumlu yönde etkilemektedir.

Yüksek performanslı beton üretiminde başta çelik lifler olmak üzere, polipropilen lifler, bazı polimer esaslı lifler ve cam lifleri de kullanılmaktadır. Lif eklenmesi, harç ve betonun mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artmasını sağlamıştır. Lifli betonda, lifsiz betona göre oluşan en önemli performans artışı, kırılma sırasında enerji yutma kapasitesinin artmasından ileri gelmektedir.

Bu çalışmada, cam lifi içeriği ve su/çimento oranı değiştirilerek sekiz farklı Cam Lifi Takviyeli Beton (Glass Fibre Reinforced Concrete – GFRC) karışımı üretildi.

Bütün karışımlar için elastisite modülü ve standart basınç deneyleri için 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindirler hazırlandı. Yarmada çekme deneyleri için 150 mm çapında ve 60 mm yüksekliğinde disk numuneler ve kırılma enerjisi deneyleri için de 280 mm uzunluğunda 50 mm x10 mm kesitinde kirişler hazırlandı.

Değişik oranlarda cam lifi içeren ve farklı su/çimento oranına sahip betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, yarmada çekme dayanımları, kırılma enerjileri, karakteristik boylarının birbiriyle ve cam lifi içermeyen betonlarla karşılaştırılarak mekanik davranış ve özellikler değerlendirildi. Su/çimento oranı 0,34 olan yalın betonun (matris) kırılma enerjisi, cam liflerinin eklenmesiyle 109 katına kadar ulaştı. Su/çimento oranı 0,36 olan fibrobetonda ise matrise kıyasla kırılma enerjisi 66 kat arttı. Böylece, cam lifi takviyeli kompozitler yalın olanlara kıyasla daha tok ve sünek davranış sergilemektedir.

EFFECTS OF FIBRE CONTENT AND WATER/CEMENT ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF GLASS FIBRE REINFORCED CONCRETE

SUMMARY

In the recent years, incredible advances in concrete technology have been recorded. Only 30 years ago, the maximum compressive strength at the construction site was about 40 MPa. Nowadays, the strength of the concrete used in structures, increased approximately three times and even higher strengths can be achieved under special conditions.

High strength concrete can be obtained by reducing porosity, heterogeneity and microcracks in concrete and the transition zone. This can be achieved by using superplasticizers and ultra fine pozzolanic materials such as fly ash, silica fume, granulated blast furnace slag, and natural pozzolan.

High performance concretes (HPC), have started to be used in different construction projects such as tall buildings, bridges, marine and sea structures, shelters and nuclear reactors. On the other hand, high performance concretes which have high strength and durability have also some disadvantages. Brittleness is the most important disadvantage of HPC, because energy absorption capacity is reduced by the brittle behavior. Furthermore, fire resistance of HPC decreases because of its tough microstructure. This disadvantage can be eliminated by mixing different types and quantities of fibres added to concrete. At the same time, fibres do positive effect on both compressive and tensile strength.

The most common used fibres are steel fibres, polypropylene and glass fibres. The addition of fibres significantly improves many of the mechanical properties of mortar and concrete, notably impact strength and toughness. The enhance performance of fibre-reinforced concrete compared to its unreinforced counterpart comes from its improved capacity to absorb energy during fracture. Beside steel fibres, some polymeric fibres, especially polypropylene, are also started to use in reinforced concretes.

In this research, eight different concrete mixtures with various volume fractions of glass fibres and different water/cement ratio were produced. For both the modulus of elasticity and the standard compressive tests cylinders of 100 mm in diameter and 200 mm height were prepared for all mixtures. Disc specimens were used for the splitting tensile test. Discs of 150 mm in diameter and 60 mm in height were prepared and the beams prepared for the fracture energy tests were 280 mm in length and 50mm x 10 mm in reduce cross section.

The main objective of the present work is to investigate the meachanical behavior of concretes cotaining glass fibre with different volume fraction and two different water/cement ratio. Specifically, compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength, fracture energy, net bending strength, and characteristic length of concretes with glass fibres are compared to without glass fibres.

Fracture energy of plain concrete (matrix) with the water/cement ratio of 0,34 increased up to 109 times owing to the addition of glass fibres; while in GFRC with the water/cement ratio of 0,36 the increase in fracture energy was 66 times. Thus, the GFRC shows a behavior of enhanced toughness and ductility when compared to the matrix.

1.GİRİŞ

Cam Lifi Takviyeli Betonlar (Glass Fiber Reinforced Concrete), alkaliye dayanıklı özel cam lifiyle güçlendirilmiş; yüksek dozajda çimento, ince agrega ve katkı malzemelerinin karıştırılmasıyla oluşan kompozit malzemelerdir [1].

Lifler betonda mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Oluşan çatlakların ani olarak yayılmasını engelleyerek, betonun sünek davranış göstermesini sağlayan lifler, oluşan deformasyonlarda betonun yük taşıyabilmesini sağlamakta ve enerji yutma kapasitelerini arttırmaktadır. Kullanılan liflerden beklenen performans; lif boyu, lif narinlik oranı ve lif geometrisine bağlı olmakla birlikte lif dayanımından ve lif-matris aderansından da önemli derecede etkilenmektedir. Kullanılan bağlayıcı miktarının artmasıyla birlikte artan lif-matris aderansı göçme davranışını değiştirmekte ve davranışın lif sıyrılmasından çok daha az enerji yutan lif kopması ile gerçekleşmesine neden olmaktadır. Kullanılan lifin dayanımının artması ise yeterli aderans sağlandığı takdirde sıyrılma ile gerçekleşen göçme davranışını düşük dayanımlı liflerin kullanıldığı duruma göre arttırmakta ve daha fazla enerji yutulmasına izin vermektedir [2].

Bu çalışmada farklı lif içeriği ve su/çimento oranına sahip Alkali Ortama Dayanıklı Cam Lifi katkılı betonlar kullanılmıştır. Betonların basınç ve çekme dayanımları, elastisite modülleri ve karakteristik boyları, kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları saptanmıştır.

Bu çalışmanın amacı; cam lifi katkılı betonlarda su/çimento oranının ve lif miktarının değişiminin betonun mekanik davranışına etkileri incelenmektedir. Aynı malzemeden üretilen lifsiz numunelerin mekanik davranışlarını da inceleyerek lif etkisini belirlemektir.

Bu amaç doğrultusunda 8 ayrı tip beton üretildi. Bu karışımlarda hacmin %0 - %2 - %4 - %6' sı oranlarında minimum 10 µ çapında, 12 ve 20 mm boyunda olan alkali ortama dayanıklı cam lifler kullanıldı. Numunelere RILEM kırılma enerjisi deneyleri, silindir basınç deneyleri ve disk yarma deneyleri uygulandı. Deneyler sonucunda numunelerin eğilme, basınç ve çekme davranışları incelendi ve lif

miktarına ve su/imento oranına bağlı olarak oluşan değişimler araştırıldı. Sonuçta lif miktarı arttıkça kırılma enerjilerinde önemli artışlar oldu.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER

2.1. Tarihçe

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı maddesinden oluşan, oranları belirli esaslara göre ayarlanmış bir karışımı, istenen karışım ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirme yolu ile elde edilen kompozit bir malzemedir [3].

Beton ve harçların yapı malzemesi olarak kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. Tarihte ilk harç uygulamalarında bağlayıcı malzeme olarak kil kullanılmıştır. Bilindiği gibi kerpiç; balçık, kil bağlayıcı malzeme kullanılarak yapılan ilk yapı malzemelerindendir ve dünyanın pek çok yöresinde, ülkemizde de halen kullanılan bir yapı malzemesidir. Daha sonra, alçı, kireç gibi bağlayıcıların üretilmesiyle, Eski Mısır’ da alçının, Eski Roma’ da kireç ve puzolanların, daha sonraları Avrupa’ da grapye ve su kirecinin harç yapımında kullanıldığı görülmektedir. Yüzyıllar boyunca Anadolu ve çevresinde kullanılan Horasan harcı da kireç esaslı taneli bir kompozit malzemedir.

Betonun tarihi Eski Roma Dönemi’ ne kadar gider. Romalılar, kireç, volkanik küller ve tüfler kullanılarak elde ettikleri, havada ve suda katılaşma özelliğine sahip olan su kireci (hidrolik kireç) ve agrega ile, beton diye tanımlanabilecek malzemeler yapmışlardır. Kireç ile puzolanik maddelerin karışımının bağlayıcı olarak kullanıldığı ve “opus caementicium” adı verilen malzeme yolların ve yapıların inşasında kullanılmıştır.

Günümüzdeki anlamıyla beton ile ilgili çalışmalar, XIX.yüzyılın başlarında başlamıştır. Çimentoyla ilgili çalışmaların ilerlemesi ve 1824 yılında Portland Çimentosunun üretilip, patentinin alınması, bu alanda dönüm noktasını oluşturmaktadır.

Beton ve çeliğin eğilme halinde bir arada kullanılması fikrini ortaya ilk atan kişi ABD’ li T. Hyatt olmuştur. Hyatt, 1850’ lerden itibaren betonarme üzerinde sürdürdüğü çalışmalarını 1877 yılında yayımlamış, bunu Avrupa’ da bu alanda yapılan bir çok çalışmanın sonuçlarının yayınlanması izlemiştir. Teller ve liflerle donatılı betonlarla ilgili ilk çalışmalar gene J. Lambot’ nun 1847 yılındaki patentlerine dayanmaktadır. Lambot’ nun ilk betonarme uygulamaları olarak da değerlendirilen çalışmaları sürekli teller ve tel kafes donatıyladır. 1874 yılında

liflerle donatılı betonla ilgili ilk patent A.Berard tarafından California’ da alınmıştır. 1960’ lı yıllardaki çalışmalar sonucunda liflerle donatılı betonlarla ilgili olarak önemli gelişmeler sağlanarak, betonun donatılmasında çok değişik niteliklere sahip ve farklı biçimlerde lifler kullanılmaya başlanmıştır.

İlk betonarme kabuk uygulaması 1920’ li yıllarda Almanya’ da yapılmıştır. Beton teknolojisinin gelişmesiyle, yüksek dayanımlı hafif agregalar üretilip, kullanılarak malzeme hafifleştirilmiştir. Bunun sonucu olarak hafif betonarme yapılar yapılmıştır.

İlk çağlardan beri insanlar kırılğan malzemenin içine bitkisel veya hayvansal kaynaklı lifler koyarak, bu kırılğanlık özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konuda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde, killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi bitkisel sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını arttırmaktadır.

Milattan önce 90 ile 20 yılları arasında yaşadığı tahmin edilen Vitruvius “Mimarlık Üzerine On Kitap” [4] isimli eserinin tuğla ile ilgili II. Kitabının 3. Bölümünde, “tuğlalar kumlu veya çakıllı kilden veya ince çakıldan yapılmamalıdır; çünkü öncelikle bu türden yapıldıkları zaman ağır olurlar, ikincisi duvarın içinde iken yağmurla ıslandıklarında ufalanıp, parçalanırlar ve içlerinde bulunan saman, malzemenin kabalığı nedeni ile dağılır” demektedir. Bu, daha yaklaşık ikibin yıl öncesinde, malzemenin dayanımla ilgili özelliklerinin iyileştirilmesi için donatıldığını ve o devirde de, donatının görevini yerine getirebilmesi için matris malzemesinin nitelikli olmasının gerektiği konusunun iyi bilindiğini göstermektedir.

Öte yandan, günümüzde kompozit malzemenin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamaların da çok yeni olmadığı eldeki bulgulardan anlaşılmaktadır. Örneğin cam liflerin üretimi, Eski Mısır’ a kadar uzanmaktadır. Daha M.Ö. 1600 yıllarında Mısır’ da ince cam liflerinin yapımının bilindiği, XVIII. Hanedan Devri’ nden kalan, çeşitli kalınlık ve renkte cam lifleriyle bezenmiş amforaların mevcudiyetinden anlaşılmaktadır.

Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt 1877 tarihlidir. Hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme olarak kullanılarak yapay taş plakların üretilmesi yöntemi hakkında bu yüzyılın başında alınmış patentlere rastlanmaktadır [5,6]. Cam lifli kompozitlerle ilgili gelişmeler 1960’ lardan sonra Yapı Araştırma Kurumu (Building Research Establishment) İngiltere’ de Dr. Majumdar’ ın zirconyum oksit içeren, alkali dayanımlı cam lifi üretiminde başarılı olup, bunu normal hidrate

portland çimentosu ile karıştırarak patent aldı. 1971’ de cam liflerinin üretimi gereken kaliteye ulaştı ve teknolojik olarak gelişti. 1980’ lerde A.B.D.’ lerinde yapılan 12 projede GFRC duvar panelleri kullanıldı [1].

Çok eski çağlardan beri, geleneksel bir malzeme olan kerpiçte, kil hamuruyla birlikte bitkisel liflerin, samanın; alçı sıva ve kartonpiyer uygulamalarında keten veya kenevir liflerinin, kütük ve at kuyruğu, keçi kılı gibi hayvansal liflerin kullanıldığı bilinmektedir. Günlük uygulamalarda en yaygın kullanım olanağı bulmuş olan liflerle donatılı kompozit malzemelerden ikisi, asbest lifleriyle donatılı çimento ve cam lifleriyle donatılı polyester kompozitleridir.

İlk kez ince levha ve boru yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllar boyu önemini koruyarak, bugün hala kullanılan bir malzeme olma niteliğini sürdürmektedir. Ancak asbest liflerinin, özellikle bazı türlerinin insan sağlığı açısından zararlı olduğunun saptanması, bu uygulamanın sağlıkla ilgili nedenlerle kısmen sınırlanması ve alternatif donatı malzemesinin kullanımının yaygınlaşması sonucunu doğurmuştur [7].

İnorganik esaslı bağlayıcılarla üretilen beton ve harçların cam lifleriyle donatılarak, güçlendirilmesine ilişkin ilk bilimsel çalışmayı Biryukoviç ve arkadaşlarının yaptığı, bu konuda çalışan iki araştırmacı, Majumdar ve Nurse [8] tarafından belirtilmektedir. Ancak, bu noktada çalışan iki araştırmacı olan Cimiil[9], Biryukoviç’ in bir yayınına ve diğer bazı kaynaklara dayanarak, bu alanda Çin Halk Cumhuriyeti’nde 1958 yılından beri birçok uygulama yapıldığını, Amerika Birleşik Devletleri’ nde 1940 yılında bu konuda alınmış patentlere rastlandığını belirtmektedir. Aynı kaynakta, bu türden donatı malzemesiyle ilgili çalışmalara, 1965 yılı öncesinde Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği’ nde ve Çin Halk Cumhuriyeti’ nde, 1965 sonrasında da başta İngiltere olmak üzere Batı dünyasında ağırlık verildiği konusuna değinilmektedir.

Liflerle donatılı kompozitler, özellikle harç ve betonlar konusundaki çalışmalar, başlangıçta özellikle Danimarka’ da West ile Krenchel, Amerika Birleşik Devletleri’ nde Romualdi, İngiltere’ de Yapı Araştırma Kurumu’ nda Nurse ve Majumdar’ ın öncülüğünde başlamış ve çeşitli ülkelerde bu alandaki araştırmacıların çalışmalarıyla devam etmiştir. Liflerle donatılı kompozitler üzerindeki bu çalışmalar gittikçe farklı alanlarda gelişmiştir. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri’ nde bilim adamları ve mühendisler betonu matris malzemesi kabul ederek, naylon ve polipropilen gibi lifler başta olmak üzere çok farklı liflerle, özellikle de çelik lif ve

tellerle donatı üzerinde çalışmalarını derinleştirmiştir. Bunun bir sonucu olarak “Çelik Tellerle Donatılı Beton” (ÇTDB) [10] önce Kuzey Amerika’ da, daha sonra da Avrupa ve Japonya’ da özellikle döşeme kaplaması olarak veya püskürtme beton yapımı gibi farklı alanlarda uygulanma olanağı bulmuştur.

Buna karşılık, örneğin İngiltere’ de Yapı Araştırma Kurumu (Building Research Establishment) 1966 yılından itibaren özellikle cam elyafı ile donatı, buna uygun matris malzemesinin seçimi ve donatıda kullanılacak cam lifinin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. İnce tabaka şeklindeki uygulamalar, kabuk yapımı şeklindeki uygulamalar burada ağırlık kazanmıştır. Özellikle, betona alkali ortamda tahrip olan E-camı lifleri yerine, 1971 yılında Pilkington Firması’ nın, Yapı Araştırma Kurumu (BRE) ve Britanya Grubu’ yla birlikte, “ CEM FIL ” diye tanımlanan, alkali ortama dirençli cam liflerini üretmesi, bu alanda bir dönüm noktasını oluşturmuştur. (Camın yapı bakımından alkali ortamda dayanıklı olmaması, özellikle mikron mertebesinde çapa sahip cam liflerin beton gibi çimento bağlayıcı matris içerisinde kısa sürede tahrip olmasına neden olmaktadır. Burada sözü edilen “CEM FIL” patentli cam elyafı, beton ve harçlardaki alkali ortama dayanıklı bir türdür. Alkaliye dayanıklı cam lifleri genelde, ‘Alkali Dirençli Cam Lifi (AD Cam Lifi)’ diye adlandırılmaktadır.)

Yapılan bu çalışmaları, yine Pilkington’ daki ve Japonya’ daki “daha üstün nitelikli” cam lifleri üzerinde yapılan çalışmalar izlemiştir. Polipropilen, naylon gibi sentetik lifler ve karbon liflerinin uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yürütülmüştür. Ancak, bu liflerin 1970’ li yılların teknolojiyle cam lifleri kadar kolay üretilir olmaması, buna bağlı olarak maliyetlerinin daha yüksek oluşu nedeniyle, çelik teller ve polipropilen lifi yine de önemini korumuştur.

2.2. Lifler Hakkında Genel Bilgi

Lif, doğal kaynaklardan elde edilen, ya da insan eliyle üretilen, uzunluğu, bükülebilirliği, esnekliği ve dayanıklılığı olan hammaddedir. Uygulamada kullanılan doğal ve yapay lifler vardır. Hayvan, bitki, mineral gibi doğal kaynaklardan elde edildiği biçimi ile doğrudan kullanılabilen hammaddeler ‘doğal lifler’ dir. ‘Yapay lifler’ ise, aranan belirli özellikleri taşıyacak biçimde özel olarak geliştirilen ve bu amaçla insan yapısı olarak üretilen malzemelerdir [11].

Lifler malzemelerin en geliştirilmiş halidir, dayanımları ve elastisite modülleri genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyüktür. Doğada lif formunda birçok malzeme vardır. Lifler insanoğlu tarafından uzun zamandır kullanılmaktadır. Geleneksel bir malzeme olan kerpiçte, kil hamuruyla birlikte bitkisel liflerin, samanın; alçı sıva ve kartonpiyer uygulamalarında, keten ve kenevir liflerinin, kıtık ve at kuyruğu, keçi kılı gibi hayvansal liflerin kullanıldığı bilinmektedir [12].

İnsan eliyle üretilen lifler ilk defa 19.yüzyılın sonunda ortaya çıkmasına rağmen, bu sentetik liflerin geçmişi 60 yıldan fazla değildir. Bununla birlikte bu kısa zamanda vazgeçilmez bir malzeme haline gelmişlerdir [13].

Lif tanımı, bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan her türlü malzemeyi belirtmektedir. Liflerle donatılı kompozit malzeme, genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılğan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığın giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla, bu özellikleri iyileştirecek nitelikte liflerle donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir. Bu tür kompozitler, matris fazını oluşturan malzeme ile fazın özelliklerine bağlı olarak, “kırılğan matris ve sünek lifli kompozitler” ile “sünek matris ve kırılğan lifli kompozitler” olarak ikiye grupta toplanmaktadır. Bu gruba giren endüstrinin çeşitli alanlardaki üretimin yanı sıra, özellikle son yirmibeş yıldan beri yapı alanında da gitgide artış kaydeden bir uygulama olanağı bulmaktadır.

2.2.1.Lif Çeşitleri

Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır. Bu lifleri değişik biçimlerde sınıflandırmak mümkündür. Lifler, genel olarak şöyle sınıflandırılabilirler [14]:

Lifler

- Doğal Lifler
 - Hayvansal Lifler
 - Bitkisel Lifler
 - Mineral Lifler
- Sentetik Lifler
 - Polimer Lifler

- Metalik Lifler
- Seramik Lifler

Bu tabloya göre çelik ve cam lifler, çekme dayanımı yönünden en iyi performansı gösteren lif cinsleridir. Çelik lifler özgül ağırlığı en fazla olan lif cinsi olarak ayrı bir özellik taşırlar [15]. Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler tablosu Tablo 2-1 de görülmektedir.

Tablo 2-1: Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler [15].

Lif cinsi	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (10^3 , MPa)	Maksimum uzama (%)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8

2.2.1.1. Doğal olarak elde edilen lifler

Lif takviyeli kompozitleri oluşturmada kullanıldığı bilinen en eski doğal lifler; saman ve at yelesidir. Hatta günümüzde bile Osmanlılar' dan kalma alışkanlıkla bazı cami kubbelerinde saman kullanımına rastlanmaktadır. Modern teknoloji lifleri, çimentolu kompozitlerde kullanılan jüt ve bambu gibi, çeşitli bitkilerden daha ekonomik biçimde elde etmeyi mümkün kılmıştır. Bu liflerin en önemli özelliği, çok kolaylıkla elde edilmeleridir. Ancak bu liflerin kullanımında karşılaştığımız ana sorun, bunların alkali ortamda özelliklerini yitirme eğiliminde olmalarıdır.

Bu liflerin durabilitesini arttırmak için betonun alkalitesini azaltacak katkıları kullanılmalıdır.

Portland çimentosu ile kullanılan diğer doğal lifler ise; akwara (Nijerya'da yetişen aynı adlı bir bitkinin gövdesinden elde edilmektedir), bambu, hindistan cevizi, flax, jüt, sisal, şeker kamışı posası ve ahşaptır [16].

2.2.1.2. Metalik Lifler

Metaller başta mühendislik uygulamaları olmak üzere, birçok alanda sıkça kullanılırlar. Metaller, mekanik ve fiziksel özelliklerin mükemmel bir kombinasyonu sağladıkça uygun fiyatlarla elde edilebilirler. Metallerin önemli özelliklerinden bir tanesi plastik şekil değiştirebilme yeteneğidir. Böylece, çok basit şekillerden başlayarak, çok karmaşık şekil ve formlarda üretim yapabilmesine olanak sağlar. Uçak gövdesinden, büyük petrol ve gaz borularına ve hatta günlük hayatta kullandığımız pek çok basit alete kadar metallerin kullanımına rastlanır. Lif formundaki metaller uzun zamandır kullanılmaktadır. Örneğin; tunç lifler lambalarda, bakır ve alüminyum lifler elektrik uygulamalarında, çelik lifler ön gerilmeli yapılarda, kablo olarak asma köprülerde, süper iletkenlerde ve piyano, violin gibi çeşitli müzik aletlerinin tellerinde kullanılmaktadır. Bazı önemli metalik liflerin özellikleri Tablo 2.2' de görülmektedir [13].

Tablo 2.2:Bazı metalik liflerin tipik özellikleri [13].

Metal	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	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(<250µm) 3150(<125µm) 3850(<25µm)
0,9 % Karbon çeliği (0.1 mm çapında)	7,9	1300	210	4000
Paslanmaz çelik (0,05 mm çapında)	7,8	1535	198	2400

Çelik lifler, betona katılan metalik liflerin en yaygın olanıdır. Ortaya çıkan ürün de, kısaca ÇLTB (çelik lif takviyeli beton) veya MLTB (metal lif takviyeli beton) diye adlandırılır. Takviye elemanları olarak üretilen çelik lifler, aynı uzunluktaki cam ve polimer liflere göre daha kalın ve daha serttir. Dairesel kesitli çelik liflerin çapları 0,2 ila 1,0 mm arasında değişmektedir. Uzunlukları ise genelde 20 ila 50 mm arasında değişmektedir. Eritip çekme yöntemi ile veya amorf yapıda şerit biçiminde üretilen çelik liflerin, üretim yöntemine göre belirlenen boyut ve şekilleri vardır. Bu lifler genellikle yaklaşık 1,8 mm genişlikte ve 0,025 mm ile 0,100 mm kalınlıkta ve düz kesitlidir, uzunlukları da 10 mm ila 60 mm arasındadır.

Çelik liflerin sertlikleri ve karıştırma sırasında bükülmeye karşı gösterdikleri yüksek dirençleri, diğer liflerle karşılaştırırken çelik liflerin narinliğini göz önünde bulundurmayı gerektirmektedir. Narinlik oranı, lifin boyunun çapına bölünmesiyle (L/d) bulunur. Çelik liflerin narinlik oranı 20 ile 250 arasında değişmektedir [17].

Beton takviyesinde kullanılabilecek çelik lifleri sınıflandıran ve özelliklerini belirten Amerikan Standardı ASTM A 820-96' da [18] çelik lifler 4 değişik şekilde sınıflandırılmıştır. Bunlar:

- Tip 1: Soğuk çekilmiş lifler,
- Tip 2: Plakadan kesilmiş çelik lifler,
- Tip 3: Haddelenip çekilmiş lifler,
- Tip 4: Diğer lifler.

Bu lifler düz veya değişik şekillerde olabilir. Bunların beton içindeki performansları; narinlik oranları, yapıları ve beton içerisindeki konsantrasyonları ile yakından ilgili olduğundan piyasada çeşitli tipleri bulunmaktadır [19].

Türk standardı TS 10513/92 [20] ise çelik lifleri şekillerine göre şu şekilde 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.

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

- İki ucu kıvrılmış lifler,
- Bir ucu kıvrılmış lifler olmak üzere ikiye ayrılır.

TS 10513 / 92' de çelik liflerin özellikleri ile ilgili iki önemli parametre vardır:

Liflerin çekme-kopma gerilmesi ortalaması en az 345 N/mm^2 olmalıdır. Her bir lif için çekme-kopma gerilmesi 310 N/mm^2 'den az olmamalıdır.

16 ± 2 °C'lik ortamda, 3,18 mm' lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilmede, deneye tabi tutulan liflerin % 90' ının kırılmaksızın 90° eğilme yapabilmesi koşuludur. Bu özellikler, betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir dayanıma sahip olmasına olanak sağlar. Çelik liflerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi önemli parametrelerdir [21].

2.2.1.3. Polimerik Lifler

Polimer lifler çok geniş uygulama alanları ve çeşitleri olan bir lif türüdür. Polimer lifler doğal ve sentetik olmak üzere iki ana grupta değerlendirilebilir. Doğal lifler; pamuk, sisal ve Hint keneviri gibi bitkisel veya yün, deri gibi hayvansaldır. Doğal lifler genellikle doğada polimer olarak bulunurlar. Ayrıca, kimi doğal lifler kaya formasyonlarında bulunabilirler. Bu lifler mineral haldedir ve bu yüzden seramik olarak adlandırılabilir. Örneğin asbest ve bazalt bu gruba girer [13].

Polimerik lifler, 20. yüzyılın ikinci yarısında çok büyük ilerlemeler göstermiştir. Gerçekte, lif çağı olarak adlandırılacak dönem 1930'ların sonları ve 1940'ların başlarında naylon ve polyester gibi sentetik liflerin keşfi ile başlamıştır. Bu sentetik polimer liflerin çoğu, çok düzenli ve kopya edilebilir özelliklere sahip olmakla birlikte, düşük elastisite modülüne sahip olduklarından, tekstil sektöründe kullanımları kısıtlı olmaktaydı. Polimer takviyesinde kullanmak için sağlam ve elastisite modülü yüksek sentetik polimerik liflerin yapılması işi 1950'lerin sonları ve 1960'ların başlarında araştırma konusu olmuş ve böylece aramid ve uzun zincirli polietilen gibi sağlam ve yüksek elastisite modülüne sahip liflerin yapılması mümkün olmuştur [13].

Sentetik polimerik liflerin başlıcaları; polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlondur. Sentetik polimerik liflerin günlük yaşamımızda pek çok uygulama

alanı vardır. Örneğin, naylon ve polyester; iç çamaşırı, yağmurluk, spor kıyafetler gibi giyim eşyaları; keten, halı, döşeme, perde gibi ev eşyaları ve ip, balık ağı, emniyet kemeri, şerit, çadır gibi endüstriyel ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Polipropilen lifler, aynı zamanda çimento esaslı malzemelerin takviyesinde de kullanılabilir. Fakat liflerin kullanım miktarı genelde çok düşüktür (% 0,5 ile %10 arası). Harç ve betona lif katılmaya başlamasının nedeni; lifin malzemenin çekme ve darbe dayanımını arttırması ve çatlak oluşumundan sonra sünek bir yapı göstermesidir [13].

Bazı polimer liflerin fiziksel özellikleri Tablo 2.3.'te verilmiştir.

Tablo 2.3: Polimer liflerin fiziksel özellikleri

Lif Tipleri	Etkili Çap (10^{-3} mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)
Akrilik	13-104	1,17	207-1000	14,6-196	7,5-50,0
Aramid I	12	1,44	3620	62	4,4
Aramid II	10	1,44	3620	117	2,5
Naylon		1,16	965	5,17	20,0
Polyester		1,34-1,39	896-1100	17,5	
Polietilen	25-1020	0,96	200-300	5,0	3,0
Polipropilen		0,90-0,91	310-760	3,5-4,9	15,0

2.2.1.4. Cam Lifler

Cam lifler; sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi tipik cam özelliklerini sergiler. Ayrıca, esnek, hafif ve pahalı olmayan bir malzemedir. Bu özellikler, cam liflerini düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif tipi yapmaktadır. Cam lifler yüksek dayanıma sahip olduklarından, lif yüzeyinde oluşan kusurlar hem sayıca az, hem de boyutça küçüktür. Bütün cam lifler elastisite modüllerinin benzer olmalarına karşın, farklı

dayanım değerlerine sahiptirler ve çevresel etkilere karşı dirençleri de farklıdır. E tipi cam lifler, yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direncin gerekli olmadığı uygulamalarda kullanılırlar. Bu tip camlar, düşük fiyat yüksek korozyon dayanımı ve iyi mekanik özelliklere sahip olduğundan yapısal takviyelerde de tercih edilirler. S tipi ve S-2 tipi camlar en yüksek dayanıma sahiplerdir fakat E tipine göre 3-4 kat daha pahalı olduklarından, kullanım alanları kısıtlıdır. Diğer cam lif tipleri ve uygulama alanları ise; C tipi; korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, D tipi; elektrik akımına karşı direncin yüksek olması nedeniyle seramik sigorta gibi elektriğe dirençli malzemelerin üretilmesinde, A tipi ve AR tipi; yüksek alkalın dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler [22].

Cam liflerin özellikle E tipi, beton ve çimento gibi alkalın içeren ortamlarda kullanılması zamanla korozyona neden olabilir, bu yüzden cam liflerin bu uygulamalarda kullanılması istenmez. Bununla birlikte 1971 yılında İngiltere’de Pilkington firmasının, Yapı Araştırma Kurumu (BRE) ve Britanya Teknoloji Grubu’nun birlikte Cem-fil diye adlandırılmış olan, alkali etkisine dirençli nitelikteki cam liflerini üretmesi, cam lifi donatı alanında bir dönüm noktası oluşturmuştur. Bundan sonra, beton ve harçların donatılmasında, bu özel cam lifleri kullanılmaya başlamıştır. Bazı önemli cam liflerin tipik özellikleri Tablo 2.4’ te verilmiştir.

Tablo 2.4: Bazı cam liflerin tipik özellikleri [13].

Cam lifi tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2,54	1,7-3,5	69-72
S	2,48	2,0-4,5	85
C	2,48	1,7-2,8	70
CEM-FİL	2,70	-	80

Cam lifleri, genelde çimento hamuruna veya harç karışımlarına katılır, kaba agregalı betona pek katılmaz. Bu şekilde üretilen çimento esaslı kompozitler Cam Lif Takviyeli Kompozitler (CLTK) olarak bilinir. Bunlar kompleks ve büyük boyutlu

kaplama panellerden, prekast betonların üretimine kadar çeşitli alanlarda kullanılabilmektedir [17].

2.3. Matris ve Lifler Arasındaki Etkileşim

Matris ve lif arasındaki etkileşim çimento esaslı lifli kompozit malzemelerin performansını etkileyen temel özelliktir. Bu etkileşimi anlayabilmek için lif katkısını ve kompozit davranışını belirlemeye gerek vardır. Çok sayıda araştırmacı bu etkileşim üzerinde çalışmıştır. Çeşitli faktörler bununla ilgilidir. Matris ve lif arasındaki etkileşimi etkileyen temel özellikler şu şekildedir:

- Matrisin niteliği,
- Lif geometrisi,
- Lif tipi:örneğin, çelik, polimer, mineral veya doğal yollarla oluşan lif olması,
- Lif yüzeyinin özellikleri,
- Matrisin elastisite modülüne göre lif elastisite modülünün karşılaştırılması
- Liflerin yönlendirilmesi,
- Lifin hacimsel yüzdesi,
- Yükleme hızı,
- Kompozitteki liflerin durabilitesi ve uzun süreli etkisi.

Bu parametreler arasında varolan etkileşimleri karşılayan, kullanılabilir teorik modeller sınırlıdır [16].

2.3.1. Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim

Bu tip etkileşim yüklemelerin başlangıcında hemen hemen tüm kompozitlerde görülür. Bununla birlikte çoğu zaman matris, servis ömrü süresinde çatlayabilir. Çatlamamış matris ile lif etkileşimi bu yüzden pratik uygulamalarda sınırlayıcı bir durumdur. Bu etkileşimin sonucu, kompozitin tüm davranışını anlamak olasıdır. Ayrıca, çatlaklar kompozit içinde geliştiğinde dahi, yapının tüm özelliklerini etkiler.

Tek lif içeren basit bir lif-matris sisteminde, yüklenmemiş durumda, matris ve lifin her ikisinde de gerilmeler sıfır kabul edilir. Kompozite çekme veya basınç gerilmelerinin uygulanması veya kompoziti sıcaklık değişimlerine maruz bırakmak birbiriyle uyumlu gelişen gerilme ve şekil değiştirmeler oluşturur. Çimento

matrisinde, çimentonun hidrotasyonu gerilmeleri hem matris, hem de lifte düşürür. Matrise yük uygulandığı zaman, yükün bir kısmı liflere yüzeyi boyunca etkir. Lif ve matris arasındaki elastisite modülü farklarından dolayı lif yüzeyi boyunca kayma gerilmeleri gelişir. Bu kayma gerilmesi uygulanan yükün bir kısmının liflere iletilmesine yardımcı olur. Eğer lif matrsten daha sağlam bir yapıdaysa lifteki ve etrafındaki deformasyon daha küçük olur. Böyle bir durum çelik ve mineral liflerle ortaya çıkar. Eğer lifin elastisite modülü matrisinkinden daha küçük ise lif çevresindeki deformasyon daha fazla olur. Bu durum polimer veya bazı doğal lifler içeren kompozitlerde meydana gelir.

Pratikte lifler en azından iki doğrultuda rasgele dağılır. Lif takviyeli kompozitlerde lifler üç doğrultuda da rasgele dağılır. Ayrıca çelik liflerin çoğu ve polimer liflerin bazıları yüzeylerinden veya uçlarından deforme edilmişlerdir. Hemen hemen tüm durumlarda lifler arasında olan etkileşim problemi daha da karmaşık bir hale sokar. Bu yüzden pratik uygulamalarda kullanılan matematiksel modeller henüz gelişim aşamasındadır [16].

2.3.2. Çatlamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim

Çekme gerilmelerine maruz bırakılan lif takviyeli kompozitlerde gerilmeler belli bir değere ulaştınca matris çatlar. Matris çatlayınca lifler çatlak boyunca matrisin bir tarafından diğer tarafa yükü taşır. Pratikte çeşitli lifler çatlaklar arasında köprü kurarak yükü çatlak boyunca iletir. Eğer lifler yeterli yükü çatlak boyunca iletirse birçok çatlak numune boyunca bu şekilde tutulur. Yüklemenin bu aşaması çoklu çatlama safhası olarak tanımlanır. Çoğu uygulamada bu “çoklu çatlama safhası” olarak tanımlanır ve bu çoklu çatlama safhası servis yükleri altında meydana gelir.

Yük-kayma değişimi, liflerin tipinin ve dağılımının etkisi, tek liflerin sıyrılma dayanımının nasıl hesaplanacağı ve rasgele dağılmış liflerin etkileşimi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır, böylece çok sayıda lifin davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tek ve çok sayıda lifin sıyrılmasını, köprü kurmasını ve lif matris ara yüzeyini yeniden bağlamasını göstermektedir. Bu mekanizma, lifler arasındaki mesafeye bağlı değildir ve etkilidir, her ne kadar küçük miktarlarda olsa da tek bir lif için bile dikkate değerdir [23].

2.4. Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler

Lif takviyeli çimento esaslı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadırlar. Bilindiği gibi her malzeme çeşitli olumlu ve olumsuz özelliklere bir arada sahiptir. Tasarımcı ve üretici, amaçlarına uygun malzemeyi seçerken, bilinçli ya da bilinçsiz olarak birbirine seçenek oluşturan malzemeler arasında, nitelikleri her yönüyle değerlendirilerek, içinde bulunulan koşullar altında en uygun malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir. Kompozit malzeme üretimi mevcut temel malzemelerin olumsuz yanlarının iyileştirilmesi ve böylelikle kullanım alanının genişletilmesi, çok yönlü kullanımın sağlanması yönünde önemli bir adımı oluşturmaktadır [12].

ASTM C 1116-97' ye [24] göre lif takviyeli betonlar 3' e ayrılmaktadır: Tip1: Çelik Lif Takviyeli Betonlar (SFRC): Paslanmaz çelik, çelik alaşımı veya karbon çeliğini içerir.

Tip 2:Cam Lifi Katkılı Betonlar (GFRC): Alkaliye karşı dirençli camları içerir.

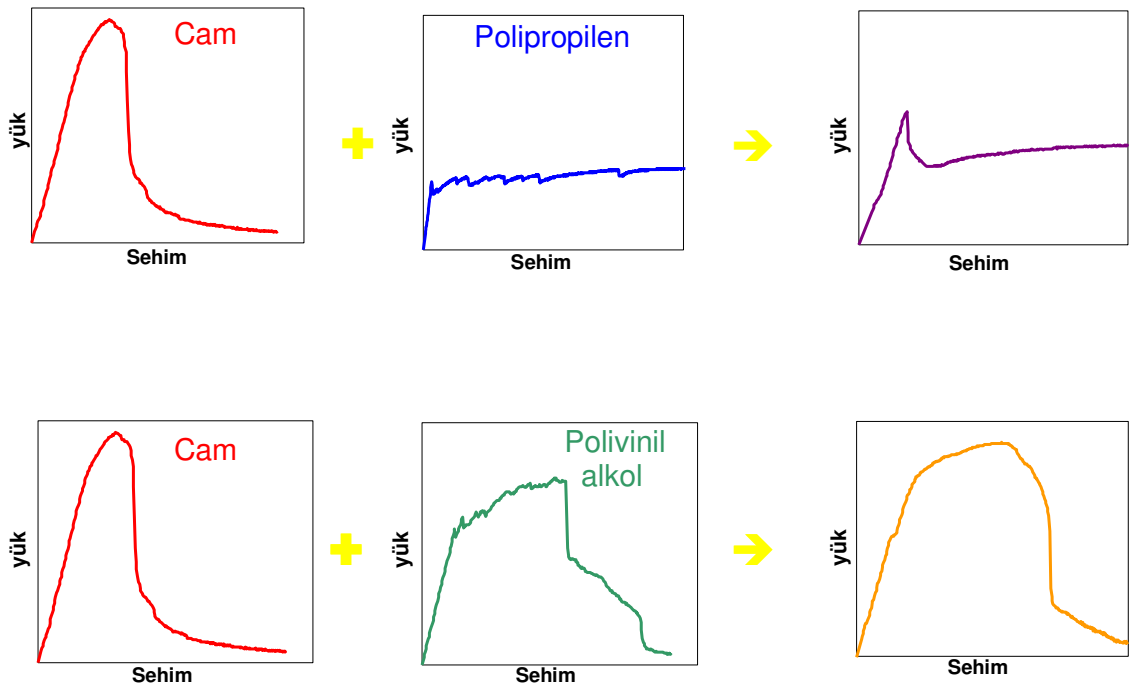
Tip 3: Sentetik Lif Takviyeli Betonlar (Sentetik FRC): Saf polipropilen lifler ve diğer sentetik lifleri içerir.

Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları ve toklukları düşüktür. Bu özellikleri iyileştirmek için çimento matrisini liflerle güçlendirmek günümüzde çok kullanılan yaygın bir yöntemdir. Liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlağın hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale gelmesi ile çelik lif takviyeli betonlarda gevrek kırılma davranışı gösteren normal betonlardaki ani göçme riski azalır. Ayrıca liflerin katılmasıyla malzemenin servis ömrü uzar, termik şok dayanımı artar ve daha küçük kesitlerle daha fazla üretim yapılabilir [19]. Bu kompozitler, en yaygın olarak beton yol üst yapılar, endüstriyel döşemeler, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi ve tünel kaplamaları, hava alanı kaplama betonları, liman kaplamaları, depreme dayanıklı yapılar, yangına dayanıklı yapılar, prekast elemanlar, beton borular ve askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır [21].

Lifler betonun tokluğunu, eğilme dayanımını veya her ikisini birden artırabilirler. Örneğin polipropilen lifler betonun tokluğunu dikkate değer bir şekilde artırırken çekme dayanımına çok az etki ederler, bununla birlikte polipropilen ve cam

lifleri birlikte kullanılarak yüksek tokluk ve çekme dayanımına sahip betonlar üretmek mümkündür.

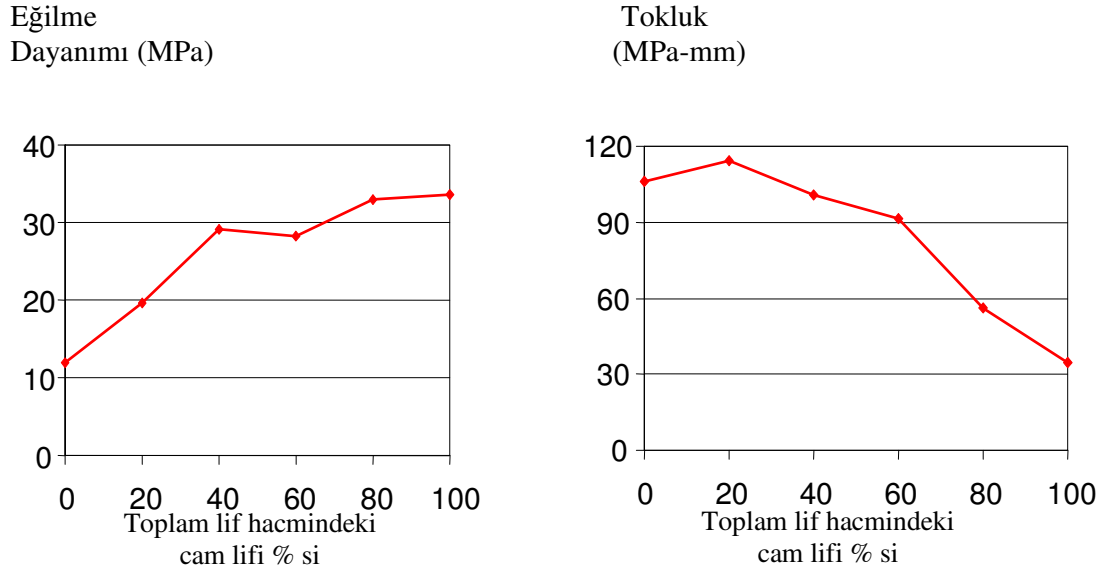
Cyr' ın karma lif takviyeli kompozit malzemeler üzerinde yaptığı deneysel çalışmada cam lifleri ile polipropilen lif ve polivinilalkol (PVA) lifleri bir arada kullanarak, daha yüksek tokluk, çekme ve eğilme dayanımına sahip betonlar üretmiştir [34]. Şekil 2.1' de liflerin karma olarak kullanımının eğilme dayanımları üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Karma lifli kompozitlerin eğilme dayanımları.

Liflerin her birinden daha fazla yarar sağlamak için farklı lifleri bir araya getirerek oluşturulan karma lifli betonların mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu görülmüştür. Cam lifleri sert fakat kırılgan, polipropilen lifleri ise duktıl fakat zayıftır. Bu iki lif bir arada kullanıldığında liflerin her birinin iyi özelliklerinden yararlanılarak, güçlü, sert ve dayanıklı bir kompozit malzeme elde edilir. Cam ve polipropilen liflerin karma olarak kullanıldığı betonlarda cam lifi içeriği arttıkça eğilme dayanım; polipropilen lif içeriği arttıkça da tokluğun arttığı gözlenmiştir [34].

Şekil 2.2’ de karma lifli betonda betonda lif içeriğinin değişiminin eğilme dayanımı ve tokluk üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Cam : Polipropilen karma lifli beton, toplam lif hacmi $V_f = \%5$ [34].

Yeol Choi, Robert L. Yuan’ ın yaptıkları deneysel çalışmada ise cam lifi ve polipropilen lifi katkılı betonlarda lif içeriğinin değişiminin yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiş, bu amaçla cam lifi ve polipropilen lifi katkılı numuneleri oluşturmuştur. Betonda lif kullanımı yapının dayanımını, tokluğunu, eğilme dayanımını, çekme ve çarpma dayanımını iyileştirirken, basınç dayanımı ve elastisite modülüne çok az etki eder ya da hiç etkisi olmaz. Bununla birlikte lif katkılı betonların karakteristik dayanımlarının belirlenmesinde lif tipi, lif içeriği, kür zamanı da önemlidir. Numunelere uygulanan deneyler sonucunda; betona cam ve polipropilen lif ilave edilmesinin yarmada çekme dayanımını %20-50 oranında artırdığı; cam ve polipropilen lif katkılı betonların yarmada çekme dayanımlarının, basınç dayanımlarının %9-13’ ü arasında olduğu sonucuna varmıştır.

Tablo 2.5 ve Tablo 2.6 lif takviyeli betonlarda bu değerlerdeki artışı göstermektedir.

Tablo2.5: Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin tokluk değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması [25].

Kompozit	Hacimsel lif yüzdesi	Görelî tokluk*
BETON		
Çelik	0,5	2,5-4,0
Çelik	1,0	4,0-5,5
Çelik	1,5	10-25
Cam	1,0	1,7-2,0
Polipropilen	0,5	1,5-2,0
Polipropilen	1,0	2,0-3,5
Polipropilen	1,5	3,5-15
HARÇ		
Çelik	1,3	15,0
Asbest	3-10	1,0-1,5
ÇİMENTO HAMURU		
Cam	4,5	2,0-3,0
Mika	2,0-3,0	3,0-3,5

Tablo 2.6: Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin eğilme dayanımı değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması [25].

Kompozit	Hacimsel lif yüzdesi	Görelî tokluk*
BETON		
Çelik	1-2	2,0
Cam	1-2	2,5-3,5
HARÇ		
Çelik	1,3	1,5-1,7
Cam	2	1,4-2,3
Asbest	3-10	2,0-4,0
ÇİMENTO HAMURU		
Cam	4,5	1,7-2,0
Mika	2-4	2-2,5
Polipropilen	1-2	1,0

*Bu değerler sadece örnek değerlerdir ve deney yöntemleri, özel üretimler ve karışımlardaki farklılıklara bağlı olarak değişebilirler.

Günümüzde lifler çok çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Tablo 2.7 çeşitli lif tiplerinin, lif takviyeli kompozitlerde kullanım alanlarını göstermektedir.

Tablo 2.7: Lif takviyeli kompozitlere katılan lifler ve uygulama alanları

Lif Tipi	Uygulamalar
Cam	Prekast paneller, giydirme cephe kaplamaları, kanalizasyon boruları, İnce beton çatılar ve beton blokların sıvasında.
Çelik	Çatı uygulamalarında kullanılan gözenekli betonlar, kaldırımlar, köprü döşemeleri, ateşe dayanıklı elemanlar, beton borular, havalimanları, rüzgara dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, gemi omurgaları.
Polipropilen,naylon	Temel kazığı, öngerilmeli kazıklar, kaplama panelleri, yürüyüş yolları, marinaların iskele elemanları, yol yamaları, büyük çaplı sualtı boruları kaplamaları.
Asbest	Saç, boru levhalar, yangına dayanıklı malzemeler ve yalıtım malzemeleri, kanalizasyon boruları, oluklu ve düz çatı levhaları, duvar kaplamaları.
Karbon	Dalgalı şekilli çatı kaplama elemanları, tek veya çift kat ince membran yapılar, tekne omurgaları, yapı iskelesi tahtaları.
Mika	Çimento esaslı levhalarda kısmen asbestin yerine, beton borular, tamirat malzemeleri.

2.4.1. Taze Betonun İşlenebilirliğine Lif Etkisi

Çelik lifler agrega ile çok zor karışırlar, özellikle yüksek oranda lif içeren düşük işlenebilirliğe sahip betonlarda, lifler birbirine kenetlenerek üniform olmayan bir karışıma neden olurlar. Liflerin demet olmasına ‘topaklanma’ denir. Eğer beton

yüksek işlenebilirliğe sahip ise topaklanma riski daha düşük olur. Yüksek işlenebilirlik genellikle karışıma süperakışkanlaştırıcılar eklenmesiyle elde edilir. Karışımda ince taneli malzeme yüzdesi fazla ise lif dağılımı daha kolay olur. Çimentonun yerine konabilecek uçucu kül ve diğer puzolanlar veya silis dumanı ile ince taneli malzeme oranı artırılabilir. Lifler genellikle karışıma beton veya harç karıştırıldıktan sonra eklenmektedir, fakat genel kabul görmüş, etkili bir çelik lifli beton karıştırma şekli yoktur. Fakat, çelik lifli betonların üretiminde çok aşamalı yöntemler kullanıldığı da bilinmektedir. Bu yöntemlerden biri ilk önce betonun “matris” kısmını karıştırmaya dayanır. Burada amaç 50-100 mm çökme değerine sahip orta kıvamda bir karışım hazırlamaktır. Süperakışkanlaştırıcı eklenir ve beton tekrar karıştırılır. Karıştırma, çökme değerini 130-160 mm. Civarına düşürür. 130 mm’ den 160 mm’ ye kadar olan çökme değerleri genellikle, tamamıyla sıkıştırılabilir ve kolaylıkla yerleştirilebilir iyi kıvamda bir lifli karışımı gösterir. Agreganın içindeki ince tane yüzdesi taze karışımın işlenebilirliğini etkiler.

Modern beton tesisleri, lifleri taze karışım içerisine eleyerek katan veya püskürten özel lif dağıtıcı ekipmanlarla donatılmışlardır. Kullanılan lifin çeşidine göre, bu tesisler yaklaşık %4 çelik lif içeren beton üretebilirler. Normal çelik liflere göre daha rijit ve genellikle daha kısa olan haddelenip çekilmiş lifler ile demetler halinde satılan kancalı liflerin yüksek işlenebilirlikli taze betonlarda üniform bir şekilde sıkıştırılması için özel ekipmanlara gerek yoktur.

Çelik lifler beton karışımlarına püskürtülerek de eklenebilir. Bu şekilde kullanılan lifler genellikle daha kısa, yaklaşık 12 mm uzunluğundadır. Haddelenip çekilmiş lifler gibi sağlam lifler karışıma püskürtme ağızlığıyla dahil edilirler. Lifler önceden suyu ilave edilip karıştırılmış betona katılmasına veya kuru olarak karışıma püskürtme ağızlığında ilave edilmesine göre farklı şekillerde karışıma katılabilirler [17].

2.4.2. Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi

Lif Takviyeli Kompozitlerin performansı; kullanılan liflerin geometrisi, boyu, karışımda kullanılan yüzdesi, narinlik adı verilen boy/çap oranı, hangi maddeden üretildiği ve üretim teknikleri gibi özelliklere bağlıdır. Bu yüzden lif takviyeli kompozitler üretilirken bu özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

2.4.2.1. Lif Geometrisinin Etkisi

Günümüzde artık, geleneksel düz yuvarlak kesitli, çekme liflerden kesilmiş lifler yerine çok çeşitli tiplerde lifler üretilmektedir. Özellikle çelik lifler pek çok değişik şekillerde üretilmektedir. Çelik liflerin farklı geometrilerde üretilmesindeki amaç matris ve lif arasındaki mekanik bağı kuvvetlendirerek liflerin etkinliğini artırmaktır.

Taze beton karışımında liflerin topaklanması ve liflerin varlığından dolayı işlenebilirliğin azalması, özellikle yüksek oranda lif içeren karışımlarda sorun yaratır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir yapıştırıcı ile 10-30 adet lifin birbirine yapıştırılması yoluna gidilmiştir. Böylece işlenebilirlik artar ve liflerin topaklanması önlenir. Bu yöntem sayesinde taze beton karışımının işlenebilirliği çok az düşer. Daha sonra da karıştırma sırasında yapıştırıcının çözülmesi ile her bir lif karışım içinde dağılır [26].

2.4.2.2. Lif Boyunun Etkisi

Kompozitin özelliklerini geliştirmekte lifin şekli kadar boyu da önemlidir. Çimento esaslı kompozitlerde uygulanan, lif yüzdesi sabit tutularak fakat lif boyu uzun seçilerek yapılan deneylerde çekme dayanımında sağlanan artışın fazla olamadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi büyük olasılıkla, mikro çatlak bölgesindeki matris kırılmasının önlenemediği olgusuna dayanmaktadır. Uzun lifler mikro çatlaklar bölgesinden uzakta iseler oluşan mikro çatlakları önleyemezler; ancak mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşürse uzun lifler işlev görmeye başlar ve kompozitin tokluğunu artırır. Buna karşılık kısa lifler mikro çatlaklar arasında köprü görevi görürler; bunlar aynı hacimsel yüzdede kullanıldıkları durumlarda dahi birbirine daha yakın mesafede olacaklardır. Kısa lifler çekme dayanımını çok artırır [27]. Buna karşılık aynı narinlik oranında kısa liflerin sıyrılması, makro çatlaklar oluşmaya başladıktan sonra kolaylaşır ve böylece $\sigma - \epsilon$ eğrisinde maksimum σ değerinden sonraki davranışı süneklik göstermez.

2.4.2.3. Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri

Lif narinlik oranı ve karışıma katılan lif miktarı betonun işlenebilirliğini dolayısıyla da mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı, lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Lif uzunluğunun yuvarlak kesitli lifler için λ (l/d), yuvarlak olmayanlar içinse eşdeğer λ (l/d_e) bölünmesiyle bulunur. Bu oran 40 ila 1000 arasında değişir ama genelde 300' den daha düşüktür [23]. Soroushian ve Bayasi [26] yaptıkları çalışmada karışıma eklenen liflerin narinlik oranlarının büyük olması durumunda taze betonun işlenebilirliğini azalttığını belirtmişlerdir.

Üretimde kullanılan lif içeriği de optimum bir değer üzerine çıkmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımın iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [19].

Lifler teorik olarak betona ne kadar çok katılabilirse kompozitin özelliklerini de o kadar çok artırabilirler, çünkü daha fazla lif çatlakların büyümesine karşı daha fazla direnç demektir. Lifler sayesinde tek çatlağın yayılması yerine düzensiz çoklu çatlaklar oluşur. Bu da kompozitin basınç ve eğilme dayanımı ile tokluğunun artırılmasında etkili olur. Uygulamalarda ise yerleştirme problemlerinden dolayı kompozite hacimce %3' ten daha fazla oranda lif katılmasına pek rastlanmaz, genelde de bu oran %1-2 civarında tutulur. Fakat son yıllarda yeni yöntemlerle bu oranın yükseltilebilmesi mümkün olmuştur. Örneğin ekstrüzyon yöntemi adı verilen yöntemle %7-8 civarında lif katılması mümkünken SIFCON üretiminde bu oran %4 ila 20 arasında mümkün olabilmektedir.

Zollo [23] lifli betonları lif miktarına göre şu şekilde değerlendirmiştir:

%0.1- %1: Düşük lif yüzdeli

%1 - %3 : Normal lif yüzdeli

%3- %12 : Yüksek lif yüzdeli

2.5. Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

2.5.1. Çelik lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Çelik lif takviyeli betonların özellikle enerji yutma kapasiteleri, darbe ve yorulma dirençleri yüksektir. Bu lifler betondaki çatlakların genişlemesini durdurarak, çatlakta köprü oluştururlar ve yükün bir kısmını çatlağa dik doğrultuda iletirler.

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 kendi üzerlerinde taşıdıkları gibi bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar.

Lifsiz betonda başlangıçta gerilmenin artması ile meydana gelen çatlağın yayılması için gerekli enerji düşüktür ve genellikle böyle bir çatlağın başlatılması için gereken enerjinin yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlağın meydana getiren enerji lifler aracılığı ile çatlağın yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgelerine aktarılır. Bu nedenle çatlağın yayılması ve büyümesi için daha fazla enerji gerekir. Böylece bir enerjinin bulunması durumunda bile bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu taşıma, liflerin çimento hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Nihai yüke ulaşıldıktan (beton kırıldıktan) sonra bile, bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler [21].

Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, şekli, hazırlanma metotları, su/bağlayıcı oranı, kullanılan agreganın cinsi ve tane dayanımı ile yakından ilgilidir. Ayrıca, ısıtma işlem uygulamasının da lifli betonun mekanik özelliklerine etkisi büyüktür. Bu tip etkenler deney sonuçlarını büyük ölçüde etkiler ve normal betonun zayıf olan bir çok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Bu iyileştirmeler genel olarak Tablo 2.8’ de görülmektedir.

Tablo 2.8: Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [12].

Betonun Özelliği	Artış (%)
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25- 100
Çekme Dayanımı	25-100
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon-Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	±25

Beton gevrek bir malzeme olduğu için basit bir mukavemet değerleri arasında en yüksek olanı basınç, en düşük olanı çekmedir. Basınç dayanımı betonun tüm pozitif nitelikleriyle paralellik gösterir. Yüksek basınç dayanımlı bir beton doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere dayanır, aşınmaz [28].

Çelik liflerin, betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çelik liflerin basınç dayanımı açısından önemli bir artışa neden olmadığı söylenebilir. Çelik lifler tarafından sağlanan dayanım artışı %25' i nadiren geçer. [16].

Çelik lif takviyeli betonlar için en önemli özellik eğilme altındaki davranışlarıdır. Çünkü çoğu uygulamalarda kompozit çeşitli eğilme yüküne maruz kalır. Lif katılması ile normal betonun eğilme direnci artırılır. Liflerle daha iyi bağ yapan betonlarda eğilme direncinde artış yüksek olur. Bütün durumlarda eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımından daha fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar. Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlendirilerek, daha fazla dayanım artışına neden olurlar. Belli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lif, dayanımı daha çok artırır. Eğilme sertliğini etkileyen başlıca faktörler; lif tipi, lif geometrisi, lif miktarı, matrisin yapısı ve numunenin boyutudur [16].

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan enerji yutma kapasitesi ile orantılıdır. Beton karışımına lif eklenmesinin en önemli faydası, enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırmasıdır.

2.5.2. Polimer Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Polimer liflerden betona katılan ve en iyi sonuç veren lifler polipropilen liflerdir. Tıpkı çelik lifler gibi polipropilen lifler de betonun bazı özelliklerini artırabilirler. Betona katılan polipropilen liflerin betonun yarmada çekme dayanımını artırırken, basınç dayanımı ve elastisite modülüne çok az etki etmektedir. Polipropilen liflerden başka Polietilen ve Naylon 6' da beton karışımlarına katılan diğer polimerik lif çeşitleridir. Fakat, şimdiye kadar yapılmış çalışmaların çoğu araştırmalarda polipropilen lifler kullanılmış ve sonuçları belirtilmiştir.

Yüksek performanslı betonların önemli bir özelliği süperakışkanlaştırıcı kullanarak su/bağlayıcı oranının çok aşağılara düşürülmesidir. Su içeriğinin azalması nedeniyle bu betonlarda terleme çok az olur. İlave bağlayıcı olarak silis dumanı da kullanılmış ise silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanından dolayı serbest suyun önemli bir bölümü bağlanır ve terleme neredeyse hiç görülmez. Beton plastik rötre çatlaklarına karşı çok hassas bir hale gelir. Bu nedenle, yüksek performanslı betonlara çok az miktarda polimer esaslı lifler katılarak plastik rötre önlenirken, mekanik özelliklere fazla bir etki yapılmamış olur. Düşük fiyatından ötürü, bu liflerin kullanımı yabancı ülkelerde hızla artmaktadır. Kurtz ve Balaguru [29] A.B.D.' 1997 yılında tüketilen hazır betonların %10'unun polipropilen lif içerdiğini belirtmişlerdir.

Betona polimerik esaslı liflerin katılmasının bir diğer faydası da; yüksek sıcaklıklarda beton içinde genleşen su buharının dışarı kaçması sonucu betonun yangında daha az hasar görmesinin sağlanmasıdır. Yüksek performanslı betonlarda boşlukların çok küçük, az ve ilişkisiz olması su buharının kaçışını önler, sonuçta betonun dış kabuğu patlar, dökülür. Önlem olarak betona polipropilen lif katılması önerilir. Sıcaklıkta eriyen bu lifler gerekli boşlukları ve kanalcıkları oluşturarak su buharının dışarı kaçmasını sağlarlar [30].

Yüksek performanslı betonların yangına karşı dayanıksız olması, özellikle İngiltere ve Fransa arasında bulunan Manş tüneline 1996 yılında çıkan yangından sonra önem kazanmıştır. Silis dumanı içermeyen klasik karışım yöntemleriyle 80 ila

100 MPa arasında basınç dayanımına sahip beton kullanılarak yapılan bu tünelde yangın sırasında beton yüzeylerinde dökülmeler olmuştur.

Polipropilen, Naylon ve polyester lifleri çok yaygın olarak kullanılan bazı polimer liflerdir. Plastik rötreyi azaltırlar. Lif hacim oranları %0,1 - %0,05 olarak kullanılırlar. Polimer lifli betonların işlenebilmesi, liflerin tipine, uzunluklarına, içeriklerine ve betonun mukavemetine bağlıdır. Naylon ve polyester lifleri tekil halde bulunur. Polipropilen lifler hem lif hamuru hem de tekil halde bulunurlar.

Beton veya sıvada polipropilen lifin en önemli etkisi, dökümden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülme nedeniyle oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Prizin ilk safhasında beton mukavemetinin oluşma hızı, büzülme nedeniyle oluşan iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Bu plastik büzülme esas itibarıyla su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve suyun buharlaşmasının doğal bir sonucudur. Polipropilen lifler, büzülme gerilmelerine karşı direnç meydana getirir ve büzülmeden dolayı oluşacak çatlak tehlikesini en az düzeye indirir. Polipropilen lifler sertleşmiş betonda mukavemet artırıcı bir donatı etkisi yaratmazlar. Etkileri betonun plastik safhasında geçerlidir ve bir tür katkı malzemesi görevi görürler [11].

2.5.3. Cam Lifi Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Cam lifleri veya diğer bir deyişle cam elyafı, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan donatı malzemelerindendir. Cam lifli betonlar, portland çimentosu, ince agrega, alkali dayanımlı cam lifleri ve belirli katkıların belli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen kompozit malzemelerdir. Oluşan kompozit esnek, gerilebilir ve iyi çarpma dayanımına sahip bir malzemedir. Fiziksel özellikleri ve bilhassa ağırlığının önemi göze alınarak sayısız giydirme uygulamalarında ve farklı dizaynlarda kullanılırlar. Üstün özelliklerinin yanı sıra, ekonomik bir donatı türü olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık, temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir.

Cam liflerinin ticari anlamda üretimine 1930' lu yıllarda İngiltere' de başlanmış olmasına karşılık, bu malzeme, plastik malzemenin donatılmasında 1950' lerin başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Cam liflerinin çimento kompozitlerinin donatılmasında kullanımıyla ilgili ilk önemli çalışmaları, Sovyetler Birliği' nde Biryukovich ve arkadaşlarını 1960' lı yılların başlarında yaptıkları

araştırma ve uygulamalar ile 1964 yılında yayımlandıkları bir kitap oluşturmaktadır. Ayrıca, Çin Halk Cumhuriyeti’ nde de 1958 yılından başlayarak, cam liflerinin beton üretiminde, malzemenin donatılmasında kullanılmasıyla ilgili çalışmaların yapıldığı bilinmektedir.

Başlangıçta, cam liflerinin üretiminde A-camı veya açık adıyla “Alkali Cam” kullanılmıştır. Bunu, çok az alkali içeren ve çok üstün elektriksel mekanik özelliklere sahip bir bor silikat camı olan “elektrik dayanımlı cam”ın, kısa adı ile E-camının kullanılmaya başlaması izlemiştir. E-camı, uygulamada en çok kullanılan donatı malzemelerinden biridir. Ancak bu malzeme, beton ve harçlardaki alkali ortamdan etkilenmekte ve zamanla tahrip olmaktadır. Daha sonra “CEM-FİL” diye adlandırılmış olan, alkali etkisine dirençli nitelikteki cam liflerinin üretilmesi, cam lifi donatı alanında bir dönüm noktası olmuş, bundan sonra, beton ve harçların donatılmasında, bu özel cam lifleri kullanılmaya başlamıştır.

Tablo 2.9: Cam elyafı üretilen çeşitli camların bazı özellikleri [8,12]

Özellikler	Cam Türleri						
	E-Camı	A-Camı	C-Camı	R-Camı	D-Camı	M-Camı	S-Camı
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,54	2,45	2,45	2,58	2,16	2,89	2,49
Çekme Dayanımı (MPa)	3600	3100	3400	4400	2450	3500	4500
Kopma Uzama Oranı (%)	4,8	-	4,8	-	-	-	5,4
Çekme E-Modülü (GPa)	76	72	70	85	53	111.3	86
Kırılma İndisi	1,548	1,512	-	-	1,47	1,635	1,523
Isıl Genleşme Katsayısı ($\text{cm/cm}^\circ\text{K}$)	$1,6 \times 10^{-6}$	-	$1,6 \times 10^{-6}$	-	$3,1-6 \times 10^{-6}$	-	$1,7 \times 10^{-6}$
Lif çapı (mm)	$3-20 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-	$3-13 \times 10^{-3}$
Yumuşama Noktası ($^\circ\text{C}$)	850	700	690	990	770	-	-
Dielektrik Sabiti (1 MHz)	6,33	-	-	-	5,8	-	5,34

Yapılan araştırmalar sonucunda, çeşitli matris malzemelerinin değişik amaçlarla donatılmasında kullanılabilecek nitelikte birçok cam lifi türü geliştirilmiştir. Bunlardan S camı, alüminyum ve magnezyum oksit miktarı E-camına göre daha yüksek olan bir türdür ve mekanik özellikleri de diğerlerinden daha

üstündür. Özel uygulamalar için çok yüksek mekanik dayanım özelliğine sahip bir diğer tür, daha çok Amerika Birleşik Devletleri’ nde üretilen S camına benzer nitelikler taşıyan ve Avrupa’ da üretilen R camıdır. R ve S camları, üstün özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılmaktadır. Cam liflerinin yapımında kullanılan ve özellikle cam takviyeli plastikler için, yüzey türünün üretiminde yararlanılan bir diğer tür C camıdır. Bu malzeme, kimyasal dayanımı çok yüksek olan bir cam türüdür.

Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde donatı malzemesi olarak kullanılan başlıca cam türlerinin temel özellikleri, bu alandaki yayınlardan derlenerek, yukarıdaki Tablo 2.9’ da topluca verilmiştir [8,12].

Cam lifi üretiminde kullanılan camın cinsi, işlem sıcaklığı, camın viskozitesi ve çekme hızı gibi etkenler değiştirilerek, farklı çaplarda cam lifleri üretilmektedir. Ticari olarak Avrupa’ da, 2,5 μ m ila 20 μ m arasındaki kalınlıklarda piyasaya sunulan cam lifleri çaplarına göre de sınıflandırılmaktadır. Bu ayırmda, yaklaşık 400 adet liften oluşan bir cam lifleri demetinin 1000 metre uzunluğunun, gram cinsinden ağırlığı “teks” diye adlandırılmakta ve bu değer kullanılmaktadır.

Cam lifleri uygulamada, belirli boylarda lif kırıntıları ve sürekli lifler halinde kullanılmaktadır. Ayrıca bu malzemelerle üretilmiş, cam lifi keçeler ve dokumalar da bulunmaktadır. Çeşitli kompozitlerin üretiminde yararlanılan başlıca cam lifi türlerini, devamlı fitil, kırılmış demet, cam keçe ve cam dokuma olarak dört ana türe ayırmak olasıdır.

Devamlı fitil, bir veya daha çok sayıda cam lifi demetinden oluşmaktadır. Bunlar, bükümsüz olarak sarılmış bobinler halinde bulunur. Bobinlerin boyutları, içerdikleri demet sayısı, kullanılan camın cinsi ve özellikleri değişebilmektedir[8].

Cam lifi kırılmış demet, boyları genellikle 3 mm ila 50 mm arasında değişen cam lifi demetidir. Kullanılan yere ve gereksinime göre daha değişik boyutlarda da üretilebilir. Bunlardan, boyları 0,2 milimetreye kadar olan çok kısa boyda olanlar, uzun, kesiksiz cam liflerinin öğütülmesi ile elde edilirler. Cam lif kırılmış demetler, kompozitlerin üretiminde donatı ve dolgu malzemesi olarak, laminantların yüzeylerinde dayanımı arttırmak için kullanılırlar. Ayrıca, beton ve harçlarda da gelişigüzel dağılmış donatı olarak da bunlardan yararlanılmaktadır.

Keçeler, özellikle cam takviyeli plastiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Cam keçe, sürekli demetten veya fitilden kırılmış, belirli boylarda, genellikle 50 mm’lik cam liflerinin, birbirlerinin üzerine gelişigüzel bir dağılımla eklenmesi şeklinde

üretilmektedir. Üretilen cam lifi keçelerin ağırlığı 225 gr/cm^2 ila 600 gr/cm^2 arasındadır.

Cam dokuma ürünler, cam fitillerden ve cam bükülmüş ipliklerden üretilmektedirler. Kullanılan fitiller, bir bağlayıcı kullanılarak dokumaya uygun hale getirilirler. Cam bükülmüş iplikler, bir bağlayıcı uygulanarak, bobine sarılmadan önce bükülmüş, kesiksiz liflerden yapılmaktadır. Genellikle cam lifi dokumada E-camı kullanılmakta, kimyasal dayanımın arttırılması amacıyla da C-camı liflerinden yararlanılmaktadır [8].

2.6. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Liflerle donatılı kompozitleri, genel bir değerlendirmeye, iki fazlı kompozit malzeme olarak kabul edebiliriz. Aslında bu tür kompozitlerin birçoğu, ikiden çok malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Örneğin, çelik tellerle donatılı beton, çimento, su, agrega ve çelik teller kullanılarak üretilir. Üretimde, gereksinime göre çeşitli katkı maddeleri, farklı agrega türleri kullanılabilir. Bu açıdan bakılacak olursa, kompozit, çimento hamuru ve agregadan oluşan ‘‘taneli kompozit malzeme’’ niteliğindeki bir matris ve çelik tel donatı fazından oluşmaktadır. Dolayısıyla kompozitin özellikleri, gerçekte sürekli fazı oluşturan çimento hamuru, taneli malzeme ve lifli malzemenin özellik ve miktarına bağlı olarak etkilenmektedir. Bu yapı, aynı bakış açısıyla daha da ayrıntılı olarak ele alınabilir. Ancak, gerek kompozitin özelliklerini ifade edebilecek basitleştirilmiş modellerin kurulabilmesi, gerekse gerçekte bir bütün olarak matris özelliklerinin tanınması nedeniyle malzeme iki fazlı olarak ele alınmaktadır.

2.6.1. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Matris Olarak Kullanılan Malzemeler

Liflerle donatılı kompozitlerde matris, lifleri sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan sürekli fazı oluşturmaktadır. Matris malzemesi, bu işlevlerin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak, taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek, kompozitin tokluğunu arttırmaktadır. Ancak, yük taşımaya

ikinci malzeme olarak katılma durumu basınç halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük ölçüde matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır.

Liflerle donatılı kompozitlerde matris malzemesi olarak metaller ve polimerler ile harç ve beton gibi seramik malzeme kullanılmaktadır.

Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir matris malzemesi grubunu da inorganik bağlayıcılarla hazırlanan harçlar ve betonlar oluşturmaktadır. Bu tür matris malzemesinin üretiminde kullanılan bağlayıcılar, genelde çimento ve alçı olup, bu kompozitlerin kullanımı özellikle inşaat alanında yaygındır. Ayrıca yine bu alanda, doğrudan çimento ve alçı hamurlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı da görülmektedir.

Alçı ve çimento hamurlarında, harçlarında ve betonlarında donatı olarak en çok kullanılan malzemeler çelik teller, cam lifi, polipropilen gibi polimer elyaf ve asbest lifleridir. Bu matris malzemeleriyle birlikte, genellikle süreksiz donatı oluşturan belirli boyda lifler kullanılmakta ve bunlar kompozit içinde gelişigüzel dağılı olacak şekilde katılmalıdır. Liflerle donatılı harç ve betonların üretiminde genelde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar ön karıştırma, püskürtme ve fitil veya örgü elyaf kullanma yöntemleridir. Ön karışım yapılması halinde, kompozit içinde lifler serbest ve üç boyutta olmak üzere gelişigüzel dağılmaktadır. Püskürtme yönteminde ise, matrise püskürtülen lifler, kesitte düzlemde dağılı olarak yer almaktadır. Fitil veya örgü lif kullanılması halinde ise, donatı bir yönde ve sürekli olmaktadır.

2.6.2. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Donatı Malzemesi

Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde değişik kaynaklardan elde edilen, farklı özelliklere sahip lifler kullanılmaktadır. Ayrıca, kullanılan lifler değişik boylarda ve biçimde olabilmektedir. Genellikle yapılan tanımlarda lif malzemesinin çapı ve boy/çap oranı belirleyici bir kriter olarak kabul edilmektedir ve bu değer ‘lif narinlik oranı’ diye adlandırılmaktadır. Ancak yine de lifin belirli bir boyuttan küçük olması gerektiğinden, lif çapı da sınırlayıcı bir değerdir.

İlgili Amerikan Standardı ASTM uyarınca, bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/ortalama çap oranının en az on ($L/d \geq 10$) olması, lifin en büyük genişliğinin $0,25 \text{ mm}$ ’ den ve en büyük kesit alanının da $0,05 \text{ mm}^2$ ’ den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. Amerikan Beton Enstitüsü’nün (ACI)

‘Liflerle Donatılı Beton’ konusunda çalışan 544. sayılı Komitesine göre, bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre “lif narinlik oranı” dır. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan “eşdeğer lif çapı” na bölünmesiyle bulunan bu oranın, beton malzemedde, boyları 0.60 ile 7.62 cm (1/4"-3") arasında değişen lifler için tipik değerleri 30 ile 150 arasında verilmektedir.

Günümüzde kompozitlerin donatılmasında boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı lifler kullanılmaktadır. Örneğin, cam lifleri gibi lifler üretim sırasında demetler halinde hazırlanmaktadır. Bu durumda lif narinlik oranı tek başına yeterli bir tanım olmamaktadır.

Kompozitlerin donatılmasında kullanılan lifler, E-Modülü değerleri, kullanılan matris malzemesinin E-Modülü ile kıyaslanarak, matristen daha düşük ve daha yüksek E-Modülü değerine sahip lifler olmak üzere, iki ana grupta toplanabilir. Ancak, kompozitin özellikleri için de önemli olan bu ayrım, sabit matris özelliği için, diğer bir deyişle matris malzemesi için anlam taşımaktadır.

Liflerle donatılı kompozitlerde kullanılan donatı malzemesini, boyutlarına bağlı olarak, “tel”, “lif” ve “kır” şeklinde üç grupta toplamak mümkündür.

Teller, milimetrik boyutta metal malzemelerdir. Çapları diğer donatı malzemelerine kıyasla daha büyük olup, genellikle beton ve harçların donatılmasında kullanılırlar. Süreksiz donatıda kullanılanların boyları, büyük çoğunlukla 6-7 cm’ nin altında olup, narinlik oranı ($L/d < 10^4$). Lifler değişik kaynaklardan elde edilmekte ve değişik özellikleriyle büyük bir çeşitlilik göstermektedirler.

Kıllar, donatıda kullanılan en ince malzemelerdir. Bunlar, buhar yoğunlaşmasıyla büyütülen değişik şekillerdeki tek kristaller olup, çapları birkaç mikron, boyları birkaç milimetre kadardır. Buharda büyütülmüş olan bu kristallerin (kıl, whisker) genelde yapısal hataları olmamaktadır. Dolayısıyla, dislokasyon içermeyen bu cisimlerin dayanımı, normal boyutlardakilere oranla yaklaşık olarak bin katı kadar daha fazla olabilmektedir. Örneğin; Al_2O_3 kılların dayanımı 7000 MPa’ dan daha fazla olabilmektedir. Bu nedenle, örneğin sünek metal matrise Al_2O_3 kıllarının katılmasıyla metal fazlar arasındaki özelliklerin farkına bağlı olarak, kompozit önemli ölçüde mukavemet kazanabilmekte ve yüksek sıcaklıklardan daha az etkilenmektedir.

Üstün özelliklerine karşın, yapım yöntemi nedeniyle kıllarla donatılı kompozitlerin üretimi son derece sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, kılların sahip oldukları

yüksek çekme dayanımı, sadece elastik bölgededir. Plastik deformasyonun başlamasıyla birlikte, kıllarda dislokasyonlar oluşmakta ve dayanım düşmektedir.

2.6.3. Taneli Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Katkı Maddeleri

Taneli kompozit malzemelerin özellikleri, üretimde kullanılan matris malzemesi ve dağılı fazın özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, bazı özel durumlarda, kompozitin daha farklı özelliklere sahip olması istenebilir. Örneğin alçı bağlayıcı ve sünger taşı hafif agregalı kompozitlerin üretiminde, karışımın katılaşması için geçen süre, alçı bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Alçının bilinen kısa sürede katılaşma özelliği, bazı uygulamaları olanaksız kılabilmektedir. Bu süreyi uzatabilmek için karışıma priz geciktirici katkı maddesi katılmakta ve uygulama açısından zaman kazanılabilmektedir.

Beton üretiminde kullanılan başlıca katkı maddeleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir [5]:

- Taze betonun reolojik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri,
- Priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri,
- Betonun hava içeriğini değiştiren katkı maddeleri,
- Betonların fiziksel ve mekanik niteliklerini arttıran katkı maddeleri,
- Betonların kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri.

Beton katkı maddeleri sıvı veya toz halinde bulunmaktadır. Karışıma çok az miktarda katıldıkları için, toplam hacim içinde kaplayacakları hacim ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu maddeler genellikle çimento ağırlığının belirli bir yüzdesi olarak karışımlara eklenir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmadan önce, kullanılacağı çimento türüyle uygunluğu araştırılır. Ayrıca, özellikle betonarme betonlarında kullanılacak katkı maddelerinin, çelik donatıya zararlı olmayacak türden seçilmesi zorunludur.

Öte yandan, beton üretiminde taze karışımların çeşitli özelliklerini etkilemek ve kontrol edebilmek amacıyla katılan katkı maddelerinin, genellikle betonun nihai özellikleri üzerinde yan tesirleri de olabilmektedir. Bu nedenle, kullanılacak katkı maddesinin seçiminde bu konuya da dikkat edilerek, gerekli durumlarda önlem alınmalıdır.

2.6.4. Genel Donatı Türleri

Liflerle donatılı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadırlar. Bilindiği gibi, her malzeme çeşitli olumlu ve olumsuz özelliklere bir arada sahiptir. Tasarımcı ve üretici, amaca uygun olan malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir. Giriş bölümünde de değinildiği gibi, kompozit malzeme üretimi mevcut temel malzemelerin olumsuz yanlarının iyileştirilmesi ve böylelikle kullanım alanının genişletilmesi, çok yönlü kullanıma olanak sağlanması yönünde önemli bir adımı oluşturmaktadır.

Değişik malzemelerin liflerle donatılarak, çeşitli özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmaların teorik yönüyle ele alınışının epeyce yeni olmasına karşın, ilk uygulamaların çok eskilere dayandığı bilinmektedir. Kerpiç malzemenin bitkisel elyaf ve samanla karıştırılarak yapılması, alçı hamurunda yine bitkisel lifler ile at kuyruğu ve yelesi gibi hayvansal liflerin, kılların kullanılması, asbest lifleri gibi inorganik malzeme kullanılarak çimento bağlayıcılı malzemelerin donatılması herkesçe bilinen örneklerden bir kaçıdır.

Bu bölümde, malzemenin donatılmasında kullanılan malzemenin tümü ‘lif’ adıyla anılmaktadır. Konunun genel olarak ele alındığı yerlerde bu ifadenin kullanılmasına karşın, ayrıntıya inildiğinde, lifler malzeme türüne ve üretildiği hammaddeye göre de isimlendirilmektedir. Dolayısıyla, lif şeklindeki genel isimlendirme, bir boyutu diğer boyutlarına göre çok büyük olan her türlü ince malzemeyi kapsamaktadır.

Malzemenin liflerle donatılması, öncelikle mekanik dayanımları daha iyi olan kompozit malzeme üretmeye yöneliktir. Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla lifler, telleri çubuklar veya değişik yapıda örgü malzemeyle donatılmaktadır.

Liflerle donatılı kompozit malzeme de, en basit haliyle iki fazlı bir kompozit olarak ele alınabilir. Kompozitin sürekli fazını, lifleri bir arada tutan ve kompozit içindeki hacim oranının yüksekliği nedeniyle, kompozitin ana bileşeni olarak da düşünebileceğimiz matris malzemesi oluşturmaktadır. Bu matris içinde, donatı olarak kullanılan malzeme ikinci bir fazdır. Donatının etkinliği, donatı malzemesinin E-Modülünün, matrisin E-Modülünden çok daha yüksek olmasına bağlıdır. Matrisin ve lif fazının E-Modülü değerlerinin birbirine yakın olması halinde, lif fazı taşımaya

yeterince katılmamakta ve dolayısıyla kompozit amaçlanan özelliklere sahip olmamaktadır.

Liflerle donatılı kompozitlerde, lifin taşımaya katılabilmesi için matris üzerindeki mekanik etkinin, life iletilmesi gerekir. Burada lifle matris arasında herhangi bir kimyasal bağ yoktur ve iletim kayma kuvvetiyle olacaktır. Dolayısıyla lifle matris arasında, meydana gelebilecek kayma gerilmelerine dayanabilecek düzeyde bir aderansın bulunması gerekmektedir. Ayrıca, fazlar arasında kimyasal etkileşimin olmaması ve yine fazların ısı genişmesi değerlerinin kompozitin yapısını bozacak düzeyde farklılık taşımaması da öngörülmektedir.

Liflerle donatılı kompozitlerde özellikle çekme, eğilme, çarpma dayanımlarında önemli artışlar olmaktadır. Dolayısıyla, bu tip kompozit malzemede sözü edilen çekme, eğilme gibi gerilmelerin birim ağırlığa oranı da diğer malzemelere göre çok daha yüksektir. Buna bağlı olarak daha başka özelliklerde de iyileşmeler görülmektedir. Bu konuda bir örnek olmak üzere, liflerle donatılı betonların özelliklerinde görülen değişimler, CIGB (Commission International Des Grands Barrages) tarafından 1988 yılında yayımlanmış olan 40a sayılı bültenden alınarak, Tablo 2.10' de verilmektedir.

Tablo 2.10: Liflerle donatılı betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [CIGB, Bülten:40a, 1988]

Özellik	Liflerle Donatılı Beton
Tokluk	%100-1200
Çarpma dayanımı	%100-1200
İlk çatlak dayanımı	%25-100
Eğilme çekme dayanımı	%25-200
Çekme dayanımı	%25-150
Yorulma dayanımı	%50-100
Şekil değiştirme oranı	%50-300
Basınç dayanımı	%25-25
Kavitasyon erozyon direnci	%200-300
Elastisite modülü	%25-25
Sehim	%20-500

Liflerle donatılı kompozitler, fazların hacim oranları ve dağılımı açısından taneli kompozitlerden önemli farklılıklar gösterirler. Taneli kompozitlerde sürekli fazı oluşturan matris içerisinde parçalı malzeme dağılı faz olarak yer alır ve genellikle kompozitin yapısı içerisinde bu dağılı faz önemli yer tutar. Örneğin, çok önemli bir taneli kompozit olan betonda, tüm hacmin yaklaşık %75 kadarını agrega fazı oluşturur. Özellikle, yapı açısından bu bölümde ayrıntılı olarak üzerinde duracağımız beton ve harçlarda, donatı malzemesinin oranı çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Ancak, reçine bağlayıcılı lifli kompozitlerde, bağlanan fazın oranı yine yükselmektedir.

Taneli kompozitlere göre bir diğer fark, bağlanan fazın matris içindeki boyutu ve konumuyla ilgilidir. Taneli malzemede dağılı faz, üç boyutu birbirine yakın parçalar şeklindedir. Boyutları, çeşitli nedenlerle üstten sınırlanmaktadır. Örneğin, genelde binalarda betonarmede kullanılan en büyük tane 31.5 mm' lik elekten geçen gruptur. Buna karşılık, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan liflerin boyları çok farklı olabilmektedir. Kompozitte, belirli boyda lifler kullanılabildiği gibi, gereksinime ve koşullara bağlı olarak donatım, kompoziti tümüyle kat eden sürekli liflerle de yapılabilir. Dolayısıyla lif boyu çok farklı olabilmektedir.

Tel, lif, kıl ve benzeri, bir boyutu diğer boyutlarına oranla çok fazla olan malzemenin hacim içindeki konumu, liflerle donatılı kompozitlere has bir özellik olan ‘‘lif yönü’’ ile ilgili bir diğer kriteri oluşturmaktadır. Lif yönü, kompozitin dayanımı ve liflerin taşımaya katkısı açısından önemli bir faktördür, dolayısıyla yönlenmiş lif donatılı kompozitler, değişik yönlerden farklı özellikler gösterirler. Liflerin matris içinde rasgele, gelişigüzel dağılı olması halinde, malzeme izotrop kabul edilir. Bu durumda kompozitin özellikleri yöne bağlı olarak değişmez.

Liflerle donatılı kompozit malzeme, matrisin ve lif fazının özelliklerine bağlı olarak

- Sünek matrisli kırılğan lifli kompozitler,
- Kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitler

Şeklinde iki ana başlık altında ele alınır.

Sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlerde, malzemenin matris fazını epoksi, polyester, fenolik reçine, melamin reçinesi gibi organik maddeler oluşturur. Bu kompozitlerde, matris malzemesine oranla daha kırılğan özellikler taşıyan cam ve seramik esaslı lifler, asbest lifleri, yüksek dayanımlı çelik teller kullanılır. Donatıda kullanılan lifin hacim oranı diğer gruba göre daha yüksek olup, %20-80 arasında değişmektedir. Bu tip sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlere örnek olarak, ülkemizde de yaygın üretimi ve çok yönlü kullanımı olan cam lifi donatılı polyester reçinesi gösterilebilir. Bu malzeme dilimizde uzun yıllar, kısmen de hatalı biçimde, sadece donatıyı belirterek ‘‘Fiberglass’’ adıyla anılmıştır. Günümüzde ‘‘Cam Takviyeli Plastik (CTP)’’ adı yaygınlaşmıştır.

Çimento, alçı gibi inorganik bağlayıcılar kullanılarak üretilen kompozitler, genel olarak kırılğan matrisli ve sünek lifli sistemleri oluşturmaktadırlar. Bu tür kompozitlerde çeşitli organik veya inorganik esaslı lifler kullanılmakla birlikte, özellikle metal ve cam liflerinin kullanımı yaygındır. Kırılğan matrisli bu kompozitlerde, kullanılan donatının hacim oranı, önce de belirttiğimiz gibi, sünek matrisli kompozitlerdeki lif oranlarının çok altında kalmaktadır. Bazı özel uygulamalar dışında, cam, metal ve bitkisel esaslı lifler için bu oran %0,5-5,0 arasında değişmektedir.

2.7. Liflerle Donatılı Kompozitlerde Gerilme ve Şekil Değişirme

Liflerle donatılı kompozitleri, matris ve lif fazının özelliklerine bağlı olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Kompozitin kuvvet etkisinde kalmasıyla ortaya çıkan gerilme ve şekil değiştirme davranışına bağlı olarak ve lifle matris arasında bu yönden bir karşılaştırma yapılarak, bu iki grup şöyle tanımlanabilir:

- Sünek matris ve kırılğan lifli sistemler,
- Kırılğan matris ve sünek lifli matrisler.

Sünek matrisli kompozitlerin matris fazını epoksi, polyester, fenolik reçine veya melamin reçinesi gibi organik, polimer esaslı matris malzemeleri oluşturmaktadır. Bu sistemlerde cam ve seramik esaslı lifler, asbest, yüksek mukavemetli metal teller donatı elemanı olarak kullanılmaktadır. Yapısında hacimce %20 ile %80 arasında değişen oranlarda donatı malzemesi bulunduran bu kompozitlere örnek olarak, ülkemizde de çok yaygın olarak kullanılan cam lifleri ile donatılı polyester reçinesini verebiliriz.

İnorganik bağlayıcılar kullanılarak üretilen kompozitler, genel olarak kırılğan matrisli ve sünek lifli sistemleri oluştururlar. Bu tür kompozitlerde çeşitli organik veya inorganik esaslı lifler kullanılmakla birlikte, özellikle metal ve cam liflerinin kullanımı yaygındır. Çimento bağlayıcılı beton ve harçların örnek olarak verilebileceği kırılğan matrisli bu kompozitlerde, kullanılan donatının hacim oranı, daha önce de belirttiğimiz gibi, sünek matrisli kompozitlerdeki lif oranlarının çok altında kalmaktadır. Bazı özel uygulamalar dışında, cam, metal ve bitkisel esaslı lifler için bu oran %0,5-5,0 arasında değişmektedir.

2.8. Liflerle Donatılı Kompozitlerde Eğilme Dayanımı ve Gerilme Şekil Değişirme Davranışı

Çelik tellerle donatılı betonlarda, çelik tel donatının etkisi, eğilme halinde belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Diğer özelliklerde de görüldüğü gibi, çelik telin türü, biçimi, narinlik oranı ve hacim oranı gibi life has nitelik ve nicelikle ilgili unsurlar, bu durumda da belirleyici rol oynarlar. Ayrıca, eğilme halinde örneğin boyutları, kuvvetin etkileme biçimi ve deney koşulları da etkili olmaktadır. Eğilme dayanımı, çelik tellerle donatılı betonların önemli bir özelliğini oluşturmaktadır.

Eğilme halinde, normal betonda görülen ani kırılma yerine, malzeme çatladıktan sonra da bir miktar yük taşımaktadır. Eğilme halinde, iki farklı gerilmeyle karşılaşmaktadır. Konunun teorik olarak ele alındığı bölümde de belirtildiği gibi, bunlar ilk çatlak gerilmesi ve maksimum gerilmedir. İlk çatlak gerilmesi; yük-sehim eğrisi üzerinde ilk kez doğrusal yoldan sapıldığı anda numunede oluşan çatlak olarak tanımlanmaktadır. Bunun aşılmasıyla, eğilmede taşınabilen en yüksek gerilme düzeyinde malzeme göçmektedir.

Çelik tellerle donatılı betonların eğilme dayanımı deney yöntemi için TS 10515 [32] geçerlidir. Buna göre, çelik tellerle donatılı beton numuneler, açıklığın 1/3 noktalarında yüklenmekte ve elde edilen yük-sehim eğrisi altında kalan alanlar aracılığıyla, eğilme dayanımı değerlendirilmektedir. Standarttaki anlatımıyla, yük-sehim eğrisi altındaki alanla ifade edilerek belirlenen mukavemet, özel deney numunesinin enerji emme kapasitesinin bir göstergesidir ve sonuç olarak bunun miktarı, doğrudan doğruya deney numunesinin ve yükleme sisteminin karakteristiğine bağlıdır.

Kompozitin yük-sehim eğrisi üzerinde ilk çatlağın meydana geldiği sehim değeri, “ilk çatlak sehim” diye adlandırılır. TS 10515’ te “elastik şekil değiştirme, yük-sehim eğrisi altında belirtilen sehime kadar olan alana eşdeğer enerjidir” şeklinde tanımlanmaktadır. Çelik tellerle donatılı betonlarda elastik şekil değiştirme indeksler yardımıyla değerlendirilmektedir. Yine aynı standartta “elastik şekil değiştirme indeksleri, belirtilen sehime kadar olan eğri altında kalan alanın, ilk çatlağa kadar olan alana bölünmesi ile elde edilen sayılardır” şeklinde açıklanmaktadır. Burada, I_5 , I_{10} ve I_{20} olmak üzere üç indeks yer almaktadır. İndeksler I_5 , I_{10} ve I_{20} sırasıyla, ilk çatlak sehiminin 3, 5.5 ve 10.5 katı sehime kadar eğri altındaki alanı, ilk çatlağa kadar olan eğri altındaki alana bölerek elde edilen sayı olarak tanımlanmaktadır.

“Elastik şekil değiştirme indeksleri, I_5 , I_{10} ve I_{20} fiili performansın, kolayca anlaşılabilir performans referans düzeyiyle karşılaştırılmasını sağlamaktadır. I_5 , I_{10} ve I_{20} ‘ye ait olan, 5, 10 ve 20 değerleri, birinci çatlağa kadar lineer elastik malzeme hareketine, daha sonra mükemmel plastik davranışına karşılık gelmektedir. Yüksek ölçüde süneklik gerektiren uygulamalar için bu davranış önerilir ve sadece tel tipinin, tel miktarının [kg/m^3] ve beton basınç mukavemetinin özenle seçilmesi yoluyla bu plastik davranışa ulaşılabilir.”

Çelik tellerle donatılı betonlarda elastik şekil değiştirme indekslerinin değerleri ise Tablo 3.2’ de ilgili standartlardan aktarılarak verilmektedir.

Tablo 2.11: Çelik tellerle donatılı betonlarda elastik şekil değiştirme indeksleri değerleri

İndeks	İlk çatlak sehiminin (δ_0) katı	Yalın Beton	Elastik-plastik malzeme	ÇTDB
I_5	3	1,0	5,0	1-6
I_{10}	5,5	1,0	10,0	1-12
I_{20}	10,5	1,0	20,0	1-25

2.9 Lif Takviyeli Kompozitlerin Kullanım Yerleri

Liflerle donatılı kompozitlerin önemli kullanım alanlarından biri prekast yapı elemanları üretimidir. Prekast beton elemanların üretiminde başta çelik tellerle donatılı betonlar olmak üzere, cam lifleri ve polipropilen lifleriyle donatılı betonlar da kullanılmaktadır. Bu malzemelerin dışında bazı özel uygulamalara da rastlanmaktadır.

Liflerle donatılı betonların kullanılması, prekast elemanların üretiminde işgücünden tasarrufu ve dolayısıyla üretim artışını beraberinde getirmektedir. Bu daha kısa sürede, alışlagelmiş yöntemlere göre daha üstün kalitede ürün alınmasını da sağlamaktadır. Prekast elemanların üretilmesinde liflerle donatılı betonların kullanılması, ürünün kalıptan nispeten daha hasarsız çıkarılabilmesini sağlamakta, taşıma ve birleştirme aşamalarında ürünlerde parça kopması ve çatlamaları önemli ölçüde azaltmaktadır.

Liflerle donatılı beton prekast elemanlar, korozif ortamlarda daha iyi dayanım göstermekte, darbe etkisine, ısı genleşmelerine bağlı gerilmelere karşı daha dirençli olmaktadır. Ancak, liflerle donatılı tüm betonlarda olduğu gibi, karışıma liflerin katılmasıyla başta çarpma dayanımı ve onu izleyerek eğilme dayanımında görülen

iyileşme, doğrudan çekme dayanımında aynı oranlarda görülmektedir. Bu nedenle, doğrudan çekme etkisinin önem taşıdığı, örneğin basınçlı borular gibi elemanların üretiminde çelik çubuk donatının da kullanılması önerilmektedir.

Yapı alanında liflerle donatılı betonla, birçok prekast eleman üretilmektedir. Bu şekilde üretilmiş olan ve çok farklı alanlarda kullanılan ürünlere örnek olarak, çelik tellerle donatılı beton kullanılarak üretilen monoblok hücreler, iç bölme elemanları, prekast istinat duvarı elemanları, sandviç cephe elemanları, yük taşımayan duvar elemanları, giriş ve lentolar verilebilir. Polipropilen ve cam lifleriyle donatılı betonlarla da yukarıda belirtilen türden elemanlar üretilmektedir. Bunların dışında, cam lifli betonlar duvar panelleri, kolon kaplama, mimari süslemeler, harpuşta, vazo, fıskiye, kanalet, büz, beton duba, istinat duvarı elemanları, çeşitli kent mobilyaları gibi genel kullanıma yönelik ürünler de bu alanda örnekleri oluştururlar.

Cam lifli betonların iyi işlenebilme özelliğinden dolayı, özellikle önemli oranda tarihi restorasyon çalışmalarında kullanılırlar. Avrupa’ da farklı kullanım alanları da yaygındır: sandwich paneller, otobüs durakları, ses bariyerleri, geçici ve kalıcı kalıplar, yangın kapıları, bölme duvarları, kanallar, su depoları, oluk, kapı ve pencere çerçevesi gibi farklı kullanım alanları vardır.

Cam lifi takviyeli betonların doğal hafifliği ve üretim kolaylığı, yaratıcı kullanımlara, tasarım özgürlüğüne, değişikliğine ve yeniliğine olanak sağlar [1].

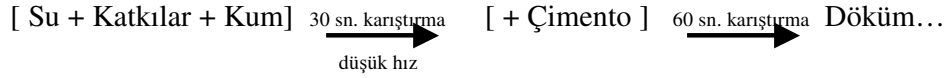
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, yapılmış sertleşmiş beton deneyleri, deneylerin yapılışı ve deneylerden elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1.Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1. Beton Karışımı

Bu çalışmada, yüksek dayanıma sahip beton üretmek için beyaz renkli uygun çimento kullanıldı. Bu çimento, Portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır.



Şekil 3.1: Döküm akış diyagramı

Tablo 3.1: Harç karışım tablosu

Malzeme	Özelik
17 Litre Su	
0,5 kg. Forton	Kür sırasında ani su kayıplarını, bunun sonucu oluşabilecek çatlakları engelleyen kimyasal kür.
0,5 kg. Melment	Erken yüksek mukavemetli beton için süper akışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi.
50 kg. Kum	
50 kg. Çimento	PBÇ 32,5

Alkaliye dayanıklı fiberin özellikleri:

- Yoğunluğu: 2,72 gr/cm³
- Lif çapı: min 10 µ (3µ' dan küçük çaplılar havada asılı kalabilir ve solunumla ilgili insan sağlığı açısından sakıncalıdır.)
- 200 Adet/iplik
- 2500±250 gr./1000m.
- Tutuşkan değil, alev almaz.

Tablo3.2: Fiber içeriği

SiO ₂	%55-75
ZrO ₂	%15-20
Na ₂ O, K ₂ O	%11-21
CaO, MgO	%0-6
B ₂ O ₃	%0-2
Al ₂ O ₃	%0-5
TiO ₂	%0-3

3.1.2. Cam Lifleri

Cam lifi takviyeli betonlar, alkaliye dayanıklı özel cam elyafı ile güçlendirilmiş, çimento - kum karışımı bir betondur. Yüksek çimento oranı, düşük geçirgenlik cam lifli betonları dış etkenlere karşı kaliteli bir brüt betondan daha dayanıklı kılmaktadır. Üretim tekniğinde kalıp kullanılması nedeniyle istenilen form ve yüzey dokusunu sağlaması ile büyük bir tasarım özgürlüğüne sahiptir

Cam lifleri betona iki farklı yöntem ile karıştırılır. Bu yöntemlerden biri olan handspray yönteminde 20 mm. boyundaki lifler karışıma püskürtme yöntemi ile katılır. Handspray' de ise 12 mm. boyundaki lifler beton karışımına ilave edilir ve üretilen betonlar nem oranı yüksek kür odasında 7 gün bekletilir. Tablo 3.3' te üretimde kullanılan cam elyafının fiziksel özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.3: Cam elyaf takviyeli betonların fiziksel özellikleri

Cam elyaf takviyeli betonun fiziksel özellikleri				
Özellik	Simge	Birim	PREMIX	SPRAY
Basınç Mukavemeti	fc	N/mm ²	40-60	60-80
Çekme Mukavemeti	fct	N/mm ²		5-10
Orantılık Oranı	LOP	N/mm ²	5-7	6-10
Kırılma Modülü	MOR	N/mm ²	8-12	15-25
Genleşme Sınırı	eu	‰	0,5-4	
Darbe Mukavemeti	-	KJ/m ²	10-15	10-25
Elastisite Modülü	E	kN/mm ²	10-20	10-20
Yoğunluk	γ	kg/dm ³	1,9-2,0	1,9-2,1
Isıl Genleşme Katsayısı	αT	/C	(1,0-1,5) x 10 ⁵	(1,0-1,5) x 10 ⁻⁵
Isıl İletkenlik	λ	W/mk	0,8-1,2	0,8-1,2
Yangına Dayanıklılık (DIN 4102)	-	-	A1-A2	A1-A2
Rötre Değeri	εc s	mm/m		1,0-2,0
Şişme Değeri	K	mm/m	0,5-1,0	
Su Absorbsiyonu	-	‰	3-15	
Su Buharı Difüzyonu	μ	-	50-200	

3.1.3. Süperakışkanlaştırıcı

Cam lifli takviyeli numunelerin üretiminde, beton için gerekli su miktarını yüksek oranda azaltıp, akışkanlığı sağlayan, düşük sıcaklıklarda bile erken yüksek mukavemetli beton elde edilmesinde kullanılan, klor içermeyen, melamin esaslı, “Melment” isimli süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

3.2. Beton Üretimi

3.2.1. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, cam lifi içeriği ve su/çimento oranı değiştirilerek 8 farklı Cam Lifi Takviyeli Beton (Glass Fiber Reinforced Concrete – GFRC), diğer bir deyişle fibrobeton karışımı üretildi. Numune kodlarının belirlenirken kullanılan liflerin oranları ve su/çimento oranı esas alındı. Bu şekilde üretilen betonlara lifsiz beton için “ FİBRO%0 ” kodu, %2 cam lifi içeren numunelere “ FİBRO%2 ” , %4 cam lifi içeren numunelere “ FİBRO%4” , %6 cam lifi içeren numunelere ise “ FİBRO%6” kodu verildi. Değişen su/çimento oranına göre ise; %34 su/çimento oranı için A, %36 su/çimento oranı için B kodları verildi. Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

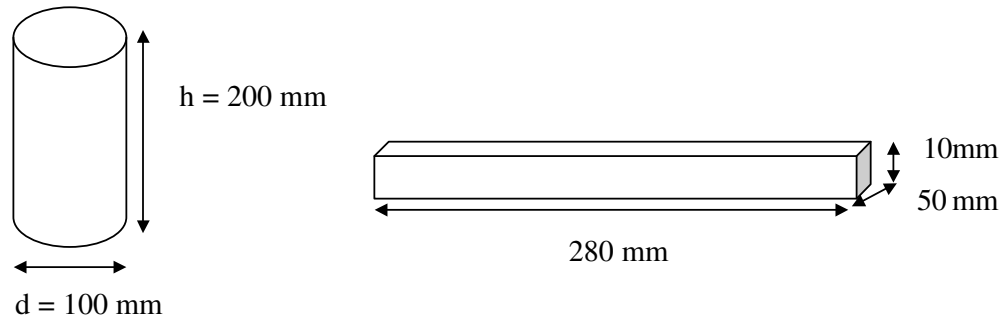
Tablo 3.4: Numune kodları ve Lif Yüzdesi

Numune Kodu	Lif Yüzdesi (%V _f)	Su/Çimento oranı (w/c)
FİBRO%0A	0	0,34
FİBRO%2A	2	0,34
FİBRO%4A	4	0,34
FİBRO%6A	6	0,34
FİBRO%0B	0	0,36
FİBRO%2B	2	0,36
FİBRO%4B	4	0,36
FİBRO%6B	6	0,36

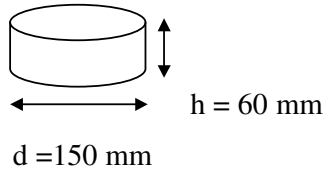
3.2.2. Numune Boyutları ve Şekilleri

Her bir beton karışımından; 3 adet disk, 6 adet silindir ve 5 adet kiriş numuneleri üretildi. Numune boyutları ve şekilleri Şekil 3.2 de verilmektedir.

SİLİNDİR ($d = 100 \text{ mm}$, $h = 200 \text{ mm}$) KİRİŞ ($10*50*280 \text{ mm}$)



DİSK ($d = 150 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$)



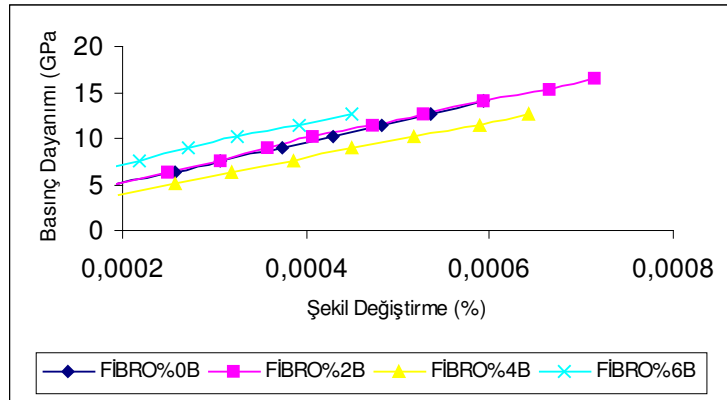
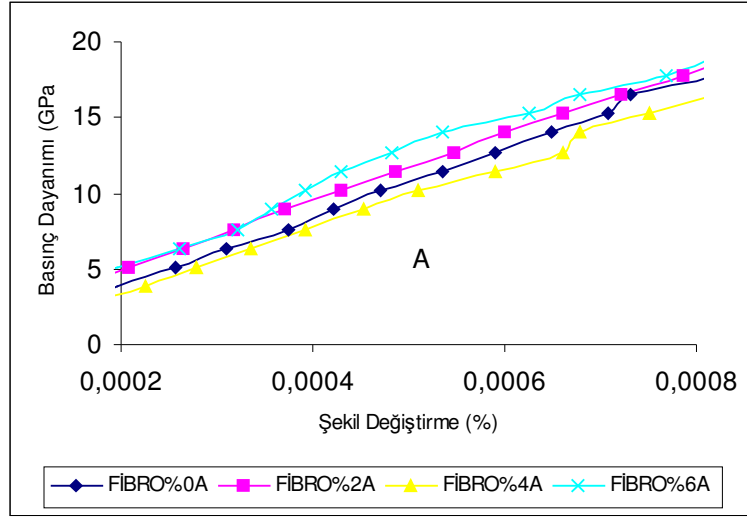
Şekil 3.2 Numune boyutları ve şekilleri

3.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.3.1. Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyleri 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde yapıldı. Her 10 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.



Şekil 3.3 Silindir basınç dayanımı-şekil değiştirme ilişkisi

Ayrıca bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri Ek-A' da verilmektedir.

Elastisite modülü değerleri bu eğrilerden faydalanılarak hesaplandı. Elastisite modülleri hesaplanırken en büyük yükün %10' u ile %33' ü arasında kalan gerilme-şekil değiştirme değerleri kullanıldı. Ayrıca kırılma noktasındaki yük kesit alanına bölünerek, basınç dayanımları hesaplandı. Silindir basınç deneyleri gerilme-şekil

değiştirme eğrilerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 3.5’ te verilmektedir.

3.3.2. Yarma Çekme Deneyi

Silindir yarmada çekme deneyi için 60 mm yüksekliğinde, 150 mm çapında disk numuneler üretildi. Üretilen numunelere çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri hesaplandı. Bu kuvvetler kullanılarak (3.1) bağıntısı yardımıyla yarmada çekme dayanımlarına geçildi.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.1)$$

σ = Yarma-Çekme dayanımı (MPa)

P; Yük (N)

D; Çap (mm)

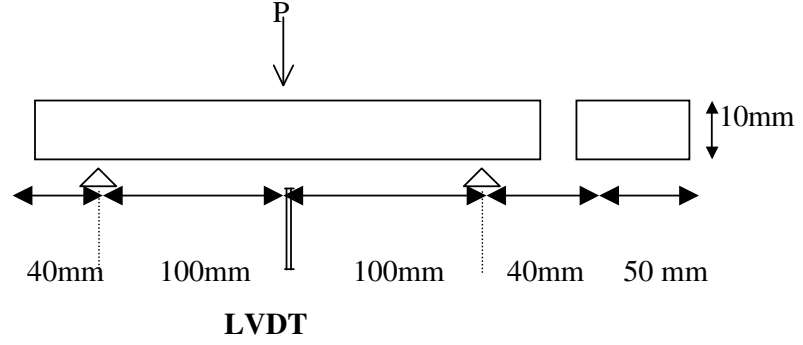
L;Yükseklik (mm)

Yarma çekme deneylerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı değerleri Tablo 3.5’ te verilmektedir. Yarma dayanımları da Şekil 4.3 verilmektedir.

3.3.3. Kırılma Enerjisi Deneyi

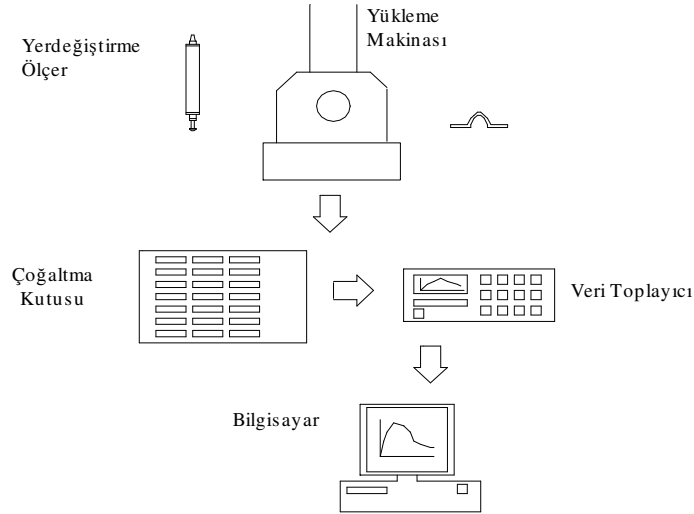
Kırılma enerjisi deneyleri İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Laboratuvarında İnstron marka kapalı çevirmeli deplasman kontrollü yükleme makinası ile yapıldı. Üç noktadan yüklemeli eğilme deneyine tabi tutulan numunelerin tepe noktası sonrası gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edildi ve kırılma enerjileri hesaplandı. Böylece lif içeriğinin ve su/çimento oranının malzemenin eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine etkileri saptandı.

Numunelerin orta noktasından tekil yük uygulanarak yapılan deneylerde, 10x50x280 mm boyutundaki prizma numuneleri Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 200 mm olan deney düzeneğine yerleştirildi.

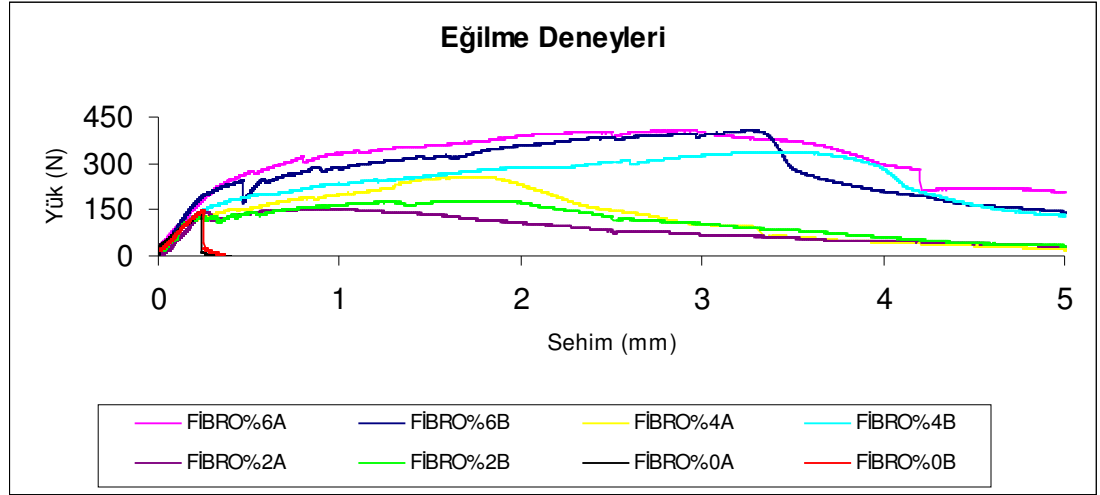


Şekil 3.4 RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

Deneye başlamadan önce numunenin yan yüzeyine sehim değerlerini ölçmek için bir adet LVDT alıcı yerleştirildi. Bu sayede uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen düşey deplasmanlar bilgisayara aktarıldı. Veri toplama sistemi Şekil 3.4’ te görülmektedir. Bu değerler kullanılarak yük-sehim grafikleri oluşturuldu. Numunelere ait yük-sehim eğrileri EK-B’ de verilmiştir.



3.5: RILEM kırılma enerjisi deneyleri veri toplama sistemi

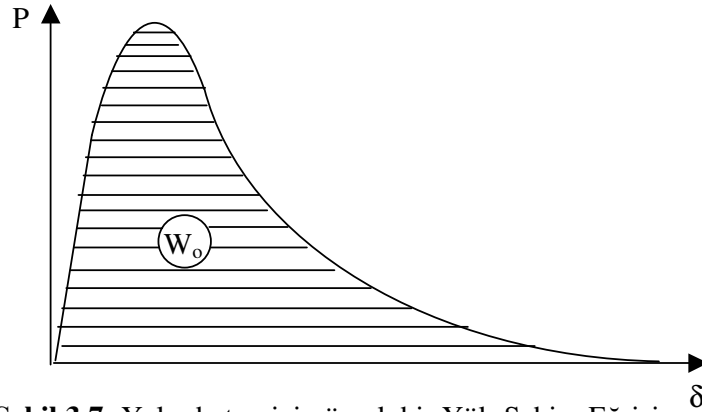


Şekil 3.6: 3 noktadan yüklemeli eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrileri

3.3.3.1. Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan enerji yutma kapasitesi ile orantılıdır. Beton karışımına lif eklenmesinin en önemli faydası, enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde arttırmasıdır [33].

Şekil 3.7' de örnek bir yük-sehim eğrisi ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Yalın beton için örnek bir Yük-Sehim Eğrisi

$$G_f = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.2)$$

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)

δ_o = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m), fibrobeton için 5mm

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m^2)

Bütün numuneler için hesaplanan kırılma enerjisi değerleri EK C' de ve bunların ortalaması ile çizilen kırılma enerjileri grafiği Şekil 4.4' te verilmektedir.

3.3.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları (3.3) bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL) / [2BD^2] \quad (3.3)$$

F_{net} = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D= Numune kesitinin yüksekliği (mm) dir.

Bütün numuneler için hesaplanan net eğilme dayanımları EK D' de ve bunların ortalaması ile çizilen net eğilme dayanımları grafiği Şekil 4.5' de görülmektedir.

3.3.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması

Üretilen numunelerin karakteristik boyları Hillerborg tarafından önerilen şekilde 3.4 bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$l_{ch} = \frac{E.G_f}{f_t^2} \quad (3.4)$$

l_{ch} : Karakteristik boy (mm)

E : Elastisite Modülü (kN/mm^2)

G_f : Kırılma Enerjisi (N/m)

f_t : Yarma Çekme Dayanımı (N/mm^2)

Numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sertleşmiş beton özellikleri Tablo 3.5 ' de görülmektedir.

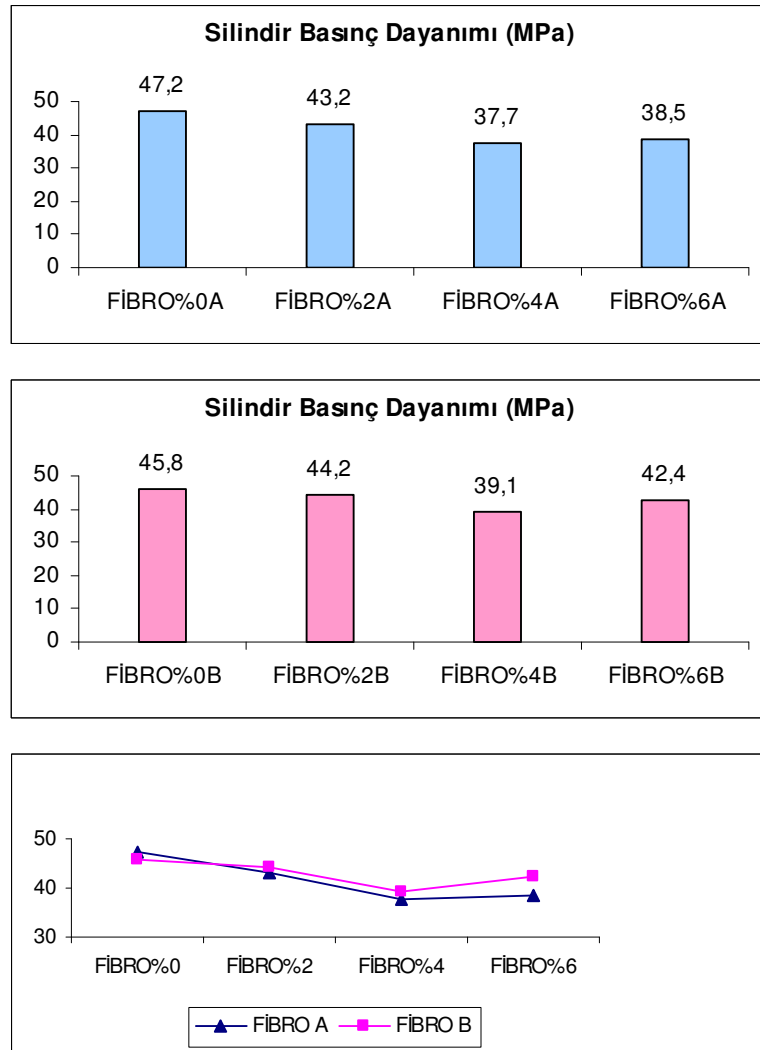
Tablo 3.5: Sertleşmiş beton özellikleri

Numune Kodları	FİBRO%0A	FİBRO%0B	FİBRO%2A	FİBRO%2B	FİBRO%4A	FİBRO%4B	FİBRO%6A	FİBRO%6B
Basınç Dayanımı- f_c (Mpa)	47,2	45,8	43,2	44,2	37,7	39,1	38,5	42,4
Elastisite Modülü-E (Gpa)	22,8	22,1	20,7	21,4	20,4	20,2	20,4	23,0
Yarmada Çekme Dayanımı- f_t (MPa)	4,1	4,4	6,7	6,8	7,1	6,7	7,1	7,0
Net Eğilme Dayanımı- f_{fnet} (MPa)	3,8	7,8	6,6	6,2	12,6	14,8	20,0	17,1
Kırılma Enerjisi- G_F (N/m)	25,9	46,0	511,4	576,3	1347,9	2180,5	2831,9	3034,1
Karakteristik Boy- l_{ch} (mm)	34,6	53,1	238,9	265,4	544,6	995,9	1134,4	1444,7

4.DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

4.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 3.5 ve Şekil 4.1 ile Şekil 4.2’ de görülmektedir.



Şekil 4.1: Silindir Basınç Dayanımları

Bu değerlere göre lifsiz betonlara cam lifi eklendiğinde, basıncı dayanımları %2 ve %4 cam lifi içeren numunelerde azalmıştır. Su/imento oranının artması ise tüm numune gruplarının basıncı dayanımlarında artışa neden olmuştur.

4.1.1. Basıncı Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Cam lifi içermeyen, %34 su/imento oranına sahip A grubu numunelerden lifsiz FİBRO%0A numunesinde basıncı dayanımı 47,2 MPa iken, FİBRO%2A numunesinde az bir düşüş ile 43,2 MPa, FİBRO%6A numunesinde %18,4 düşüş ile 38,5 MPa ve en düşük olarak da FİBRO%4A numunesinde %20 düşüş ile 37,7 MPa, değerine ulaşmıştır.

%36 su/imento oranına sahip B grubu numunelerinde, lifsiz FİBRO%B numunesi 45,8 MPa basıncı dayanımına sahip iken, lif ilavesi yapıldıkça yine basıncı dayanımlarında azalma gözlenmiştir. FİBRO%2B numunesinde ise çok az bir düşüş ile 44,2 MPa, FİBRO%4B numunesinde %14,6 düşüş ile 39,1 MPa, FİBRO%6B numunesinde ise yine az bir düşüş ile 42,4 MPa değerine ulaşmıştır. B grubu numunelerde de, A grubunda olduğu gibi en büyük basıncı dayanımı düşüşü %4 oranında cam lifi içeren numunelerde olmuştur.

Su/imento oranındaki artış ise farklı lif içeriğine sahip betonlarda farklı artışlara neden olmuştur. En büyük artış % 10,1 ile %6 lif katkılı betonlarda olmuştur. Su/imento oranının artması basıncı dayanımlarını %4 cam lif içeren numunelerde ve %2 cam lifi içeren numunelerde az bir artışa neden olmuştur.

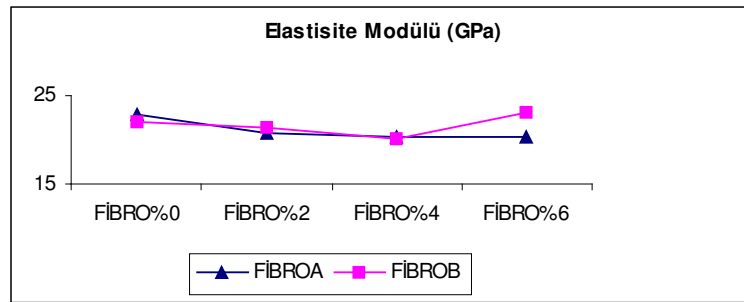
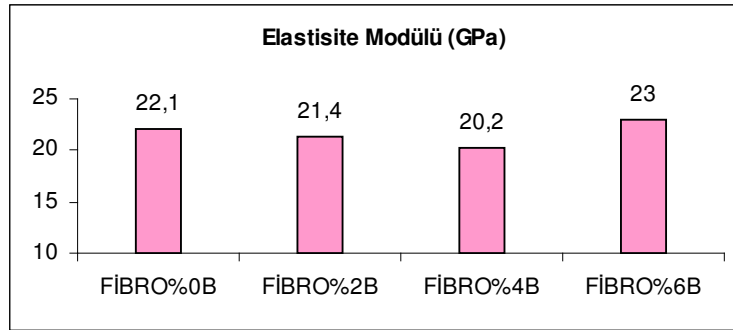
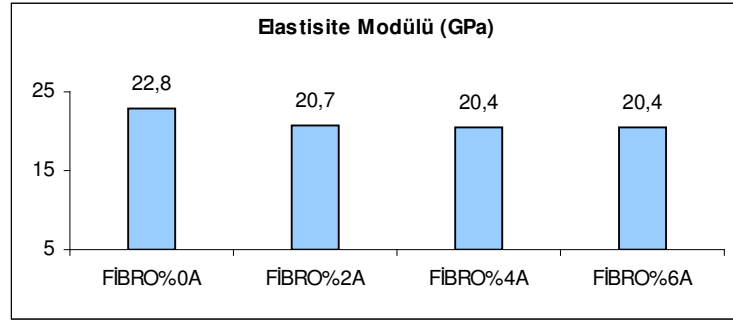
Elde edilen basıncı dayanımı değerleri şekil 4.1' de görülmektedir.

4.1.2. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

A grubu, cam lifi içermeyen FİBRO%0A numunesinde elastisite modülü 22,8 GPa iken, FİBRO%2A numunesinde az bir miktar düşüş ile 20,7 GPa, FİBRO%4A numunesinde %10,5 düşüş ile 20,4 GPa değerine ulaşmış, bu değer %6 lif içeren FİBRO%6A numunesinde değişmemiştir.

B grubu, cam lifi içermeyen FİBRO%0B numunesinde ise elastisite modülü 22,1 GPa iken, FİBRO%2B numunesinde az bir düşüşle 21,4 GPa' a, FİBRO%4B numunesinde ise 20,2 GPa' a inmiştir. %6 cam lifi içeren FİBRO%6B grubunda ise bu değer çok az bir artış yaparak, 23 GPa' a ulaşmıştır.

Su/çimento oranındaki artış ise lifsiz numunelerin basınç elastisite modülünde çok az bir düşüşe, %2 lif içeren numunelerde az bir artışa, %4 cam lifi içeren numunelerde çok az miktarda azalmaya ve %6 lif içeren numunelerde ise %12,7 artışa neden olmuştur. Şekil 4.2' de elde edilen elastisite modülü değerleri verilmektedir.



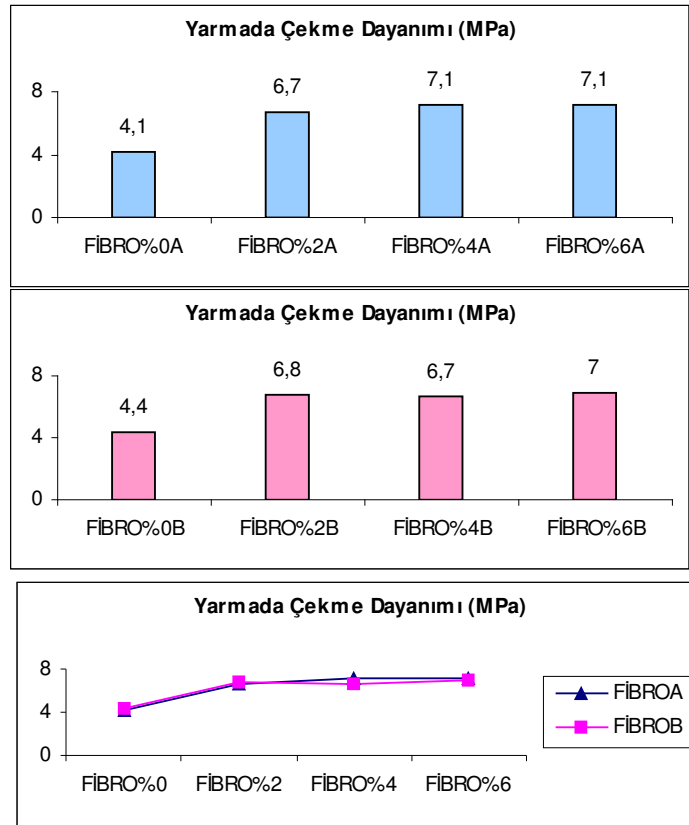
Şekil 4.2: Elastisite Modülleri

4.2. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Cam lifi içermeyen A grubu FİBRO%0A numunesinde yarmada çekme dayanımı 4,1 MPa iken, FİBRO%2A numunesinde %63 artış ile 6,7 MPa, FİBRO%4A numunesinde %73 artış ile 7,1 MPa' a ulaşmış, %6 lif içeren FİBRO%6A numunesinde ise lif oranının artması, yarmada çekme dayanımını değiştirmemiştir.

B grubu lifsiz FİBRO%0B numunesinin yarmada çekme dayanımı 4,4 MPa iken, FİBRO%2B numunesinde %54 artışla 6,8 MPa, FİBRO%4B numunesinde %52 artışla 6,7 MPa, FİBRO%6B numunesinde ise %59 artış ile 7 MPa değerine ulaşmıştır.

Su/çimento oranındaki artış lifsiz ve %2 cam lifi içeren numunelerin yarmada çekme dayanımlarında az miktarda bir artışa neden olurken; %4 ve %6 cam lifi içeren numunelerde ise çok az bir düşüşe neden olmuştur. Deney sonuçlarından elde edilen yarmada çekme dayanımları Şekil 4.3' te verilmektedir.



Şekil 4.3: Yarmada Çekme Dayanımları

4.3. Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlara cam lifi eklenmesi özellikle çekme, eğilmede çekme ve tek eksenli çekme değerlerini önemli miktarlarda arttırmaktadır. Yarı gevrek bir davranış gösteren betona lif eklenmesiyle, çekme gerilmeleri karşılanırken, en önemli sorun olan gevrek davranış da ortadan kalkar. Böylece malzeme daha sünek bir davranış göstererek ani göçme ihtimalini çok azaltır.

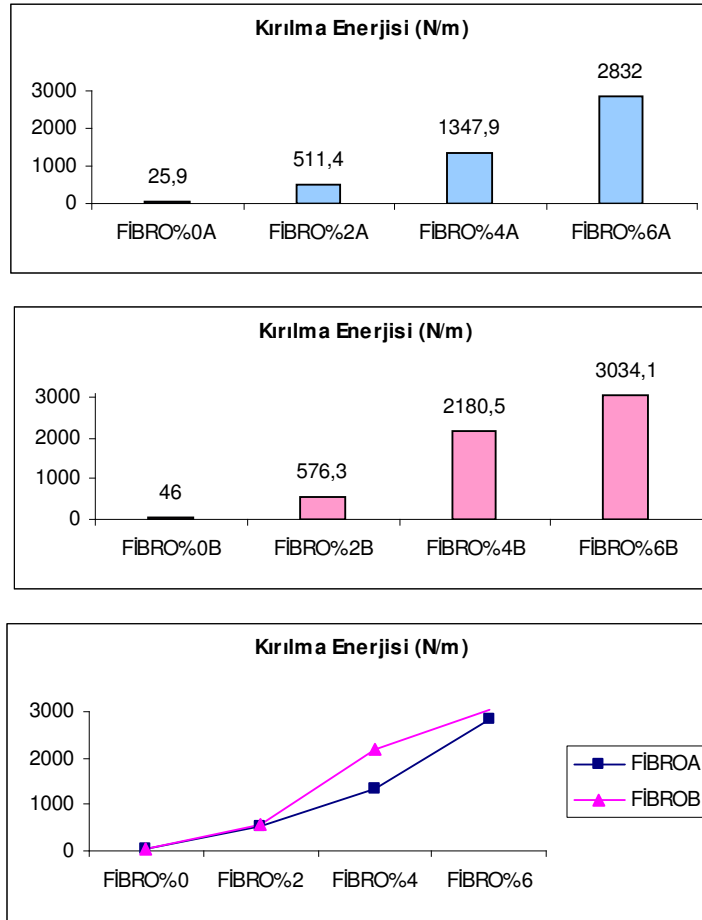
4.3.1. Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi

Numunelerin kırılması sırasında harcanan enerji, dolayısıyla sünekliği ifade eden kırılma enerjisi değerleri yük-sehim eğrilerinin altında kalan alana bağlıdır. Cam lifi ilave edilmesi ile bu alan, dolayısıyla kırılma enerjileri çok artar.

Cam lifi içermeyen, %34 su/çimento oranına sahip FİBRO%0A grubu numunesinde kırılma enerjisi 25,9 N/m iken, FİBRO%2A numunesinde %2 lif ilave edildiğinde kırılma enerjisi 20 katına çıkarak 511,4 N/m , %4 lif ilave edilmiş FİBRO%4A numunesinde 52 katına çıkarak 1347,9 N/m , %6 lif ilave edilmiş FİBRO%6 numunesinde ise tam 109 katına çıkarak 2831,9 N/m değerine ulaşmıştır.

B grubu,%36 su/çimento oranına sahip numunelerde ise lifsiz FİBRO%0B numunesinin kırılma enerjisi 46 N/m iken, %2 cam lifi ilave edilmiş FİBRO%2B numunesinde 13 katına çıkarak 576 N/m, %4 cam lifi ilave edilmiş FİBRO%4B numunesinde 47 katına çıkarak 2181 N/m , %6 cam lifi takviyeli numunede ise 66 katına çıkarak 3034 N/m değerine ulaşmıştır.

Su/çimento oranının artması da kırılma enerjilerinde bir artışa neden olmuştur. Bu artış lifsiz numunelerin kırılma enerjilerini %78, %2 cam lifi içeren numunelerin kırılma enerjilerini %13, %4 cam lifi içeren numunelerin kırılma enerjilerini %62, %6 cam lifi içeren numunelerin kırılma enerjilerini ise %7 oranında arttırmıştır. Şekil 4.4' te eğilme deneyinden elde edilen kırılma enerjileri görülmektedir.



Şekil 4.4: Numunelerin kırılma enerjileri

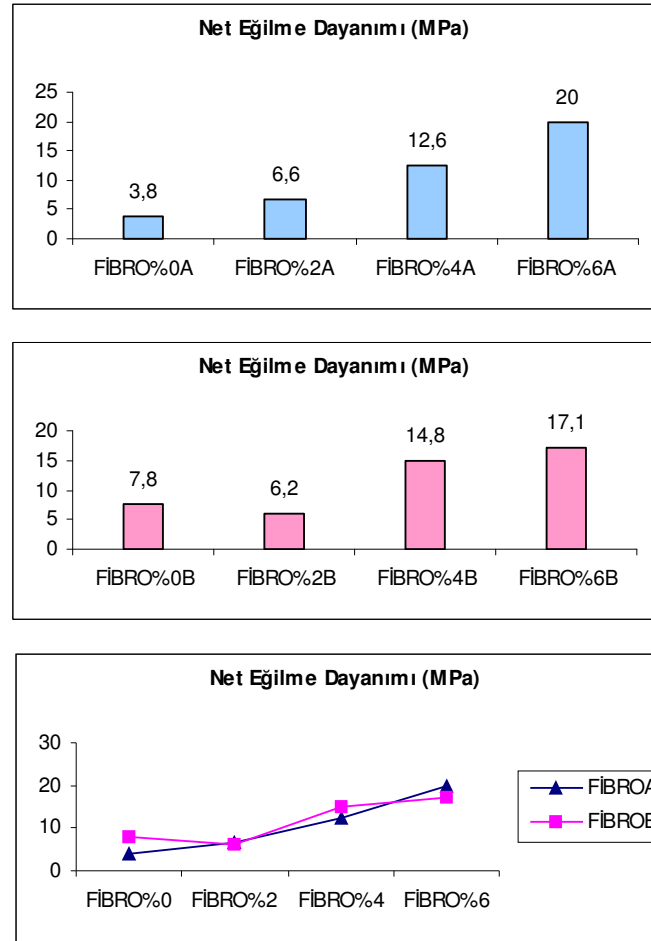
4.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Lif takviyeli betonlar için en önemli özellik eğilme etkisinde gösterdikleri yüksek dayanımdır. Çoğu uygulamada beton eğilme yüklerine maruz kalır. Lif katılması ile normal betonun eğilme direnci artırılır. Liflerle daha iyi bağ yapan betonlarda eğilme dayanımındaki artış, yarmada çekme dayanımından daha fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar.

A grubu lifsiz FİBRO%0A numunesinin eğilme dayanımı 3,8 MPa iken, bu değer %2 oranında cam lifi içeren FİBRO%2A numunesinde 1,7 katına çıkarak 6,6 MPa' a, %4 cam lifi içeren FİBRO%4A numunesinde 3,3 katına çıkarak 12,6 MPa' a, %6 cam lifi içeren FİBRO%6A numunesinde ise 5 katını aşarak, 20 MPa' a ulaşmıştır.

B grubu lifsiz FİBRO%0B numunesinin net eğilme dayanımı ise 7,8 MPa iken, %2 cam lifi içeren FİBRO%2B numunesinin net eğilme dayanımı 1,3 kat düşerek 6,2 MPa, %4 cam lifi içeren FİBRO%4B numunesinin net eğilme dayanımı yaklaşık 2 kat artarak 14,8 MPa, %6 cam lifi içeren FİBRO%6B numunesinin net eğilme dayanımı ise 2 katı aşarak 17,1 MPa değerine ulaşmıştır.

Su/çimento oranının artması ise lifsiz numunelerin net eğilme dayanımını 2,1 katına, %4 cam lifi içeren numunelerin net eğilme dayanımını ise 1,2 katına çıkartırken; %2 ve %6 cam lifi içeren numunelerin net eğilme dayanımlarını ise 0,9 kat azaltmıştır.

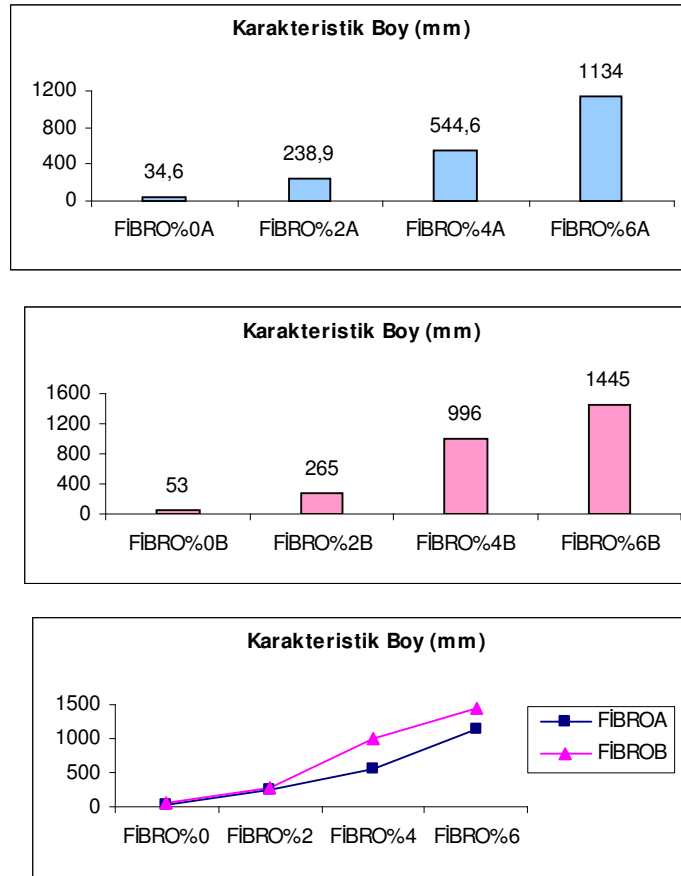


Şekil 4.5: Net eğilme dayanımlarının ortalama değerleri

4.4. Elde Edilen Karakteristik Boyların Değerlendirilmesi

%34 su/çimento oranına sahip lifsiz FİBRO%0A numunesinin karakteristik boyu 36 mm iken, %2 cam lifi içeren FİBRO%2A numunesinde yaklaşık 7 kat artarak 239 mm. , %4 cam lifi içeren FİBRO%4A numunesinde yaklaşık 16 kat artarak 545 mm. , %6 cam lifi içeren FİBRO%6A numunesinde ise yaklaşık 33 kat artarak 1134 mm. ye çıkmıştır.

%36 su/çimento oranına sahip lifsiz FİBRO%0B numunesinin karakteristik boyu 53 mm iken, %2 cam lifi içeren FİBRO%2B numunesinde 5 kat artarak 265 mm. , %4 cam lifi içeren FİBRO%4B numunesinde yaklaşık 19 kat artarak 996 mm. , %6 cam lifi içeren FİBRO%6B numunesinde ise yaklaşık 27 kat artarak 1445 mm. ye çıkmıştır. Şekil 4.6' da numunelerin karakteristik boyları gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Numunelerin karakteristik boyları

5. CAM LİFLİ BETONLARIN OPTİMUM TASARIMI

Bu bölümünde, Cam Lifi Takviyeli Beton (GFRC) kiriş, disk ve silindir üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Daha sonra GFRC' in basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, net eğilme dayanımı, elastisite modülü, kırılma enerjisi ve karakteristik boy gibi mekanik ve kırılma özellikleri cam lifinin içeriğine ve su/çimento oranına göre ifade edilmektedir. Kiriş eğilme deneyinde lif içeriğinin ve su/çimento oranının yükleme sırasında malzemenin davranışını önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir.

5.1. Çok Amaçlı Optimizasyon: 1. Yöntem

Birden fazla mekanik özelliğin aynı anda optimize edilmesi, her bir mekanik özellik için hesaplanan arzu edirlilik fonksiyonunu (d_j) kullanan sayısal optimizasyon teknikleri ile gerçekleştirilebilir. Arzu edirlilik fonksiyonu $0 \leq d_j \leq 1$ arasında değerler alan amaç fonksiyonu olup, optimizasyonda göz önüne alınan her bir mekanik özellik için hesaplanmaktadır [37]. Tekil arzu edirlilik fonksiyonlarının geometrik ortalaması olan denklem 5.1' deki kompozit amaç fonksiyonu oluşturularak çok amaçlı optimizasyon problemi çözülebilir. Bunun için, kompozit amaç fonksiyonu (D) maksimize edilir:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_z)^{\frac{1}{z}} \quad (5.1)$$

burada, z - optimizasyonda göz önüne alınan mekanik özellik sayısıdır. Eğer mekanik özelliklerden herhangi biri arzu edirlilik sınırının dışında kalırsa D=0 olur.

Çok amaçlı optimizasyonda her hangi bir mekanik özellik için:

- Hedef onu maksimum yapmak ise mekanik özeliğin arzu edilirlilik fonksiyonu (d_j) aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$d_j = \begin{cases} 0 & Y_j = \min f_j \\ \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & \text{ve } 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 1 & Y_j = \max f_j \end{cases} \quad (5.2)$$

- Hedef onu minimum yapmak ise mekanik özeliğin arzu edilirlilik fonksiyonu (d_j) aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$d_j = \begin{cases} 1 & Y_j = \min f_j \\ \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & \text{ve } 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 0 & Y_j = \max f_j \end{cases} \quad (5.3)$$

burada, d_j , Y_j , $\min f_j$ ve $\max f_j$ sırasıyla, j. tepkinin arzu edilirlilik fonksiyonu, o karışıma ait deneysel elde edilen değer, bütün karışımların bu mekanik özellik için elde edilen alt ve üst sınır değerleridir. wt_j ise optimizasyonda göz önüne alınan j. mekanik özeliğin ağırlık faktörü olup, bu mekanik özeliğe verilen önemi ifade etmektedir [38].

Maksimum sünek beton karışımı elde etmek için yüksek yarma çekme dayanımı ve yüksek karakteristik boya gerek vardır. Öte yandan, basınç dayanımının ve net eğilme dayanımının da azalmamasına dikkat etmek gerekir [39]. Kırılma enerjisi ve elastisite modülü ise karakteristik boyun hesaplanmasında göz önüne alındığı için bu mekanik özelliklerin çok amaçlı optimizasyona ayrıca dahil edilmesine gerek kalmamaktadır. Böylece, optimizasyonda 4 mekanik özellik (f_c , f_{st} , f_{net} ve l_{ch}) eşit ağırlıklı kabul edildi ($wt_j=1$) ve aynı anda maksimum yapıldı. $z=4$ için denklem (5.1) aşağıdaki gibi olur:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{\frac{1}{4}} \quad (5.4)$$

Burada, d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 sırasıyla, çok amaçlı optimizasyonda göz önünde bulundurulmuş ve maksimum yapılması gereken basınç dayanımı (f_c), yarma çekme dayanımı (f_{st}), net eğilme dayanımı (f_{net}) ve karakteristik boy (l_{ch}) için denklem (5.2)

ile hesaplanmış arzu edilirlık değerleridir. Bu arzu edilirlıkler ve denklem (5.4) ile hesaplanan D'in değerleri Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.1.: Tasarım değişkenleri ve mekanik özeliklerin alt ve st sınırları

		Alt sınır	st sınır
Tasarım değişkenleri	w/c oranı	0,34	0,36
	Lif oranı (V_f), %	0	6
Mekanik zelikler	Basınç dayanımı (f_c'), MPa	37,7	47,2
	Yarma ekme dayanımı (f_{st}), MPa	4,1	7,1
	Net eğilme dayanımı (f_{net}), MPa	3,8	20,0
	Elastisite modülü (E), GPa	20,2	23,0
	Kırılma enerjisi (G_F), N/m	26	3034
	Karakteristik boy (l_{ch}), mm	35	1445

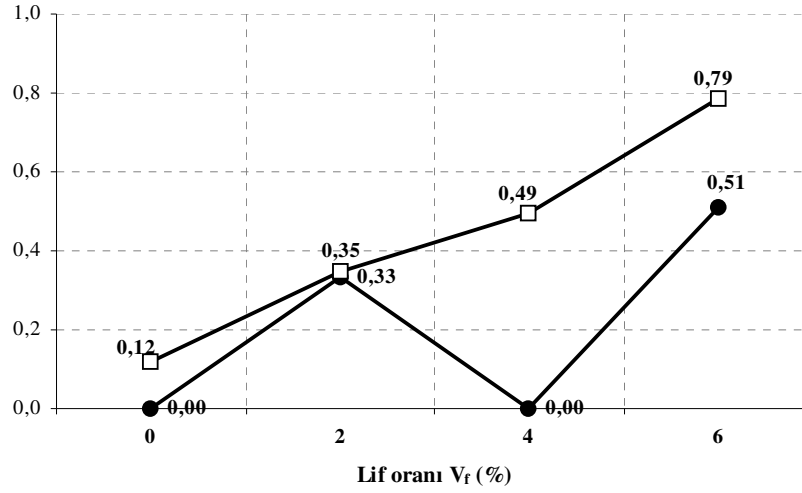
Tablo 5.2.: Arzu edilirlık ve Kompozit Amaç Fonksiyonu değerleri: Basınç dayanımı (d_1), yarma çekme dayanımı (d_2), ve net eğilme dayanımı (d_3) karakteristik boy (d_4).

w/c oranı	Lif oranı (V_f), %	Arzu edilirlık fonksiyonu değerleri				Kompozit amaç fonksiyonu
		d_1	d_2	d_3	d_4	D
0,34	0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,00
0,34	2	0,6	0,8	0,2	0,1	0,33
0,34	4	0,0	1,0	0,5	0,4	0,00
0,34	6	0,1	1,0	1,0	0,8	0,51
0,36	0	0,9	0,1	0,2	0,01	0,12
0,36	2	0,7	0,9	0,1	0,2	0,35
0,36	4	0,2	0,8	0,7	0,7	0,49
0,36	6	0,5	0,9	0,8	1,0	0,79

Kompozit Amaç
Fonksiyonu (D)

(fc,fst, fnet, lch) = Aynı Anda Maksimum

● w/c=0,34
□ w/c=0,36



Şekil 5.1.: D kompozit amaç fonksiyonunun maksimum değeri optimum mekanik özelliklere sahip karışıma aittir.

5.2. Çok Amaçlı Optimizasyon: 2. Yöntem

İkinci bir yöntem, $F(x)$ kompozit amaç fonksiyonu kullanılarak optimizasyon yapılabilir [39]. Burada da basınç dayanımı (fc), yarma çekme dayanımı (fst), net eğilme dayanımı (fnet) ve karakteristik boy (lch), aynı anda maksimum yapılır. Optimizasyonda 4 mekanik özellik (fc, fst, fnet ve lch) eşit ağırlıklı kabul edildi ($w_j = 1$). Bunun için de $F(x)$ fonksiyonu minimum yapılacak şekilde optimizasyon gerçekleştirilir.

$$F(x) = \left\{ \sum_{j=1}^4 \left| \frac{w_j (f_j(x) - \max f_j)}{|\min f_j - \max f_j| + 0.001} \right|^2 \right\}^{1/2}$$

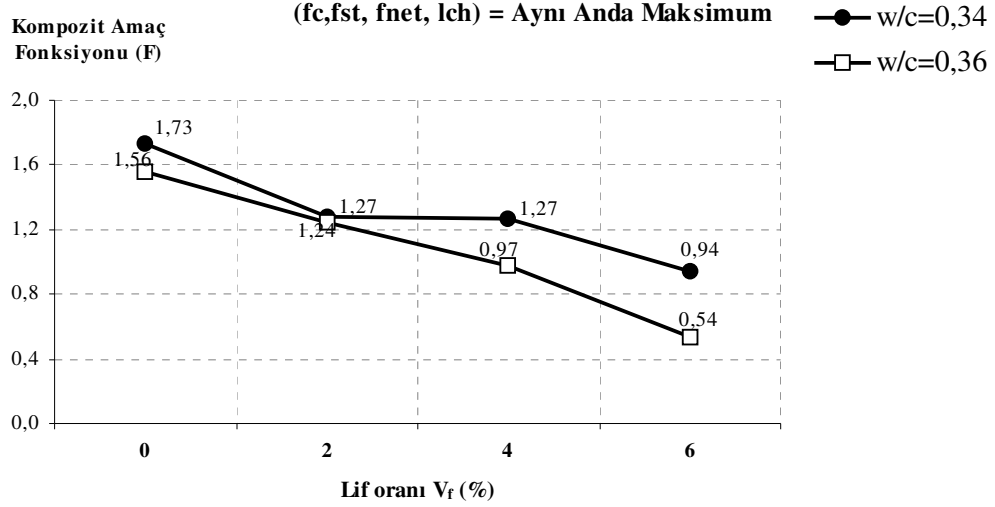
$$\left\{ \left| \frac{f'_c - \max f'_c}{|\min f'_c - \max f'_c| + 0.001} \right|^2 + \left| \frac{f_{net} - \max f_{net}}{|\min f_{net} - \max f_{net}| + 0.001} \right|^2 + \left| \frac{f'_t - \max f'_t}{|\min f'_t - \max f'_t| + 0.001} \right|^2 + \left| \frac{l_{ch} - \max l_{ch}}{|\min l_{ch} - \max l_{ch}| + 0.001} \right|^2 \right\}^{1/2}$$

Tablo 5.3.: Tasarım değişkenleri ve mekanik özelliklerin alt ve üst sınırları

		Alt sınır	Üst sınır
Tasarım değişkenleri	w/c oranı	0,34	0,36
	Lif oranı (V_f), %	0	6
Mekanik özellikler	Basınç dayanımı (f_c'), MPa	37,7	47,2
	Yarma çekme dayanımı (f_{st}), MPa	4,1	7,1
	Net eğilme dayanımı (f_{net}), MPa	3,8	20,0
	Elastisite modülü (E), GPa	20,2	23,0
	Kırılma enerjisi (G_F), N/m	26	3034
	Karakteristik boy (l_{ch}), mm	35	1445

Tablo 5.4.: Karışımlar için hesaplanan Kompozit Amaç Fonksiyonu değerleri: Basınç dayanımı (f_1), yarma çekme dayanımı (f_2), ve net eğilme dayanımı (f_3) karakteristik boy (f_4).

w/c oranı	Lif oranı (V_f), %	Fonksiyonun değerleri				Kompozit amaç fonksiyonu
		f_1	f_2	f_3	f_4	F
0,34	0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,73
0,34	2	0,2	0,0	0,7	0,7	1,27
0,34	4	1,0	0,0	0,2	0,4	1,27
0,34	6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,94
0,36	0	0,0	0,9	0,6	1,0	1,56
0,36	2	0,1	0,0	0,7	0,7	1,24
0,36	4	0,7	0,0	0,1	0,1	0,97
0,36	6	0,3	0,0	0,0	0,0	0,54



Şekil 5.2.: F kompozit amaç fonksiyonunun minimum değeri optimum mekanik özelliklere sahip karışıma aittir.

5.3. OPTİMİZASYON SONUCU

1. Yönteme göre, bu karışıma ait kompozit amaç fonksiyonunu $D=0,79$ 'dur. Bu yöntemde, yukarıda bahsedildiği gibi D 'nin maksimum değeri en iyi karışımı, minimum değeri ise en kötü karışımı göstermektedir. $w/c=0,36$, $V_f=\%4$ olduğunda $D=0,49$; $w/c=0,34$, $V_f=\%6$ olduğunda ise $D=0,51$ 'dir. Optimumluk açısından bu iki karışım yaklaşık aynıdır. Lif oranı $V_f=0$ % olduğunda beklendiği gibi kompozit amaç fonksiyonu değerleri çok düşüktür ($w/c=0,34$ için $D=0$, $w/c=0,36$ için $D=0,12$) ve süneklik açısından uygun karışım sayılmazlar. İlginç olan $w/c=0,34$ $V_f=\%4$ karışımının kompozit amaç fonksiyonunu değeri de $D=0$ 'dır ve bu karışımın kabul edilemez olduğunu gösteriyor. Bunun nedeni ise karışıma ait mekanik özelliklerden birinin tüm karışımlar içinde minimum değeri almasıdır (Basınç dayanımı= $37,7$ MPa). Bu karışımın durumu 1. Yöntemin optimizasyonu iyi ifade etmediğini gösteriyor.

2. Yöntemin sonuçlarını ifade eden Şekil 5.2'den görüldüğü gibi lif oranı arttıkça F değeri de azalmaktadır. Kompozit amaç fonksiyonunun minimum değeri ($F=0,54$) yine $V_f= \% 6$ ve $w/c=0,36$ karışımının optimum olduğunu göstermektedir.

1. Yöntemde olduğu gibi bu yöntemde de $w/c=0,36$, $V_f=\%4$ olduğunda $F=0,97$;

$w/c=0,34$, $V_f=\%6$ olduğunda ise $F=0,94$ 'dir ve bir birine çok yakın optimum noktalar. Yine lif içermeyen karışımların F değerleri yüksek çıkmıştır ve uygun karışımlar değildir. $w/c=0,34$ olduğunda f oranının $\%2$ 'den - $\%4$ 'e artması hiçbir iyileştirmeye yol açmadığını gösteriyor (Şekil 5.2). Bunun da nedeni karışıma ait mekanik özelliklerden basınç dayanımının tüm karışımlar içinde minimum değeri almasıdır ($37,7$ MPa). Ancak, bu iki karışımın diğer mekanik özelliklerine bakıldığında oldukça iyi bir gelişme kaydedildiği açıktır.

Sonuç olarak, üretilen betonlara ait optimum karışımı belirlemek için kullanılan bu yöntemler aynı sonuçları vermekte olup, istenilen mekanik özelliklerin aynı anda maksimum yapılması ile uygulamaya yönelik uygun bir karışımın seçilmesi için kolay ve etkin yöntemlerdir.

6.GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, cam lifi ve su/çimento oranının etkisi ile optimizasyon ile ilgili sonuçlar olmak üzere üç bölümde incelenebilir.

6.1. Cam Lifi Etkisi ile İlgili Sonuçlar

- Cam lifi takviyeli betonlarda, cam lifi kullanılması, malzemenin kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellemektedir. Cam lifi içermeyen numuneler gevrek bir şekilde kırılırken, cam lifi içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmaktadır. Bu özellik ile kompozit malzemelerde karşılaşılan ve en önemli sorun olan gevrek davranış ortadan kalkar. Malzeme içerisindeki cam lifi miktarı arttıkça kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı ve karakteristik boy büyük oranda artmaktadır. Lif içeriğine bağlı olarak kırılma enerjisi yalın betona kıyasla 109 katına kadar, net eğilme dayanımı 5 katına kadar ve karakteristik boy 33 katına kadar artmıştır.
- Cam lifi takviyeli betonlarda, cam lifi içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımı da %52-73 oranında artmıştır.
- Cam lifi takviyeli betonlarda, cam lifi içermeyen betonlara göre lif içeriği arttıkça silindir basınç dayanımlarında %3,5-20 arasında, elastisite modüllerinde ise %3,2-10,5 arasında azalma olmuştur.

6.2. Su/Çimento Oranının Etkisi ile İlgili Sonuçlar

- Su/Çimento oranının artması olası iyi yerleşme nedeniyle, başta kırılma enerjisi olmak üzere karakteristik boy ve net eğilme dayanımlarında artışa neden olmaktadır.
- Su/Çimento oranının artmasının silindir basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü üzerinde fazla bir etkisi olmamıştır.
- En yüksek kırılma enerjisi ve karakteristik boy %36 Su/Çimento oranına ve %6 cam lifi içeriğine sahip FİBRO%6B numunesine aittir. Aynı zamanda en büyük elastisite modülü de aynı numuneden elde edilmiştir.

6.3. Optimizasyon ile İlgili Sonuçlar

- 1.Yönteme göre su/çimento oranı 0,36 ve lif içeriği %4 olan FİBRO%4B numunesi ile 2.Yöntemdeki su/çimento oranı 0,34 ve lif içeriği %6 olan FİBRO%6A numuneleri birbirine çok yakın optimum noktalardır.
- Yapılan optimizasyona göre lif oranının %2' den %4' e çıkmasıyla iyileştirmeye olmamıştır.

KAYNAKLAR

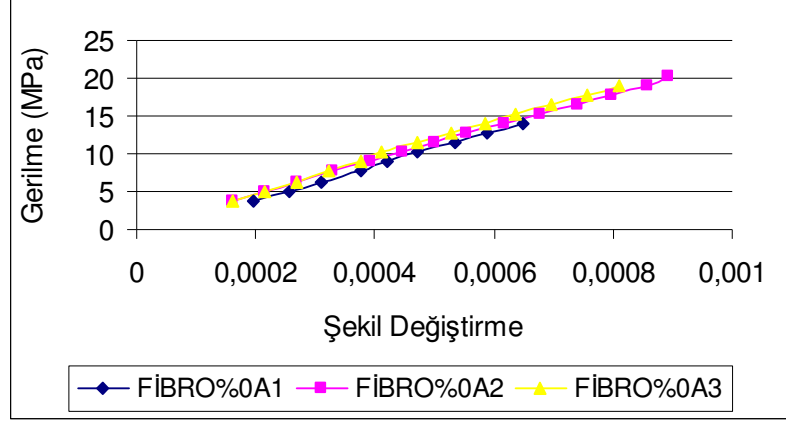
- [1] http://www.archprecast.org/documents/GFRC_handbook.pdf
- [2] **Bornemann, R., Schmidt, M.**, The role of Powders in Concrete in: *6th Internationally Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete Leipzig* 2002.
- [3] **Kocataşkın, F. 1991.** Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. *Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton*, Kardeşler Matbaası, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası s: 23-42.
- [4] **Vitruvius**, “Mimarlık Üzerine On Kitap”, *Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı Yayınları, YEM Yayın*, 1998, 3. Baskı. İstanbul.
- [5] **Jones, M. J.**, “Mechanics of Composite Materials”, *Scripta Book CoMPany*, Washington DC, Mc Graw-Hill Book CoMPany, New York
- [6] **Keri, D.**, “Advanced Glazing Laminates with Spallshield”, *Architectural Laminated Glazing News*, Butacite, Du Pond, **No.2, 1995**, s:2-3.
- [7] **Granalo, J.**, “Chromafusion Architectural Decorative Glass Products Expand Desing Opportunities for Laminated Glass”, *Arc. Laminated Glazing News*, Butacite, Du Pond, **No.2, 1995**, s:2-3.
- [8] **Davey, N.**, “A History of Building Materials”, Phoenix House, Londra, İkinci Basım, 1965.
- [9] **Eriç, M.**, “Dünün ve Bugünün Ahşap ve Ahşaptan Üretilmiş Malzemesinin Türkiye Şartları İçinde Yapıda Rasyonel Kullanılma İmkanlarının Araştırılması”, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi, İstanbul, 1972.
- [10] **Çelik Tellerle Donatılı Beton (ÇTDB): Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), Stahlfaserbewehrter Beton (SFBB).**
- [11] **Acun S.**, 2000. Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Ersoy, H. Y.**, 2001. Kompozit malzeme, Literatür Yayınları: **66**, İstanbul, Türkiye.
- [13] **Chawla K.K.**, 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.
- [14] **Bunsell, A.R.**, 1988. Fiber Reinforcement for Composite Materials, **Vol:2 Composite Materials Series**, Elseiver Science, The Netherlands.

- [15] **Biber, Ş.A.**, 2001. Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, *Bitirme Ödevi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [16] **Shah, S.P. and Balaguru, P.N.**, 1992. Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- [17] **Bartos, P.**, 1992. French Concrete-Properties and Tests, *Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam.
- [18] **ASTM A 820**, 1996. Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, *The American Society for Testing and Materials*, U.S.A.
- [19] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **TS 10513**, 1992. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [21] **Vural, T.**, 1998. Fiberli Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, *Bitirme Ödevi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [22] **Barbero, E.J.**, 1999. Introduction to Composite Materials Design, *Edwards Brothers, Ann Arbor, MI, U.S.A.*
- [23] **Zollo, R. F.**, 1997. Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 years of Development, *Cement and Concrete Composites*, **19**, s:107-122.
- [24] **ASTM C 1116**, 1997. Standart Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete, *The American Society for Testing and Materials*, U.S.A.
- [25] <http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd223e.html>
- [26] **Soroshian, P. And Bayasi, Z.**, 1991. Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **V.88, No.2**, March-April.
- [27] **Betterman, L.R., Quyang C., and Shah S.P.**, 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Adv. Cem. Bas.*, **2**,s:53-61.
- [28] **Akman, S.**, 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [29] **Kurtz, S. And Balaguru, P.**, 2000. Postcrack Creep of Polymeric Fiber-Reinforced Concrete in Flexure, *Cement and Concrete Research*, **30**, 183-190.
- [30] **Walraven J.**, 1999. The Evolution of Concrete, *Structural Concrete*, **P1. No.1, March**, s:3-11.
- [31] **Qian, C. and Stroven, P.**, 2000. Development for Hybrid Polypropylene-Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, **30**, 63-69.
- [32] **TS 10515**, Aralık 1992, s:5.

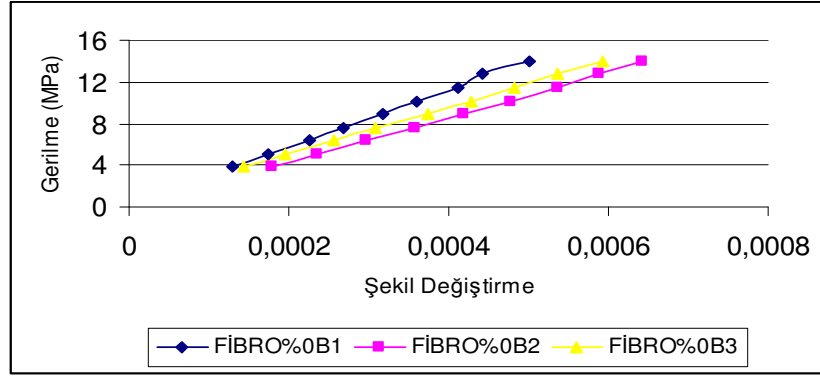
- [33] **RILEM 50 FMC**, 1985. Determination of The Fracture Energy of Mortar and Concrete By Means of Three-Point Bend Tests On Notched Beams, RILEM Draft Recommendation, *Mater. Struct.*, **18(106)** .s: 285-290.
- [34] **Cyr M.**, 2004. Hybrid-Fiber Reinforcement in Cementitious Composites. *Center for Advanced Cement-Based Materials. Northwestern University Evanston. IL USA*
- [35] **Taşdemir, C.**, 1995. Agregat-Çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento Esaslı Kompozitlerin Optimum Tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Derringer, G., Suich, R.**, 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, s214-219.
- [38] **Myers, R. H., Montgomery, D.C.**, 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wileys and Sons, Inc., New York.
- [39] **Lange-Kornbak and Karihaloo**, 1998. Design of Fiber-reinforced Cementitious Composites for Minimum Brittleness, *Advanced Cement-Based Mater.s*:89-101.

EKLER

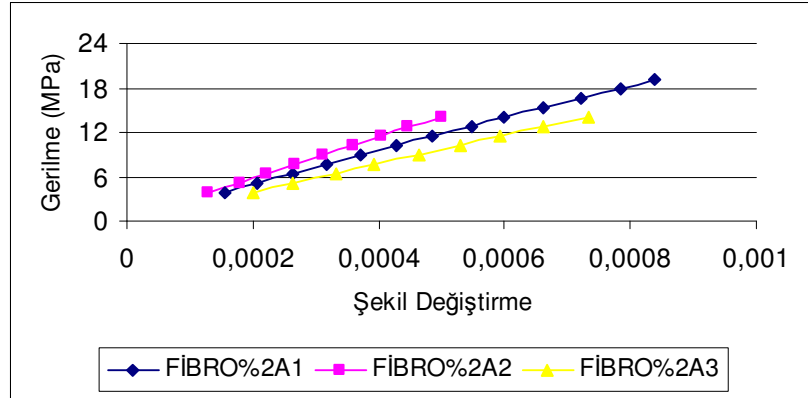
EK A: Silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri



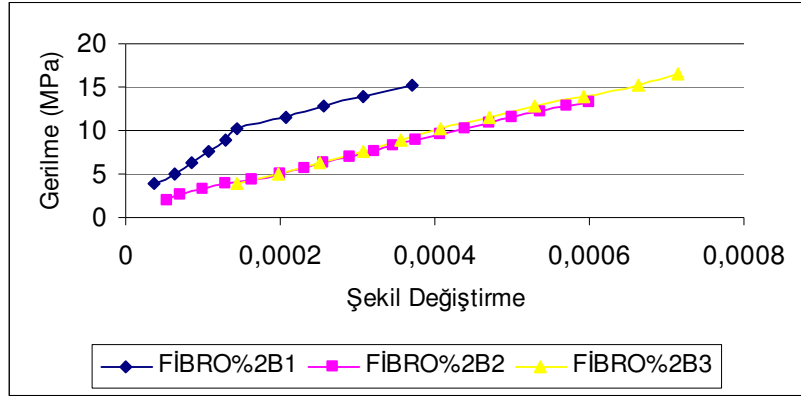
Şekil A.1: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu lifsiz numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri



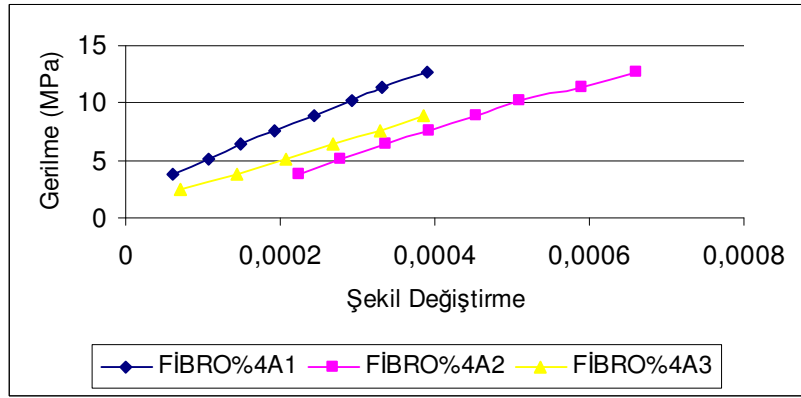
Şekil A.2: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu lifsiz numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri



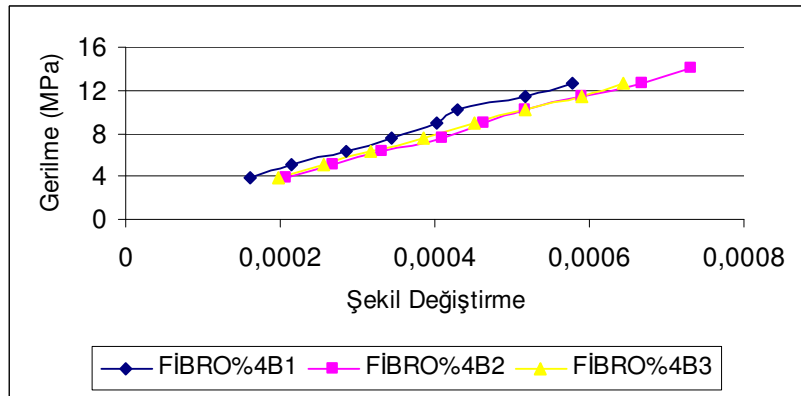
Şekil A.3: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %2 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri



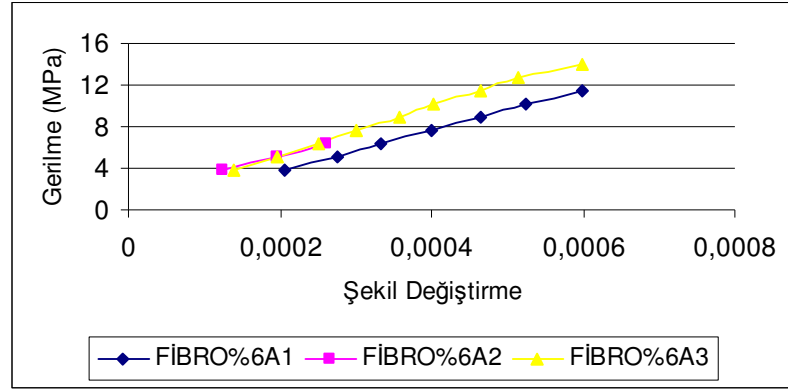
Şekil A.4: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %2 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri



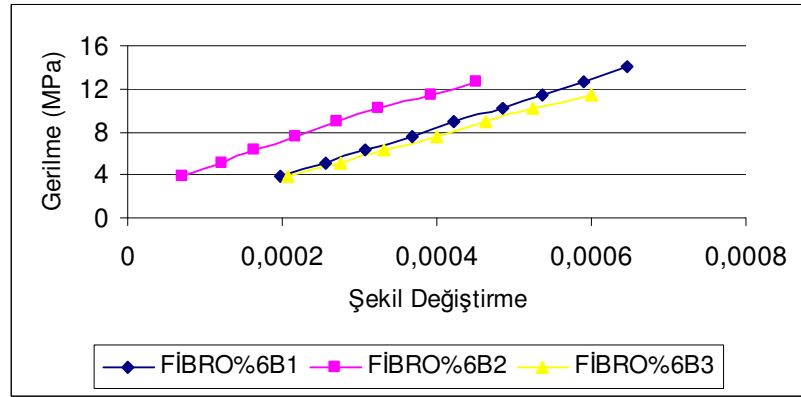
Şekil A.5: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %4 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri



Şekil A.6: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %4 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri

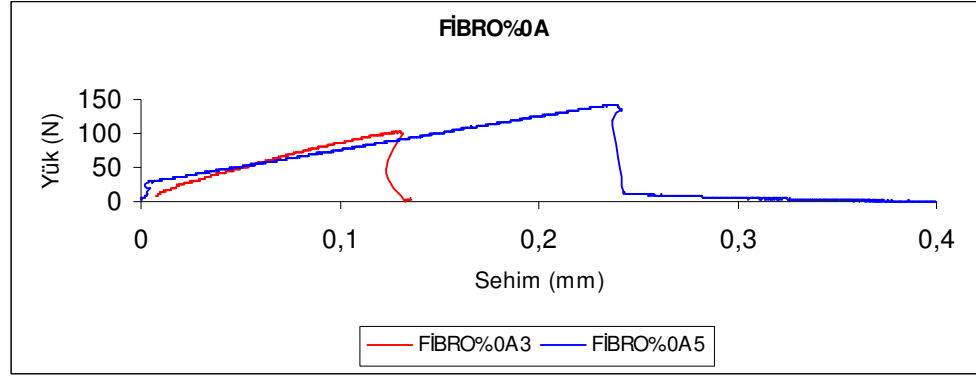


Şekil A.7: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %6 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri

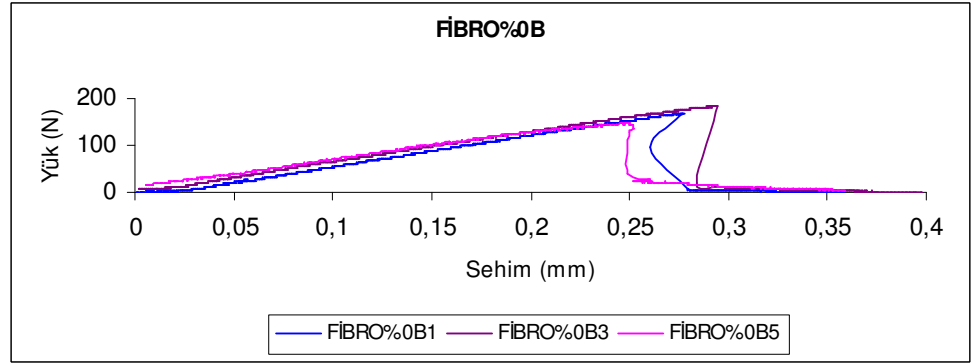


Şekil A.8: Silindir basınç deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %6 cam lifli numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri

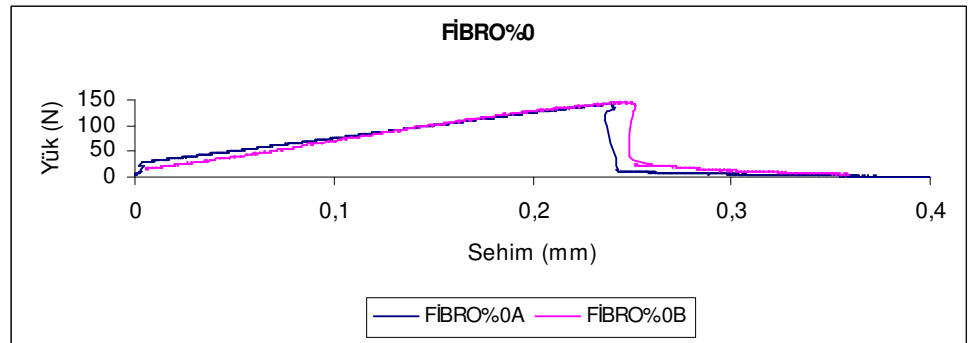
EK B: 3 Noktalı Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Yük-Sehim Grafikleri



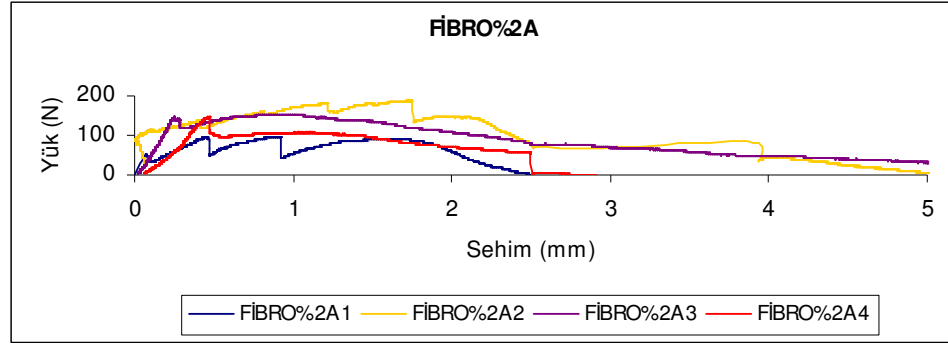
Şekil B.1: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip lifsiz numunelere ait yük-sehim grafikleri



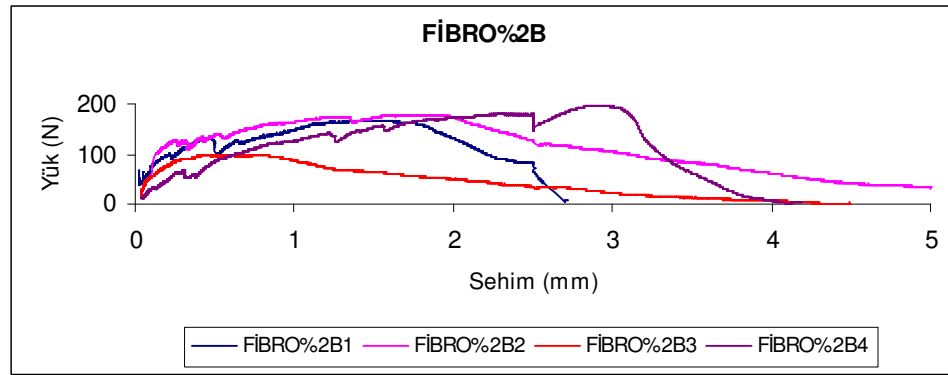
Şekil B.2: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip lifsiz numunelere ait yük-sehim grafikleri



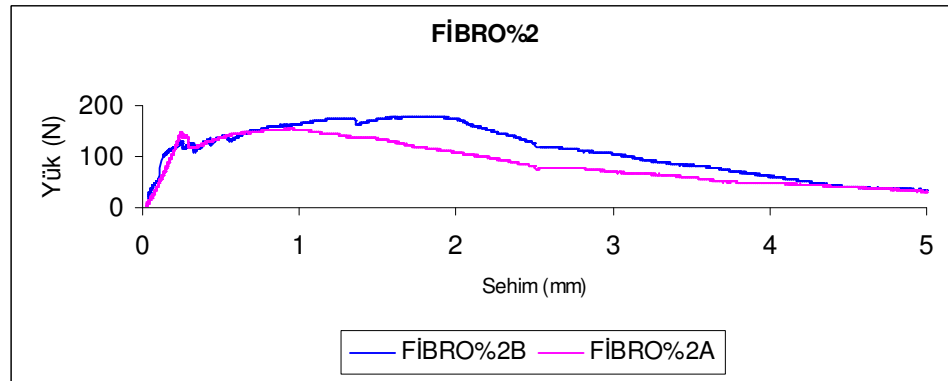
Şekil B.3: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen farklı su/çimento oranına sahip lifsiz numunelere ait yük-sehim grafikleri



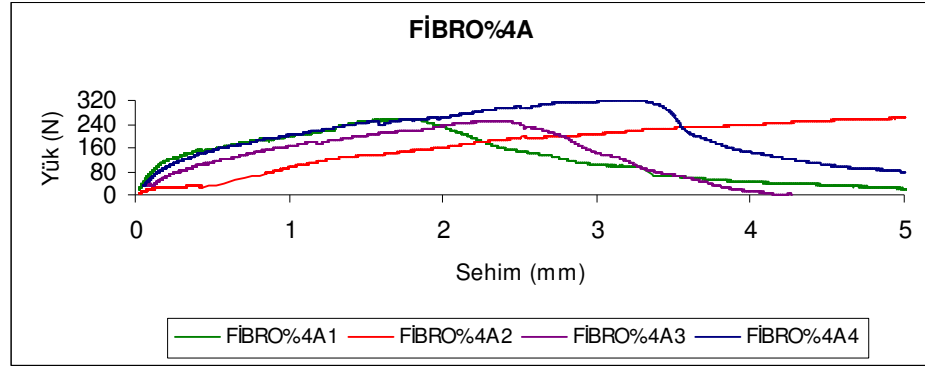
Şekil B.4: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %2 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



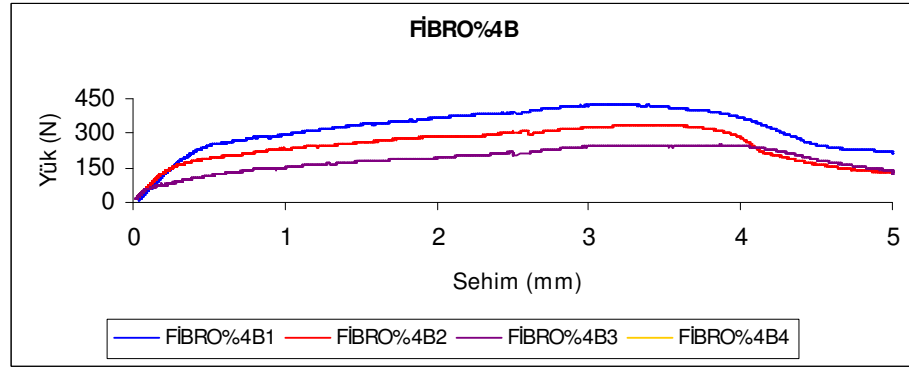
Şekil B.5: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %2 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



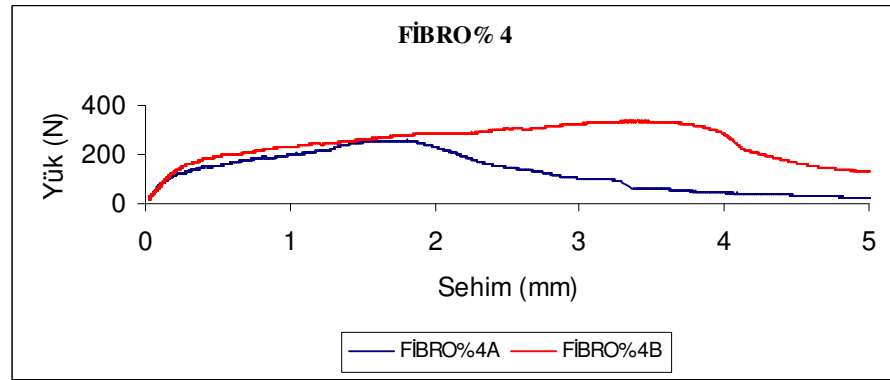
Şekil B.6: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen farklı su/çimento oranına sahip %2 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri,



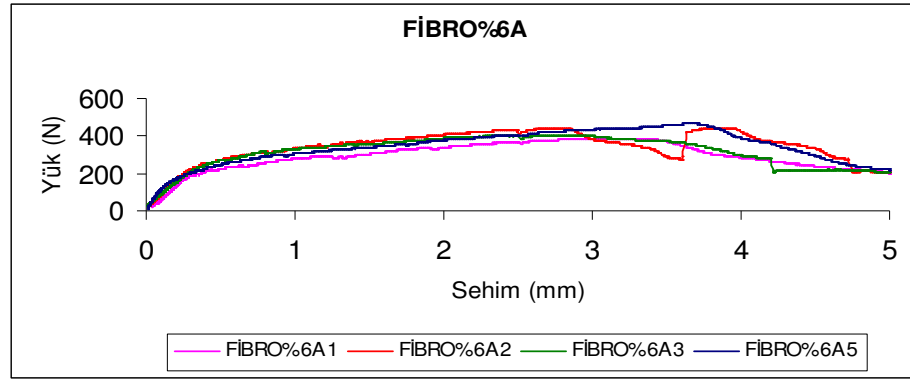
Şekil B.7: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %4 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



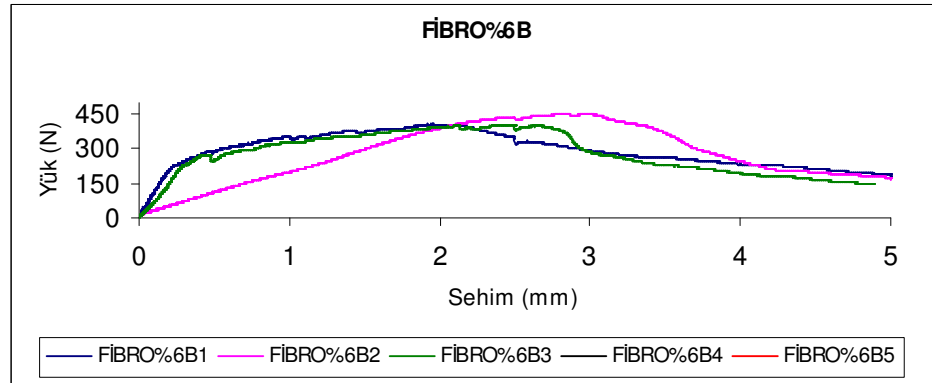
Şekil B.8: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %4 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



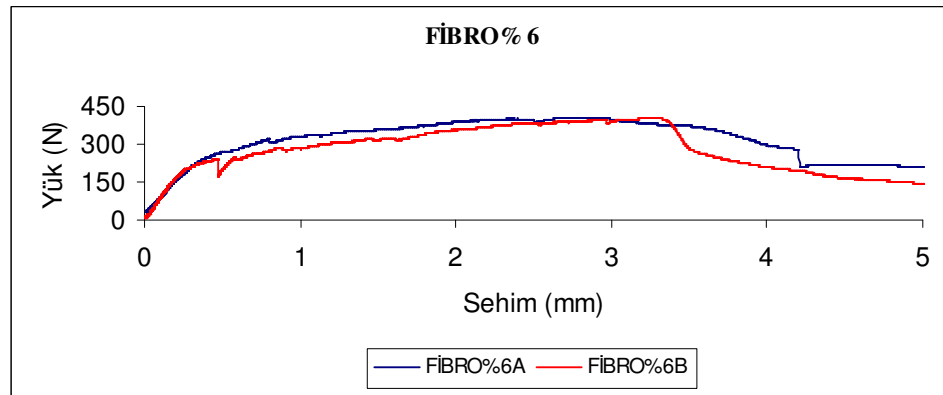
Şekil B.9: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen farklı su/çimento oranına sahip %4 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



Şekil B.10: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %34 su/çimento oranına sahip A grubu %6 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



Şekil B.11: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen %36 su/çimento oranına sahip B grubu %6 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri



Şekil B.12: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen farklı su/çimento oranına sahip %6 cam lifi katkılı numunelere ait yük-sehim grafikleri

EK C: Kırılma Enerjileri

Tablo C 1: Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjileri

Numune Kodu	Kırılma Enerjileri (Nm)	Ortalama
FİBRO%0A1	-	26
FİBRO%0A3	13,5	
FİBRO%0A4	-	
FİBRO%0A5	38,2	
FİBRO%0B1	39,9	46
FİBRO%0B2	47,9	
FİBRO%0B3	50,3	
FİBRO%0B4	2,0	
FİBRO%0B5	2,1	
FİBRO%2A1	286,1	511
FİBRO%2A2	881,6	
FİBRO%2A3	59,7	
FİBRO%2A4	366,7	
FİBRO%2B1	603,5	576
FİBRO%2B2	31,1	
FİBRO%2B3	354,7	
FİBRO%2B4	770,9	
FİBRO%4A1	1160,1	1348
FİBRO%4A2	1410,3	
FİBRO%4A3	1038,1	
FİBRO%4A4	1783,1	
FİBRO%4B1	2900,3	2181
FİBRO%4B2	1920,9	
FİBRO%4B3	1721,2	
FİBRO%4B4	958,1	
FİBRO%6A1	2701,9	2832
FİBRO%6A2	2962,9	
FİBRO%6A3	2769,1	
FİBRO%6A4	1797,3	
FİBRO%6A5	2893,8	
FİBRO%6B1	2712,2	3034
FİBRO%6B2	2342,8	
FİBRO%6B3	2206,7	
FİBRO%6B4	2492,2	
FİBRO%6B5	2382,6	

EK D: Net Eğilme Dayanımları

Tablo D. 1: Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları

NUMUNE KODU	Net Eğilme Dayanımı(N/mm ²)	Ortalama
FİBRO%0A1	1,0	5,6
FİBRO%0A3	4,7	
FİBRO%0A4	4,5	
FİBRO%0A5	6,4	
FİBRO%0B1	8,2	7,3
FİBRO%0B2	7,4	
FİBRO%0B3	8,7	
FİBRO%0B4	7,9	
FİBRO%0B5	6,6	
FİBRO%2A1	4,4	7,3
FİBRO%2A2	8,5	
FİBRO%2A3	7,0	
FİBRO%2A4	6,4	
FİBRO%2B1	5,7	7,5
FİBRO%2B2	8,0	
FİBRO%2B3	4,1	
FİBRO%2B4	7,0	
FİBRO%4A1	12,5	11,8
FİBRO%4A2	11,6	
FİBRO%4A3	11,2	
FİBRO%4A4	15,0	
FİBRO%4B1	20,6	14,0
FİBRO%4B2	15,8	
FİBRO%4B3	12,2	
FİBRO%4B4	10,7	
FİBRO%6A1	18,8	20,0
FİBRO%6A2	19,6	
FİBRO%6A3	19,6	
FİBRO%6A4	21,3	
FİBRO%6A5	20,8	
FİBRO%6B1	15,3	17,1
FİBRO%6B2	19,4	
FİBRO%6B3	15,7	
FİBRO%6B4	17,5	
FİBRO%6B5	17,7	

EK E: Resimler









ÖZGEÇMİŞ

Gözde KURT, 1980 yılında Kocaeli’ de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli’ de tamamladı. 1998 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesine girdi.1998-1999 öğretim yılında Y.T.Ü. İngilizce Hazırlık bölümünü tamamlayarak, 1999 yılında başladığı lisans öğrenimini 2004’ te tamamladı. 2004 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı.