

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI TÜR VE ORANLARDA POLİMER LİF KATKISIYLA ÜRETİLEN
HARÇLARIN, YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin Ziya TEKER

OCAK 2012
GÜMÜŞHANE

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI TÜR VE ORANLARDA POLİMER LİF KATKISIYLA ÜRETİLEN
HARÇLARIN, YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin Ziya TEKER

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.01.2012

OCAK 2012

KABUL ve ONAY

Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR danışmanlığında **Selahattin Ziya TEKER** tarafından hazırlanan “**FARKLI TÜR VE ORANLARDA POLİMER LİF KATKISIYLA ÜRETİLEN HARÇLARIN, YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**” isimli bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak Oy Birliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Şükrü YETGİN

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Alaaddin VURAL

Üye : Doç. Dr. Şükrü YETGİN

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Temel BAYRAK
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI TÜR VE ORANLARDA POLİMER LİF KATKISIYLA ÜRETİLEN
HARÇLARIN, YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Selahattin Ziya TEKER

Gümüşhane Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR

2012, 73 sayfa

Lifler eğilme dayanımını arttırmak ve bir ölçüde çatlakları engellemek için betona ilave edilmektedirler. Polimer türü lifler ise son zamanlarda beton endüstrisinde oldukça yaygın kullanım alanı bulan ucuz petrol türevi malzemelerdir. Bu katkıların beton içerisinde süreksizlik oluşturarak basınç dayanımını düşürme gibi liflerin bazı olumsuz etkileri bulunmaktadır.

Bu çalışmada polimer lif katkısının, yüksek sıcaklık etkisi altında çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca çimento harçlarının mekanik özelliklerine en yüksek katkıyı sağlayan en uygun lif boyu da belirlenmek istenmiştir.

Böylece polimer lif katkısı ile çimento harçlarının basınç dayanımını düşürmeksizin, eğilme dayanımı ve sehim gibi bazı mekanik özelliklerin iyileştirmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçlara yönelik olarak çalışma üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda lif katkı oranı (% 2.0 hacim oranında) ve malzeme özellikleri (yalnız karbon lif) sabit tutularak dört farklı boyda (5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm) lif kullanılmış ve böylece çimento hamuruna en iyi mekanik özellikler kazandıran en uygun lif boyu tespit edilmiştir. İkinci kısımda lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento harcına katılarak, DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Son kısımda ise lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento harcına katılarak, beş farklı sıcaklığa (21 °C, 100 °C, 450 °C, 650 °C ve 850 °C) maruz bırakılmış ve bu numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen en önemli bulgular özetlenecek olursa; en uygun harç mekanik davranışı kullanılan farklı karbon lifi boylarının içerisinde 20 mm uzunluğundaki karbon lifinin çimento harcına ilave edilmesiyle elde edilmiştir. Aramid lif bu çalışmada kullanılan polimer lifler arasında en iyi başarıyı gösteren lif türüdür. Polimer lif katkıları en iyi mekanik katkıyı EK durumunda göstermiştir. Liflerin bu olumlu etkisi 450 °C sıcaklık düzeyine kadar yükseliş göstermiştir ve eğilme dayanımına özellikle bu sıcaklıkta katkı sağlamıştır. Yüksek sıcaklık altında, her lif en iyi başarıyı farklı katkı oranında gösterir. Her sıcaklık için, eğilme dayanımındaki en yüksek artış ve basınç dayanımındaki en düşük azalış HPP için % 0.3-0.9 lif katkı oranında, CPP için % 0.3-0.6 lif katkı oranında ve AR için % 0.9 lif katkı oranında gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Polimer lif, Homopolimer polipropilen, Kopolimer polipropilen, Aramid, Mekanik özellikler, Çimento harcı.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF THE CEMENT MORTARS CONTAINING DIFFERENT TYPES AND RATIOS OF POLIMERIC FIBER ADDITIVES UNDER HIGH TEMPERATURE

Selahattin Ziya TEKER

**Gümüşhane University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet ÇAVDAR

2012, 73 pages

Fibers are added to concrete because of increasing flexural strength and prevent cracks to some degree. On the other hand, polymeric fibers that are found using area extensively in concrete industry in these days are cheap petrol derivatives materials. Besides theirs additions to concrete, fibers are also have some adverse effects on concrete like decreasing compressive strength by constituting discontinuities in it.

In this study, the effects of polymeric fibers additives on mechanical properties of the cement mortars under high temperature are investigated experimentally. In addition, the optimum filament length that provides the best performance for the cement mortars is determined. Thus, it is aimed that the mechanical properties like flexural strength and

deflection properties are improved without decreasing compressive strength of the cement mortars.

The study consists of three stages for intended purposes. At the first stages, it is used four different length filaments (5 mm, 10 mm, 15 mm and 20 mm) by fixing the fiber ratio (2.0 % by volume) and materials properties (carbon fiber), thus, the optimum fiber length that provides the best mechanical properties for cement mortars is determined. At the second stages, the mechanical properties of the examples in DYK and EK conditions are investigated for the samples that are fixed lengths (10 mm), in three different types of fibers (HPP, CPP and AR) and in five different ratios of fiber addition (0.00 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % and 1.2 %). At the last stages, the polymeric fibers that are fixed lengths (10 mm), in three different types of fibers (HPP, CPP and AR) and in five different ratios of fiber addition (0.00 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % and 1.2 %) are added to cement mortars and subjected to five different temperatures (21 °C, 100 °C, 450 °C, 650 °C and 850 °C). And the mechanical properties of these samples are investigated.

If the most important findings obtained from this study are summarized; the optimum mechanical behavior is obtained from the addition of 20 mm in length carbon fiber to cement mortar. Aramid fiber is the fiber type that shows the best performance among used in this study. Polymeric fiber additives show the best advantage under EK conditions. This positive of fibers effect continuous to 450°C clearly and they provide benefit to flexural strength, especially, under this temperature. Under high temperature, each fiber shows the best performance with different addition ratio. The highest increase in flexural strength and the lowest decrease in compressive strength are at 0.3-0.9% fiber addition ratio for HPP, at 0.3-0.6 % fiber addition ratio for CPP and at 0.9 % fiber addition ratio for AR for each temperature.

Keywords: Polymeric Fiber, Homopolymer polypropylene, copolymer polypropylene, Aramid, Mechanical Properties, Cement Mortar.

TEŞEKKÜR

Farklı tür ve oranlarda polimer lif katkısıyla üretilen harçların, yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik davranışlarının incelendiği bu yüksek lisans çalışmasıyla, uygulanan yöntemler ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem bilim dünyasına hem de ülke ve bölge ekonomisine katkılar sağlamayı amaçlamış bulunmaktayım.

Bu tez çalışmam boyunca değerli bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan manevi desteğini ve değerli vakitlerini benden esirgemeyen tezimin her aşamasında yol gösteren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Vakitlerini ayırarak tezimi değerlendirme zahmetinde bulunan ve yol gösterici fikirleriyle çalışmama katkıda bulunan Hocalarım Doç. Dr. Şükrü YETGİN, Yrd. Doç. Dr. Alaaddin VURAL'a da ayrıca şükranlarımı sunarım.

Çalışmamdaki deneylerin uygulanması sırasında bana yardımcı olan ve fikir alışverişinde bulunduğum Arş. Gör. Şinasi BİNGÖL, Arş. Gör. Uğur SATILMIŞ'a ve hayatımda olduğu gibi bu çalışmamda da yardımlarını benden esirgemeyen K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencisi kardeşim Mertcan TEKER'e teşekkür ederim.

Tez çalışmama ve yüksek lisans programına zaman ayırmamı sağlayan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sayın patronum İnş. Müh. Halil BÜLBÜLOĞLU'na ve bünyesindeki Emin Yapı Mühendislik çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, benim bu günlere gelmem için büyük fedakarlıklar gösteren emeklerini hiçbir zaman göz ardı edemeyeceğim sevgili annem Nursen TEKER, babam Mustafa TEKER ve kardeşlerim Selin TEKER ve Mertcan TEKER'e her şey için çok minnettar olduğumu belirterek bu çalışmamı onlara ithaf ediyorum.

Selahattin Ziya TEKER

GÜMÜŞHANE, 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	III
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ	XIII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Genel Donatı Türleri.....	2
1.2.1. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	4
1.2.1.1. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Matris Olarak Kullanılan Malzemeler.....	5
1.2.1.1.1. Metal Matris Malzemeleri	5
1.2.1.1.2. Polimer Matris Malzemeleri	6
1.2.1.1.3. Matris Malzemesi Olarak Harç ve Betonlar	7
1.2.1.1.4. Çimento Bağlayıcılı Matris Malzemeleri	7
1.2.1.1.4.1. Çimento Hamuru Matris	7
1.2.1.1.4.2. Çimento Harcı ve Betonları	8
1.2.1.2. Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Donatı Malzemesi....	9
1.2.1.2.1. Karbon Lifler.....	9
1.2.1.2.2. Polipropilen lifler.....	10
1.2.1.2.2.1. Polipropilen Liflerin Sınıflandırılması.....	11
1.2.1.2.2.2. Polipropilen Liflerin Teknik Özellikleri.....	12
1.2.1.2.2.3. Polipropilen Liflerin Kullanım Alanları.....	13
1.2.1.2.3. Aramid (Kevlar) Lifler.....	14
1.2.1.2.4. Cam Lifi.....	15
1.2.1.2.5. Asbest Lifler.....	16
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	17

2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR, YÖNTEM ve MALZEME ÖZELLİKLERİ	19
2.1.	Deney Yönergesi	19
2.2.	Yöntem ve Deneysel Çalışmalar	22
2.2.1.	Çimento Harcının Hazırlanması	22
2.2.2.	Numunelerin Deneylere Hazırlanması	24
2.3.	Deneylerin Uygulanması	26
2.3.1.	Eğilme Dayanımı Deneyi	26
2.3.2.	Sehmin Ölçülmesi	26
2.3.3.	Basınç Dayanımı Deneyi	27
2.3.4.	Numune Kütle Değişimlerinin Tespiti	28
2.4.	Malzeme Özellikleri	29
2.4.1.	Portland Çimentosu	32
2.4.2.	Standart Kum	32
3.	BULGULAR ve İRDELEMELER	34
3.1.	Lif Katkısının Boy Değişiminin Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi	34
3.2.	Polimer Türü Lif Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi	35
3.2.1.	Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Birim Kütlelerine Etkisi	38
3.2.2.	Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Eğilme Dayanımına Etkileri	39
3.2.3.	Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Sehimi Üzerine Etkileri	42
3.2.4.	Lif Türünün ve Oranının Katkılı Harçların Basınç Dayanımına Etkisi	44
3.2.5.	Eğilme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkiden Kullanılacak En Uygun Lif Oranının Belirlenmesi	46
3.3.	Polimer Türü Lif Katkıların Yüksek Sıcaklığa Maruz Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi	48
3.3.1.	Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve İlave Oranlarının Harçların Birim Kütleleri Üzerindeki Etkisi	52
3.3.2.	Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve İçeriklerinin Harçların Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi	55
3.3.3.	Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve Katılım Oranlarının Harçların Sehimi Üzerindeki Etkisi	58

3.3.4.	Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve Katkı Oranlarının Harçların Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	61
3.3.5.	Yüksek Sıcaklık Altında Eğilme Dayanımı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkiden En Uygun Polimer Lif Türü ve İlave Oranının belirlenmesi.....	64
4.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	66
5.	KAYNAKLAR.....	69
	ÖZGEÇMİŞ.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Polipropilen lif.....	11
Şekil 1.2. Betonda görülen erken dönem ve geç dönem çatlakları.....	12
Şekil 1.3. Cam lifi.....	16
Şekil 1.4. Asbest lif.....	17
Şekil 2.1. I. Kısım deney yönerge şeması.....	19
Şekil 2.2. II. Kısım deney yönerge şeması.....	20
Şekil 2.3. III. Kısım deney yönerge şeması.....	21
Şekil 2.4. Özel tasarım çimento harç karıştırıcısı.....	23
Şekil 2.5. Sıkıştırıldıktan sonra yüzeyi düzeltilmiş harç örneği.....	23
Şekil 2.6. Kürhavuzunda bekletilen numuneler.....	24
Şekil 2.7. Eğilme deneyinde sehim ölçülmesi.....	27
Şekil 2.8. Karbon lifi.....	30
Şekil 2.9. Deneylerde kullanılan polimer türü lifler.....	31
Şekil 3.1. Lif uzunluğundaki değişimle basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki.....	35
Şekil 3.2. Harçlarda kullanılan liflerin ince kesit görüntüleri.....	37
Şekil 3.3. Lif oranı ve kesin kütle arasındaki ilişki.....	39
Şekil 3.4. DYK durumunda lif katkısının eğilme dayanımına etkisi.....	41
Şekil 3.5. EK durumunda lif katkısının eğilme dayanımına etkisi.....	41
Şekil 3.6. Lif oranı ve DYK durumundaki sehim arasındaki ilişki.....	43
Şekil 3.7. Lif oranı ve EK durumundaki eğimlilik arasındaki ilişki.....	43
Şekil 3.8. Lif oranı ve DYK durumundaki harçların basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	45
Şekil 3.9. Lif oranı EK durumundaki harçların basınç dayanımı arasındaki ilişki...	45
Şekil 3.10. EK durumunda harçların, lif katılım oranları ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki.....	47
Şekil 3.11. a) Yüksek sıcaklıklara maruz kalan HPP lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri.....	49
Şekil 3.11. b) Yüksek sıcaklıklara maruz CPP lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri.....	50

Şekil 3.11. c) Yüksek sıcaklıklara maruz AR lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri.....	51
Şekil 3.12. Yüksek sıcaklık altında lif oranı ile özgül kütle arasındaki ilişki.....	54
Şekil 3.13. Yüksek sıcaklık altında lif katkı oranı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki.....	57
Şekil 3.14. Yüksek sıcaklık ve sehim arasındaki ilişki.....	60
Şekil 3.15. Lif katkılı harçlarda yüksek sıcaklık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	63
Şekil 3.16. Yüksek sıcaklığa maruz kalan farklı türdeki liflerin katılım oranı ile eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	65

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Liflerle donatılı betonların özelliklerinde görülen değişimler.....	4
Tablo 1.2. Polipropilen liflerin teknik özellikleri.....	13
Tablo 1.3. Polipropilen liflerin başlıca kullanım alanları.....	13
Tablo 1.4. Polipropilen liflerin uygulama zamanlarına göre etkileri.....	14
Tablo 2.1. On üç farklı lif katkılı harcın karışık tasarımı.....	22
Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan liflerin özellikleri.....	29
Tablo 2.3. CEM 42.5 R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	32
Tablo 2.4. CEN Referans kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı.....	33
Tablo 3.1. Lif uzunluğunun eğilme ve basınç dayanımlarında meydana getirdiği değişimler.....	35
Tablo 3.2. Lif katkılı harçların özgül kütlesi.....	38
Tablo 3.3. Lif katkılı harçların eğilme dayanımı.....	40
Tablo 3.4. Lif katkılı harçların sehım değerleri.....	42
Tablo 3.5. Lif katkılı harçların basınç dayanımı.....	44
Tablo 3.6. Yüksek sıcaklığa maruz polimer lif katkılı harçların özgül kütleleri...	53
Tablo 3.7. Yüksek sıcaklığa maruz kalan lif katkılı harçların eğilme dayanımı...	56
Tablo 3.8. Yüksek sıcaklığa maruz lif katkılı harçların sehimi.....	59
Tablo 3.9. Yüksek sıcaklığa maruz kalan lif katkılı harçlarının basınç dayanımları.....	62

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	: American Society For Testing And Materials
AR	: Aramid
C	: Beton Harcı Tasarımında Kullanılan Çimento Miktarı
CF	: Karbon Lifi
CPP	: Kopolimer Polipropilen
CTP	: Cam Lif Takviyeli Plastik
DYK	: Doygun Yüzey Kuru Numune
EK	: Etüv Kurusu Numune
HPP	: Homopolimer Polipropilen
PP	: Polipropilen
V	: Numunenin Hacmi
W	: Beton Harcı Tasarımında Kullanılan Su Miktarı
<i>B</i>	: Prizma Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
F_c	: Kırılma Anındaki En Büyük Yük Kuvveti
F_f	: Prizmanın Kırıldığı Anda Ortasına Uygulanan En Büyük Yük Kuvveti
<i>L</i>	: Mesnet Silindirleri Arasındaki Uzaklık
R_c	: Basınç Dayanımı
R_f	: Eğilme Dayanımı
m_a	: Numunenin Havadaki Kütlesi
m_{st}	: Numune Kefesinin Görünür Kütlesi
m_w	: Suyu Batırılmış Numune Kütlesi
ρ_c	: Numunenin Birim Kütlesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, günümüz yapı teknolojisinde en sık kullanılan, kolay üretilen ve bileşenleri kolay temin edilebilen, ekonomik bir malzeme olmasına karşın, özellikle yük altındaki davranışının ve mekanik özelliklerinin tam anlaşılamamış olması sebebiyle üzerinde yoğun çalışmaların hala sürdürüldüğü bir malzemedir. Beton basınç etkisi altında gösterdiği başarımı, eğilme ve çekme kuvvetleri etkisi altında gösterememektedir. Ayrıca yüksek süneklikten yoksundur. Araştırmacılar, betonun bu mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için uzun yıllardan beri kapsamlı çalışmalar yapmaktadır. Bu çabalar doğrultusunda farklı malzemelerle beton ve elemanlarının donatılması uygulamaları yapılmıştır. Polipropilen, cam, karbon vb. lif donatılı betonlar da bu çalışmalar kapsamında ele alınabilir. Lifleri betona katmakta ki temel amaç, çekme ve eğilme yüklerine karşı dayanımı artırmak ve çatlakların oluşumunu engellemektir (Harris, 1999; Jackson ve Dhir, 1996). Lifler antik çağlardan beri güçlendirme malzemesi olarak kullanıla gelmiştir. Tarih boyunca at kuyruğu, saman ve sisal lifi harçlarda ve kil tuğlalarda takviye için kullanılmıştır (Yetgin vd., 2008). Polipropilen (PP) türü polimer liflerin sünekliği darbe dayanımını ve eğilme dayanımını arttırdığı büzülme çatlaklarını da engellemeye yardımcı olduğu bilinmektedir (Hannant, 1978; Mindess 1993; Turanlı, 2004; Cengiz ve Choi ve Yuan, 2005; Han , 2005; Song, 2005; Banthia ve Gupta, 2006; Mehta ve Monteiro, 2006; Tonoli. 2011).

Polimerler, metalik olmayan (genellikle organik), yüksek moleküler ağırlığa sahip, zincirli yapıda bir malzemedir. Homopolimer, her halkası aynı türe sahip zincir yapıda polimerdir. Bu çalışmada kullanılan homopolimer, polipropilen türü liftir. Kopolimer ise iki veya daha fazla farklı halka içeren molekül zinciridir. Bu çalışmada kullanılan kopolimer polipropilen-polietilen karışımı makrosentetik bir liftir. Aramid lif terimi aromatik poliamid lif teriminin kısaltmasıdır. Bunların molekül zincirleri lif boyunca dizilmiştir ve hidrojen bağı sebebi ile enine çekme dayanımları çok düşüktür (NRC, 1994; Bhargava, 2004; Sawyer, 2008).

Yangına veya herhangi bir yüksek sıcaklığa maruz kalma betonun veya çimento harcının mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Betonun veya çimento

harcının boşluk yapısında değişimlerin meydana gelmesi kavlanma ve çatlamların oluşması çimento hamuru ve agregalar arasındaki aderansın zarar görmesi ve sertleşmiş çimento hamurunun bozulması bu etkilere örnek olarak verilebilir (Georgali ve Tsakiridis, 2005). Bu durum beton bileşenlerinin ısı uyumsuzluğu denen ve iki mekanizma sonucunda oluşabilen bir olgudur; buhar basıncı oluşumu mekanizması (Harmathy, 1964; Anderberg, 1997) ve kısıtlanmış ısı genleşme mekanizması (Bazant and Kaplan, 1997; Ulm et al., 1999) yüksek dayanımlı betonun normal beton ile kıyaslandığında daha düşük olan geçirimsizliği sebebi ile buhar basıncına karşı daha zayıf olduğu düşünülmektedir (Diederichs ve Jumppanen, 1992; Sanjayan ve Stocks, 1993; Noumowé ve diğerleri, 2009). Yüksek dayanımlı beton, yoğun mikro yapısı sebebi ile sıvı ve gaz halindeki suyun bünyeden uzaklaşmasını engeller. Isı uyumsuzluğun sonucunda genleşen agrega ve büzülen çimento hamuru arasında ısı gerilmeler oluşur. Agrega ve onu çevreleyen çimento hamurunun arasındaki aderans azaldığından kırılmalar meydana gelir ve beton dayanım kaybeder (Cülfik ve Özturan, 2010; Venecanin, 1990). Birçok çalışma (ACI 544.1R, 1996; Do ve Springer, 1983; Kalifa ve diğerleri, 2001; Nishida ve diğerleri, 1995; Noumowé, 2003; Xiao ve Falkner, 2006; Zeiml ve diğerleri 2006) göstermiştir ki betonun ısı duraylılığı polimer lif katkısıyla geliştirilebilmektedir.

Polimer lifler yaklaşık olarak 160-170 °C’de eridiği için geniş kanallar oluştururlar. İlave gözenekler ve eriyen polimer lifler tarafından oluşturulan küçük kanallar betondaki iç buhar basıncını düşürerek kavlanmayı azaltabilir. Eriyen polimer liflerin yol açtığı ek gözenekler, betonların artan mekanik performansının düşüşüne yol açabilir. Betonun kavlanma direnci, polimer liflerin türü ve uzunluğu ile ilişkilidir. Örülerek kalınlaştırılmış lifler tekil liflere göre kavlanmaya daha dirençli bir hamur yapısı oluştururlar. Bu örülü liflerin çapının diğerine göre daha büyük olmasından kaynaklanır (Won vd., 2010).

Yukarıda bahsedilen çalışmalar genelde polimer bir lif olan polipropilenle ilgilidir. Bununla birlikte, bu çalışmada AR gibi inşaat endüstrisi için yaygın olmayan yanmaz bir polimer lif de incelenmiştir.

1.2. Genel Donatı Türleri

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 liflerle atkuyruğu ve yelesi gibi hayvansal liflerin, kılların kullanılması, asbest lifleri gibi inorganik malzeme kullanılarak çimento bağlayıcılı malzemelerin donatılması herkesçe bilinen örneklerden birkaçıdır.

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, teller, 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 lif fazının E-Modülü değerlerinin birbirine yakın olması halinde, lif fazı taşımaya yeterince katılamamakta ve dolayısıyla kompozit amaçlanan özelliklere sahip olamamaktadır.

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 genleşmesi değerlerinin kompozitin yapısını bozacak düzeyde farklılık taşımaması da öngörülmektedir.

Liflerle donatılı kompozitlerde özellikle çekme, eğilme, çarpma dayanımlarında önemli artışlar olmaktadır (Tablo 1.1). Dolayısıyla bu tür kompozit malzemede, sözü edilen çekme, eğilme gibi gerilmelerin birim ağırlığa oranı da diğer malzemelere göre çok daha yüksektir.

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 dağılmış faz önemli yer tutar. Örneğin, çok önemli bir taneli kompozit olan betonda, tüm hacmin yaklaşık % 75 kadarını agrega fazı oluşturur. Özellikle, yapı açısından baktığımızda beton ve harçlarda, donatı malzemesinin oranı çok daha düşük

seviyelerde kalmaktadır. Ancak, reçine bağlayıcılı lifli kompozitlerde, bağlanan fazın oranı yine yükselmektedir.

Tablo 1.1. Liflerle donatılı betonların özelliklerinde görülen değişimler (Ersoy, 2001)

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

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, belli boyda lifler kullanılabildiği gibi, gereksinime ve koşula bağlı olarak donatı türü, kompoziti boyunca etkili olan sürekli liflerle de yapılabilir. Dolayısıyla lif boyu çok farklı olabilmektedir (Ersoy, 2001).

1.2.1.Liflerle Donatılı Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Liflerle donatılı kompozitleri, genel anlamda, 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 miktarlarına bağlı olarak etkilenebilir. 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 (Ersoy, 2001).

1.2.1.1. 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 işlevlerinin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. 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 malzemeler kullanılmaktadır (Ersoy, 2001).

1.2.1.1.1 Metal Matris Malzemeleri

Kompoziti sürekli faz olarak bir arada tutan ve bu bütünlük içinde lifle birlikte malzemenin özelliklerini belirleyen matris malzemesi olarak metaller, taşıyıcılık açısından, özellikle polimer matris malzemesine kıyasla yüksek dayanıma sahiptirler. Metal matrisli lif donatılı kompozitleri üretmek daha güç ve bunun maliyeti de çok daha yüksek olmasına karşın, metal matris malzemesi kompozitin tokluğunu önemli ölçüde artırmakta ve yüksek sıcaklık etkisindeki uygulamalara olanak vermektedir.

Metallerin matris malzemesi olarak kullanılması, yine metal olan çok ince liflerin üretilmesiyle başlamıştır. Daha önce üretilen cam lifi, polimerlerin donatılmasında başarılı kullanılsa da, akışkanlık özelliği nedeniyle yükselen sıcaklıklarda taşıyıcılığını kaybetmektedir. Bu nedenle, çok ince alüminyum oksit lifler (Al_2O_3) üretilinceye kadar, metal matrisli kompozit üretimine gidilmemiştir.

Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak, bakır, alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi metaller başta gelmektedir. Matris malzemesi ergimiş halde, moleküler

yapıda, levha veya ince tabaka şeklinde olabilmekte ve kullanılan üretim teknolojisine bağlı olarak dökme, karıştırma, presleme, elektroliz yoluyla kaplama, haddeleme yöntemleriyle liflerle birleştirilmektedir. Bu birleştirme ve kompoziti oluşturma işleminde en önemli nokta, donatmada kullanılacak olan yüksek dayanımlı lif, tel ve kılların zedelenmemesi, tahrip olmaması, dolayısıyla özelliklerinin bozulmamasının sağlanmasıdır (Ersoy, 2001).

1.2.1.1.2. Polimer Matris Malzemeleri

Liflerle donatılı kompozitlerde en çok kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Bu malzemeye günlük dilde ‘plastikler’ de denilmektedir.

Malzeme olarak polimerler içyapılarına göre ‘Termoplastikler ve Termosetler’ olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak her iki gruba giren malzeme de kullanılmaktadır.

Termoplastikler, düz veya dallı zincirlerden yapılmış maddelerdir. Zayıf, bir yapıya sahip olup, Van der Valls bağlarıyla bağlanarak oluşmuşlardır. Yanal bağların zayıflığı nedeniyle, bu gruba giren malzemeler yükselen sıcaklık karşısında yumuşamaktadır. Sıcaklık azalınca malzemede yeniden sertleşme görülür. Sıcaklık etkisine bağlı bu yumuşama, sertleşme özelliği, malzemenin yapısının buharlaşmayla bozulmadığı sürece devam etmektedir.

Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahip oldukları için, matris malzemesi olarak kullanıldıklarında, uygulamada matrisle lif fazı arasındaki bağların kurulması termoset malzeme grubuna göre daha zor olmaktadır. Ayrıca, termoplastiklerin yükselen sıcaklık karşısında yumuşaması nedeniyle, bu malzemenin kullanım sıcaklığı seviyesi de düşüktür. Akrilikler, karbon esaslı plastikler, poliamidler ve PVC gibi vinil esaslı plastikler bu gruba girmektedir.

Termosetler, monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlar sonucunda yanal bağlarla birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelen malzemelerdir. Kovalent bağlarla, üç boyutlu olarak bağlanmış oldukları için oldukça rijit bir yapıya sahiptirler.

Üretimleri sırasında gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonu geriye dönüşlü olmadığından, termoset grubundaki maddelerin tekrar ısıtılarak yumuşatılmaları ve şekillendirilmeleri mümkün değildir. Fenolik reçineler, polyester, silikon, alkid ve epoksi reçineler bu gruba girmektedir (NRC, 1995; Ersoy, 2001; Saçak, 2010).

1.2.1.1.3. Matris Malzemesi Olarak Harç ve Betonlar

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 malzemesiyle birlikte genellikle süreksiz donatı oluşturan belirli boyda lifler kullanılmakta ve bunlar kompozit içinde gelişigüzel dağılı olacak şekilde katılmaktadır. 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 ve örgü lif kullanılması halinde ise, donatı bir yönde ve sürekli olmaktadır (Ersoy, 2001; Çavdar, 2012).

1.2.1.1.4. Çimento Bağlayıcılı Matris Malzemeleri

Çimento bağlayıcı kullanılarak üretilen liflerle donatılı kompozitler, çimento hamurunda agrega bulunup bulunmamasına ve agrega varsa bunun boyutlarına bağlı olarak, çimento hamuru, harç ve beton adlarıyla üç grupta toplanmaktadır.

1.2.1.1.4.1. Çimento Hamuru Matris

Çimento hamurunun matris olarak kullanıldığı başlıca malzeme çimento asbest kompozitlerdir. Bu malzeme, doğrudan doğruya, çimento hamurunun değişik yöntemlerle asbest lifleriyle donatılmasıyla elde edilmektedir.

Bilindiği gibi, çimento hamuru yüksek büzülme özelliği sebebiyle tek başına kullanılabilir niteliğe sahip olmayan, ancak harç ve beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan bir malzemedir.

Çimento ve lif kompozitlerinin uzun yıllardan beri üretilen en önemli türü olan çimento asbest kompozitler, ana maddeler olarak çimento, su ve asbest liflerinden üretilmektedir. Çimento hamurunun asbest lifleriyle donatılarak pekiştirilmesi yoluyla ince, levha şeklinde malzeme üretilmesi şeklindeki ilk uygulamalar XX. yüzyılın başında gerçekleşmiş ve bu alanda ilk patent 1900 yılında Avusturya'da alınmıştır. Bu patent, asbest liflerinin yanı sıra, bunun yerini tutabileceği düşünülen cam elyafını da kapsamına almaktadır. Çimento matris içinde asbest lifleri, üretimin özeliğine göre, ağırlıkça % 9 ile % 30 oranları arasında kullanılmaktadır.

Çimento matrisli lif donatılı kompozitler, özellikle de çimentoyla mükemmel uyum sağlayan asbest lifli kompozitler, atmosfer koşullarına ve korozyona dayanıklı, zamanla bozulmayan, çürümeyen, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerdir. Kompozitin çekme dayanımı; lif oranı, malzemenin yoğunluğu ve yüklemenin yönü gibi faktörlere bağlı olarak 10 MPa ile 25 MPa arasında, eğilme dayanımı da 30 MPa ile 60 MPa arasında değişmektedir.

Çimento hamurunun donatılmasında ve diğer çimento bağlayıcılı lif donatılı kompozitlerin üretiminde, cam lifi donatı kullanımı, çimentonun oluşturduğu alkali ortamda zamanla camın tahrip olması nedeniyle çok kısıtlı kalmıştır. Günümüzde, alkali ortama dayanıklı cam liflerinin üretilmesiyle (AR-cam lifleri, Cem-Fil) cam liflerinin de çimento ve çimento bağlayıcılı matris malzemesinin donatılmasında kullanıldığı görülmektedir.

1.2.1.1.4.2. Çimento Harcı ve Betonları

Çimento bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonlar da değişik niteliklere sahip liflerle donatılmaktadır. Harçlar ve beton, çimento bağlayıcı ve çeşitli agregalar kullanılarak üretilen kompozit malzemelerdir. Genelde, çimento hamurunun hacim kararsızlığı nedeniyle, asbest lifli çimento hamurları dışındaki tüm çimento ürünleri agrega katılarak üretilmektedir.

Taneli kompozit malzeme diye adlandırılan bu malzemenin değişik özelliklere sahip lifler ve tellerle donatılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini hedef alan birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara halen de devam edilmektedir. Liflerle donatılı harçlar ve betonların özelliklerinin araştırılmasında, genelde, kompoziti oluşturan bağlayıcı malzeme, taneli malzeme ve lifli malzeme gibi çeşitli fazlar tek tek dikkate alınmazlar.

Dolayısıyla malzeme "çok fazlı kompozit malzeme" olarak değil, matris olarak bağlayıcı harç fazı ve dağılı donatı fazı olarak da lif fazından oluşan "iki fazlı kompozit malzeme" olarak ele alınmaktadır.

Çimento harçları ve betonların donatılmasında, asbest lifi, özel cam lifleri, çelik teller, polipropilen gibi polimer yapıları lifler, karbon lifleri ve selüloz, sisal, hindistancevizi lifleri gibi değişik bitkisel lifler kullanılmaktadır. Dolayısıyla matrisin ve kullanılan lifin özelliklerine göre de çok değişik niteliklere sahip kompozitler üretilmektedir. Ayrıca, harç matris içinde sürekli örgü tel donatı kullanılarak yapılan ferrocement de bu gruba giren özel bir malzemedir.

1.2.1.2. 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. Konuyla ilgili yayınlarda liflerle ilgili kesin bir tanım yer almamaktadır. Genellikle yapılan tanımlarda lif malzemenin çapı ve boy/çap oranı belirleyici bir kıstas olarak kabul edilmektedir ve bu değer H_f narinlik oranı diye de adlandırılmaktadır. Ancak yine de lifin belirli bir boyuttan ince 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 ($L/d > 10$) olması, lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm²'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. 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 olamamaktadır.

1.2.1.2.1. Karbon Lifler

Karbon liflerinin yoğunluğu, kullanılan hammadde ve işlem sıcaklığına bağlı olarak 1.6-2.2 g/cm³ arasında değişiklik göstermektedir. Karbon lif üretiminde kullanılan hammadde yoğunluğu ise 1.14-1.19 g/cm³ arasında değişmektedir. Elde edilen lif modülündeki artış grafitizasyon sıcaklığının artışı ile artmaktadır. Karbon liflerinden yapılmış kompozitler çelik konstrüksiyonlarda 5 kat daha dayanıklı ve 1/5 ağırlığındadır.

Aynı şekilde karbon lifler alüminyum konstrüksiyonlarda 7 kat daha dayanıklı iken, 2 kat daha sert ve 1.5 kat daha hafiftir. Karbon liflerinin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir.

Uygun reçine ile kaplandığı zaman elde edilen kompozitin korozyona direncinde de artış gözlenebilir. Katran esaslı karbon liflerinin elektriksel iletkenliği bakırdan 3 kat daha fazladır. Karbon lifleri kolaylıkla erimedikleri için yüksek sıcaklıkların olduğu uçak frenlerinde ve roketlerde kullanılmaktadır. Karbon liflerinin özelliklerini dikey ve yatay olarak kristalitlerin mikro yapıdaki yerleşimi etkilemektedir. Kurdela benzeri kristalitler az veya çok eksenine paralel şekilde yerleşmiştir. Yatay düzlemde karbon lif yapısında bulunan grafen tabakalar soğan katmanları gibi görünmektedir. Lifin orta kısmı rastgele yerleşmiş durumdadır.

1.2.1.2.2. Polipropilen Lifler

Polipropilenden (PP) üretilen lifler oldukça yüksek dayanımları, alkali ortama çok iyi direnç göstermeleri ve düşük fiyatlarıyla önemli bir donatı malzemesi özelliğini taşımaktadır. En önemli kullanım alanı çimento bağlayıcı kompozitlerin donatılmasıdır. Bu lifler, beton donatı malzemesi olarak ilk kez 1965 yılında Goldfein tarafından önerilmiştir.

Polipropilen lifler, genellikle kalınlığı 50 µm ile 100 µm arasında değişen elyaf tabaka halinde kullanılmaktadır. Malzemenin ergime sıcaklığı 165 °C olup, malzeme 100 °C 'ye kadar olan sıcaklıklarda özelliklerini korumaktadır. Kısa süreler için 140 °C 'ye kadar sıcaklıklarda da kullanılabilir.

Polipropilenin uygulamada karşılaşılan sakıncalı bir yönü, düşük sıcaklık karakteristiklerinin zayıf olmasıdır. Camsı geçiş sıcaklığı ~-20 °C 'dir. Lifler yapı itibarıyla birçok kimyasal maddeye karşı direnç göstermektedir. Özellikle alkali direncinin iyi olması, malzemenin beton ve harçlarda donatı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. (Şekil 1.1).

Polipropilen, güneş ışınları ve oksijenden etkilenmektedir. Malzemenin, mor ötesi ışınlardan ve oksidasyondan korunması için üreticiler çeşitli önlemler almaktadırlar. Polipropilen liflerinin E-modülü, gerilme altındaki şekil değişikliğine bağlı olarak 1 kN/mm² ile 8 kN/mm² arasında değerler almaktadır. Bu değer, matris malzemesi olan beton ve harçların 20-30 kN/mm² mertebelerindeki E-modülü değerinin çok altında

kalmaktadır. Buna rağmen, polipropilen liflerin katılmasıyla çimento bağlayıcılı kompozitlerin özellikle çarpma dayanımı yükselmekte ve tokluğu artmaktadır (Bhargava, 2004; Ersoy, 2001; NRC, 1994; Saçak, 2010; Sawyer. 2008).



Şekil 1.1. Polipropilen lif

1.2.1.2.2.1. Polipropilen Liflerin Sınıflandırılması

Polipropilen elyafları %100 polipropilenden F ve M olmak üzere iki türde imal edilmektedir. F-fibrilize elyafları, M- multiflament elyafları temsil etmektedir. M tipi elyaflar çok ince olup şap yüzeyinde gözükmediklerinden iç mekân şapları için iyi sonuçlar sağlarlar. F tipi lifler ise endüstriyel zemin uygulamalarında ve ağır hizmet zeminlerinde durabilite ve tokluk aranan şap ve betonlar için daha uygundur (Tablo 1.2).

A. Homopolimer Polipropilen (HPP) Lifler

Sadece propilenin tepkimesinden elde edilir. Homopolimer PP düşük sıcaklıklarda gevrek hale geldiği için düşük sıcaklık uygulamalarında tercih edilmez. Bu tür PP enjeksiyon ve şişirme kalıplamaya uygun bir malzemedir.

HPP; koli bandı, elektriksüpürgesi parçaları, oyuncak, keçeli kalem, TV kasası, araba tamponu, direksiyon parçaları, benzin deposu, kaset, şişe kapağı, elektrik düğmesi ve prizleri gibi parçaların üretiminde geniş bir kullanım alanına sahiptir (NRC, 1994; Bhargava, 2004; Sawyer. 2008).

B. Kopolimer Polipropilen (CPP) Lifler

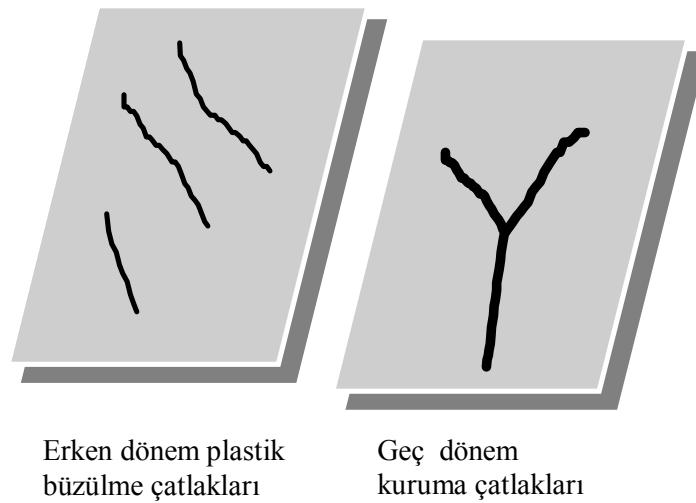
Polimerler birbirlerinden farklı özelliklere sahip olabilirler, bir polimerdeki özelliklerin dışında o polimerde başka bir polimerde olan özelliğin oluşması amacıyla bu iki polimerin monomerlerini birleştirerek yani polimer sentezleyerek bu iki polimerin özelliklerini taşıyan yeni bir polimer sentezlemiş olunur. Bu yeni polimer kopolimer olarak adlandırılır (NRC, 1994; Bhargava, 2004; Sawyer. 2008).

1.2.1.2.2. Polipropilen Liflerin Teknik Özellikleri

Beton veya sıvada polipropilen lifli betonun en önemli etkisi, sermeden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzölmelerden dolayı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır (Şekil 1.2). Polipropilen lifler çelik liflere nazaran betonun mekanik mukavemetini arttırmada çok etkili olmazlar. Yine de az da olsa enerji yutma özelliği kazandırır. Segregasyonu (ayrışmayı) azaltır, betona tokluk kazandırır, geçirimsizleştirir, darbe dayanımını artırır, aşınma mukavemetini artırır, asit ve bazlardan etkilenmez.

Polipropilen lifler donatının korozyonunu ve paslanmasını geciktirir, betonun dağılmasını önler. Yapılar depremde az hasar görür ve çökme riskini azaltır. Yüzey tozumasını ve pullanmasını engeller, kimyasallara karşı dayanımı artırır.

Çatlaklardan su ve diğer zararlı sıvıların, kimyasalların beton içine nüfuz etmesi azalır, donatı korozyonu geciktirilir, yüzey kalitesi düzelir, ufalanma ve parçalanma görülmez.



Şekil 1.2. Betonda görölen erken dönem ve geç dönem çatlakları

Yer çekimi etkisi ile betonlar daha sıvı fazda iken agregalar dibe çökmeye başlar. Özellikle vibrasyon ile sıkıştırma yapılıyorsa bu etki daha da artar. Ancak polipropilen lifler agregaların dibe çökmesini ve betonun yüzeyinde zayıf karakterli bir tabakanın oluşmasını engeller. Bu tabakanın engellenmesi tozuma, ufalanma, pullanma, parçalanma, kırılma, aşınma ve çatlama problemlerini ortadan kaldırır (Ersoy, 2001; Saçak, 2010).

Tablo 1.2. Polipropilen liflerin teknik özellikleri

Tip	Fibrilize	Multiflament
Polipropilen(%)	100	100
Ürün Tipi	Standart F	Standart M
Yoğunluk (kg/lt)	0.91	0.91
Kesit	Karesel	Yuvarlak
Kalınlık (μ)	36	18
Renk	Transparan	Transparan
Görünüm	Görünür	Görünmez
Gerilme Dayanımı (N/mm ²)	500	700
Young Modülü (N/mm ²)	7161.2	7161.2
Uzama (%)	Maksimum 10	Maksimum 100

1.2.1.2.2.3. Polipropilen Liflerin Kullanım Alanları

Polipropilen lifler farklı amaçlara yönelik farklı kullanım alanlarına sahiptirler. Kullanım alanlarındaki yaygınlıkta en önemli parametre maliyet ve kolay elde edilebilir olmasıdır. Hafif olması, aderansa katkısı, çatlakları önlemedeki üstünlükleri kullanım alanını daha da yaygın kılmıştır (Tablo 1.3).

Tablo 1.3. Polipropilen liflerin başlıca kullanım alanları

PP liflerin kullanım alanları	
Garaj kaplama betonları	Saha ve endüstriyel zemin betonları
Park alanları	Dış, kaba ve ince sıva uygulamalarında
Ambar ve depo alanları	Taşıyıcı sistem (kolon, kiriş) betonlarında
Yerden ısıtma şaplarında	Koruma şaplarında
Serpme sıvalarda	Püskürtme betonlarda
Anti bakteriyel beton üretiminde	Pompa beton ve harçlarında
Prekast eleman üretiminde	Tamir ve dolgu harçlarında
Sismik hareketlere karşı	Tali donatı gereken her yerde
Kütle ve diyafram betonunda	Radye temel ve hatıl dolguları üretiminde

Sentetik liflerin zaman içerisinde türleri artmış ve hızla farklı alanlarda yün, pamuk, doğal ipek, keten, gibi doğal liflerin yerini almıştır. Poliesterler ve olefin (polietilen, polipropilen) lifleri önemi artan liflerdir ve poliester lifler dünya sentetik lif üretiminin yarısından fazlasını kapsamaktadır. Kullanım anındaki etkileri Tablo 1.4’te verilmektedir (Ersoy, 2001;Saçak, 2010).

Tablo 1.4. Polipropilen liflerin uygulama zamanlarına göre etkileri (Saraç, 2010)

Plastik (SIVI) dönemde	Sertleşme (KATI) döneminde	Uygulama esnasında
Betondaki rötre çatlaklarını azaltır	Beton tokluğunu artırır	Uygulaması kolay ve güvenlidir.
Plastik büzülme çatlaklarını azaltır	Beton sünekliğini artırır.	İlave işçilik gerektirmez
Plastik ayrışma çatlaklarını azaltır	Beton darbe dayanıklılığını artırır.	Beton döküm ve yerleştirmesini hızlandırır
Ayrışmayı (segregasyon) azaltır	Beton yüzey aşınma direncini artırır.	Kendinden yayılan beton tasarımına uygundur.
Beton geçirimini azaltır	Taşıyıcı donatının paslanmasını geciktirir	Asit ve bazlardan etkilenmez.
Beton tutunmasını artırır	Parçalanma direnci sağlar	Çimento ile uyumludur.
Kayar kalıpta şişme düşer	Beton yorulma direnci artar	
	Beton işletme ömrü artar	
	Deprem dayanıklılığına yardım eder	
	Kimyasallara dirençlidir	
	Yüzey pullanması ve tozuması oluşmaz	
	Donma– çözünme çevrimine dirençlidir	

1.2.1.2.3. Aramid (Kevlar) Lifler

Aramid terimi “aromatic polyamide” in kısaltılmışıdır. Aramid lifler yüksek performanslı yapay sentetik elyaflardır. Aramidlerin molekülleri, katı polimer zincirleri tarafından güçlü hidrojen bağları ile bağlanarak karakterize olmuştur. Poliamid ailesine verilen isim ”Naylon”dur. Poliamid, peptid bağları tarafından bağlanmış monomerler içeren bir polimerdir. Düşük yoğunluk ve yüksek dayanıma sahiptir. Aromatik yapı zincirinin katılığını artırdığı için erimezler. Bu yüzden aramidler çözültiden elde edilirler

(Philips, 1989). Organik kimyada “aromatik” kelimesi benzen ve benzene yapısal olarak benzeyen bileşikler için kullanılmaktadır

Aramidin kimyasal yapısı, amid (-CO-NH-) bağlarının minimum % 85’i doğrudan iki aromatik halka arasına bağlanmış sentetik poliamid şeklindedir. Moleküler yapısı hemen hemen tamamen trans yapıda olduğundan ve cips yapıya dönmesi mümkün olmadığından, aramid lifin spesifik çekme mukavemeti çelikten yaklaşık 5 kat daha fazladır. Poliamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. Yüksek düzeyde yönlendirilmiş olan bu polimer, düşük yoğunluk ile yüksek modül ve yüksek düzeyde yapışma özelliği ile yüksek mukavemet/ağırlık oranını üründe bir araya getirmektedir. Mukavemet ve modül değerlerinin yanı sıra, liflerin kolaylıkla ıslatılabilmesi ve üründe darbe dayanımı özellikleri dolayısı ile yaygın olarak kullanılan reçinelerin çoğunluğu ile kullanılabilir. Aramid elyafının negatif ısı genleşme katsayısından dolayı, ısı yayılmanın önem taşıdığı ortamlarda fayda sağlamaktadır (NRC, 1994; Bhargava, 2004; Sawyer, 2008).

1.2.1.2.4. Cam Lifi

Cam lifleri veya diğer bir deyişle cam elyafı, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan donatı malzemelerindendir. Üstün özelliklerinin yanı sıra, ekonomik bir donatı türü olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık, temel kullanım alanı cam lif takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir (Şekil 1.3).

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 arkadaşlarının 1960’lı yılların başlarında yaptıkları araştırma ve uygulamalar ile 1964 yılında yayımladıkları bir kitap oluşturmaktadır. Ayrıca, Çin Halk Cumhuriyeti’nde de 1958 yılından başlayarak, cam liflerinin beton türünde malzemenin donatılmasında kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapıldığı bilinmektedir (Ersoy, 2001; Asokan vd., 2010).



Şekil 1.3. Cam lifi (URL-1)

1.2.1.2.5. Asbest Lifler

Asbest, lifsi yapılı doğal bir mineraldir. Esası magnezyum silikat olan, yanmazlık özelliğine sahip bu maddenin birçok türü vardır. Bu doğal maddeden elde edilen asbest liflerinin boyları, genel olarak 0.8 mm ile 19-20 mm arasındadır. Asbest liflerinin en küçük çapı 0.01 mm'ye kadar olabilmektedir ve konuyla ilgili yayınlarda bu liflerin çekme dayanımının 3000 N/mm²'nin üzerinde bulunduğu belirtilmektedir. Ancak, bu liflerden oluşan donatı malzemesinin dayanımı doğal olarak çok daha düşük düzeylerde kalmaktadır. Bu değer için yine literatürde 300 N/mm² ile 1800 N/mm² arasında değişen değerler verilmektedir.

Asbest liflerinin kimyasal direnci, özellikle alkali ortama dayanımları, bunların çimento türü bağlayıcılarla üretilen kompozitlerde çok başarılı bir biçimde kullanılabilmesi sonucunu doğurmuştur. Özellikle çimento hamuruyla kullanılan bir donatı malzemesi olan asbest ile, yapı alanında başarıyla kullanılan birçok malzeme üretilmiştir (Şekil 1.4).

Asbest liflerinin dayanımı yüksek tiplerinden biri olan crocidolite veya mavi asbest, insan sağlığı açısından olumsuz özellikler gösteren bir türdür. Bunların çok uzun süreler solunmasının veya bu lifçikleri taşıyan havanın bulunduğu bölgelerde yaşamının asbestosis denen solunum yolları hastalığına, akciğer kanserine neden olduğu ileri sürülmektedir. Benzer olumsuz etki, yaşama veya çalışma koşulları açısından yoğun olarak kömür tozu, silika tozu, arduvaz tozu gibi maddelerin etkisinde kalan kişilerde de

görülebilmektedir. Bazı araştırmacılar, ticari önemi olan tüm asbest türlerinin sağlık açısından olumsuz etkileri olduğunu ileri sürmektedirler (Ersoy, 2001).



Şekil 1.4. Asbest lif (URL-2)

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Lifler çeşitli kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yapılarıyla beton ve çimento harçlarına katılmaları halinde bu malzemelerin mekanik özelliklerine önemli katkılar sağlamaktadırlar.

Bu çalışmanın amaçları, çimento harçlarına en iyi başarıyı sağlayan lif uzunluğunun bulunması, farklı türdeki polimer liflerin çimento harçlarının mekanik özelliklerine katkısının incelenmesi ve yüksek sıcaklık etkisi altında polimer lif katkısının çimento harçlarının mekanik özelliklerine katkısının belirlenmesidir. Bu amaçlara yönelik olarak çalışma üç kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısımda lif katkı oranı (% 2.0 hacim oranında) ve malzeme özellikleri (yalnız karbon lif) sabit tutularak dört farklı boyda (5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm) lif kullanılmış ve böylece çimento hamuruna en iyi mekanik özellikler kazandıran en uygun lif boyu tespit edilmiştir.

İkinci kısımda lif boyları (10mm) sabit olan üç farklı türdeki (homopolimer polipropilen (HPP), kopolimer polipropilen (CPP) ve aramid (AR)) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Son kısımda ise lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, beş farklı sıcaklığa (21 °C, 100 °C, 450 °C, 650 °C ve 850 °C) maruz bırakılmış ve bu numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çalışmada incelenen mekanik özellikler; eğilme dayanımı, sehim ve basınç dayanımıdır. Ayrıca ince kesit resimleriyle yüksek sıcaklık altında harçta ve liflerdeki değişimler gözlemlenmiştir. Fiziksel olarak da yüksek sıcaklık altında kütleli değişimler incelenmiştir.

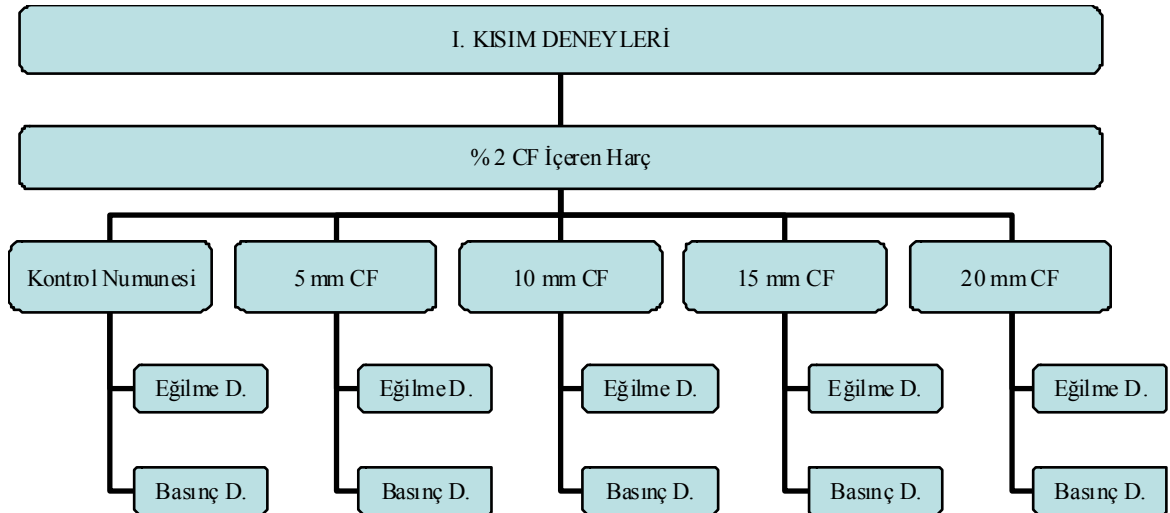
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR, YÖNTEM ve MALZEME ÖZELLİKLERİ

2.1. Deney Yönergesi

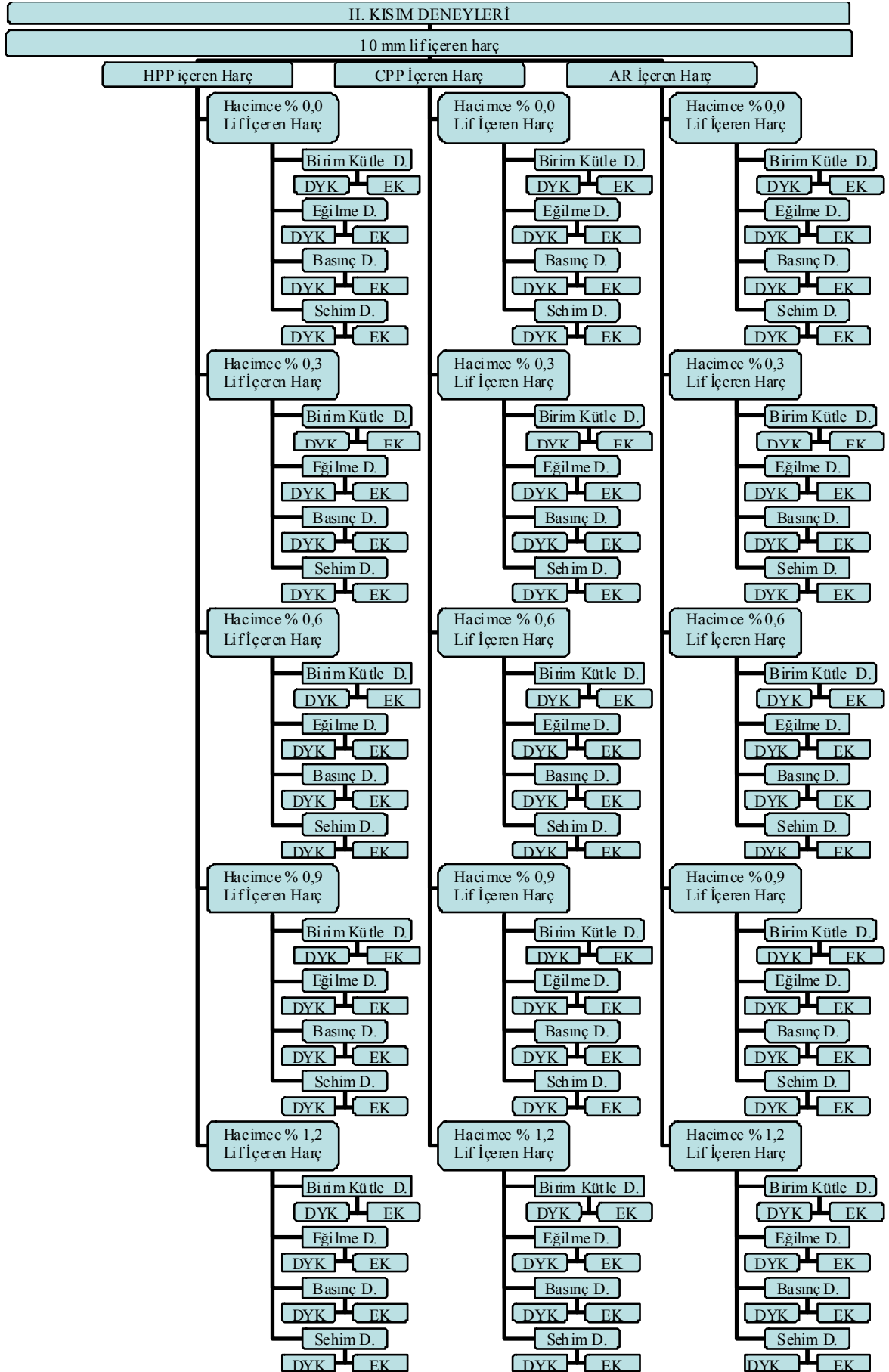
Bu çalışmanın üç temel amacına göre deney yönergesi aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır. Buna göre birinci kısımda lif katkı oranı (%2.0 hacim oranında) ve malzeme özellikleri (yalnız karbon lif) sabit tutularak dört farklı boyda (5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm) lif kullanılmış ve böylece çimento hamuruna en iyi mekanik özellikler kazandıran en uygun lif boyu tespit edilmiştir (Şekil 2.1).

İkinci kısımda lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (homopolimer, kopolimer ve aramid (kevlar)) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir (Şekil 2.2).

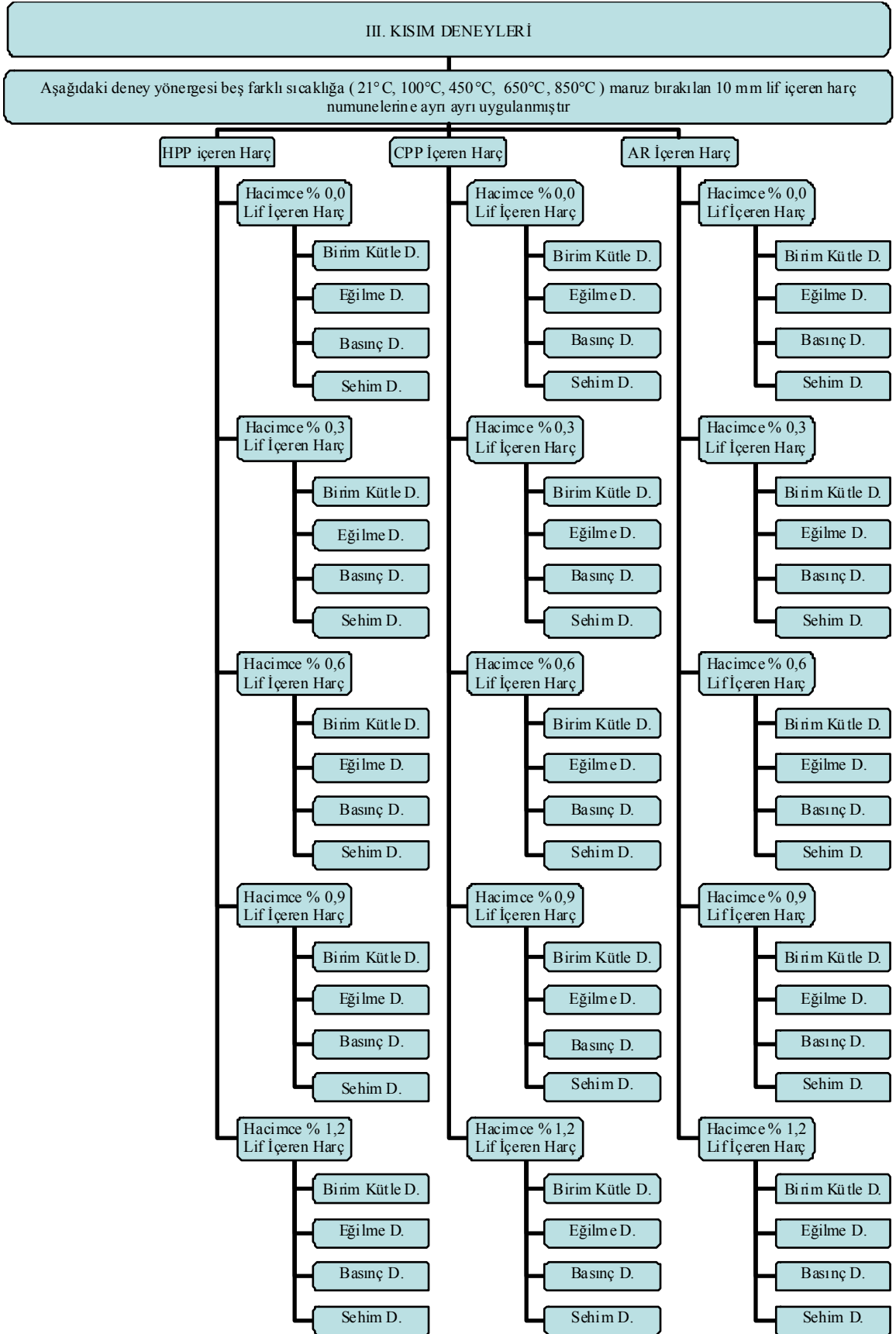
Son kısımda ise lif boyları (10mm) sabit olan üç farklı türdeki (homopolimer, kopolimer ve aramid (Kevlar)) polimer lif, beş farklı oranda (0.0%, 0.3%, 0.6%, 0.9% ve 1.2%) çimento hamuruna katılarak, beş farklı sıcaklığa (21 °C (DYK), 100 °C (EK), 450 °C, 650 °C ve 850 °C) maruz bırakılmış ve bu numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.1. I. Kısım deney yönerge şeması



Şekil 2.2. II. Kısım deney yönerge şeması 20



Şekil 2.3. III. Kısım deney yönerge şeması

2.2. Yöntem ve Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Çimento Harcının Hazırlanması

Deneyler için hazırlanan çimento harç numuneleri, TS EN 196-1 “Çimento deney metodları” standardına uygun olarak Gümüşhane Üniversitesi laboratuvarlarında üretilmiştir. Buna göre numuneler, boyutları 160 mm × 40 mm × 40 mm olacak biçimde tasarlanmış üçlü prizma kalıplara dökülmüştür.

Harcın bileşim oranları kütlece bir kısım çimento, üç kısım standart kum ve 1/2 kısım su (su/çimento oranı: 0.50) şeklindedir. Buna göre üç deney prizmasına yetecek her kalıp takımı için öngörülen karışım 450 g çimento, 1350 g kum ve 225 g sudan ibaret olmaktadır.

Deney programında yer aldığı üzere, harç numunelerine beşer farklı hacim oranlarında (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) HPP, CPP ve AR lif ilaveleri yapılmıştır (Tablo 2.1). Lif katma işlemi harca standart kumun ilavesinden hemen sonra gerçekleştirilmiş olup, karışımın tam bağdaşık bir biçimde olabilmesi için standarttaki sürelerle ilaveten 30 saniye daha yüksek hızda karıştırma işlemi devam ettirilmiştir.

Daha sonra bu bileşim, adı geçen standarda uygun olarak, özel karıştırıcı (Şekil 2.4) içerisinde 2 dakika 30 sn süreyle karıştırılır.

Tablo 2.1. Onüç farklı lif katkılı harcın karışık tasarımı

Her bir harç için sadece tek bir katkı oranı ve tek tür lif kullanıldı.				Standard Kum (g)	Çimento (CEM-I/42.5R) (g)	Su (g)	W/C
Lif oranı (% Hacim)	Lif türü kütle miktarı			1350	450	225	0.50
	HPP (g)	CPP (g)	AR (g)				
% 0.0	0.00	0.00	0.00				
% 0.3	21	21	32.5				
% 0.6	42	42	65				
% 0.9	63	63	97.5				
% 1.2	84	84	130				



Şekil 2.4. Özel tasarım çimento harç karıştırıcısı

Hazırlanan harç bekletilmeden kalıplara doldurulup sıkıştırılır. Bu işlem iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada bir miktar harç üçlü prizma kalıba konulup kalıba yayılarak, titreşim masasında yeterli bir süre (lif oranına bağlı olarak 2-5 dakika) sıkıştırılır. Daha sonra yaka kaldırılıp, kalıbın yüzeyi sıyrılarak, düzeltilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sıkıştırıldıktan sonra yüzeyi düzeltilmiş harç örneği

2.2.2. Numunelerin Deneylere Hazırlanması

Numuneler nem ortamında (23 ± 1 °C’de) 24 saat bekletildikten sonra kalıpları sökülür, bu süreç sonunda kalıplar çıkarılır ve prizmatik harç numuneleri musluk suyu ile dolu bir kür havuzunda 28 güne kadar muhafaza edilir (Şekil 2.6). Ancak standartlardan farklı olarak bu çalışmadaki numuneler 40 gün kür edilmiştir. Suyun sıcaklığı 20 ± 1 °C olmalıdır. Kür işlemi tamamlandıktan sonra eğilme ve basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Altı numune EN 196’daki Rilem-Cembureau metoduna göre her tür lif ve oranı ile her sıcaklık için ayrı ayrı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyi yapılırken sehimler de ayrıca belirlenmiştir. Karşılaştırmalarda kullanılan sehim, kırılma anında kirişlerin orta noktalarının çökme mesafesidir.

Bunlara ilaveten, harçlarda liflerin ve sıcaklık etkisinin yol açtığı iç değişiklikler petrografik olarak incelenmiştir.



Şekil 2.6. Kür havuzunda bekletilen numuneler

Deneyler sırasında numunelerin maruz bırakıldığı ifade edilen farklı sıcaklık etkileri aşağıda ifade edildiği gibidir.

21 °C (DYK): Yukarıda ifade edildiği gibi TS EN 196-1’de ifade edildiği üzere kürlenmiş numuneler, günü geldiğinde (bu çalışma için 40 gün) doymuş yüzey kuru (DYK) halde deneylere tabi tutulur.

100 °C (EK): 39 gün suda bekletilen numunelerin 39. günde sudan çıkarılarak 24 saat boyunca etüvde kurutulur ve etüv kurusu (EK) halde deneylere tabi tutulur.

450 °C: 39 gün suda bekletilen numuneler 39. günde sudan çıkarılarak 24 saat boyunca etüvde kurutulur ve etüv kurusu (EK) hale getirilir. Sonra içerisinde numune ile 6 °C’da hız ile ısınan fırın 70 dakika sonra 450 °C sıcaklığa ulaşır. Bu sıcaklıkta numune bir saat fırının içerisinde bekletildikten sonra çıkarılıp soğumaya bırakılır ve akabinde deneylere tabi tutulur.

650 °C: 39 gün suda bekletilen numuneler 39. günde sudan çıkarılarak 24 saat boyunca etüvde kurutulur ve etüv kurusu (EK) hale getirilir. Sonra içerisinde numune ile 6 °C’da hız ile ısınan fırın 100 dakika sonra 650 °C sıcaklığa ulaşır. Bu sıcaklıkta numune bir saat fırının içerisinde bekletildikten sonra çıkarılıp soğumaya bırakılır ve akabinde deneylere tabi tutulur.

850 °C: 39 gün suda bekletilen numuneler 39. günde sudan çıkarılarak 24 saat boyunca etüvde kurutulur ve etüv kurusu (EK) hale getirilir. Sonra içerisinde numune ile 6 °C’da hız ile ısınan fırın 130 dakika sonra 850 °C sıcaklığa ulaşır. Bu sıcaklıkta numune bir saat fırının içerisinde bekletildikten sonra çıkarılıp soğumaya bırakılır ve akabinde deneylere tabi tutulur.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılma denenirken, numunelerin en başta sudan çıkarılıp direkt fırına konulması tecrübe edilmiştir. Ancak numuneler DYK halde suya konulduklarında 400 °C sıcaklığa ulaştığında büyük bir gürültüyle patlayarak paramparça olmuştur. Bunun sebebi numunelerin içerisinde bulunan suyun buharlaşarak ani iç basınç oluşturması ve ortaya çıkan ani kavlanma sonucu numunenin bu basınca karşı koyamamasıdır.

Yüksek sıcaklığa çıkarılma sırasında su buharlaştıkça fırının tahliye bacasından su buharı çıkışı gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklık 350-400 °C’ye ulaştığında ise yoğun koyu bir duman çıkışı görülmüştür. Bu dumanın muhtemel sebebi kalsiyum hidroksit’in ayrışmasıdır.

2.3. Deneylerin Uygulanması

DYK ve EK koşullarında hazırlanan numuneler farklı sıcaklık koşullarında ısıtıldıktan sonra iki deneye tabi tutulmuştur. Bunlar eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleridir. Eğilme deneyi sırasında numunelerin kırılmada yaptığı sehimde ayrıca belirtilmiştir. Ayrıca deneylere başlamadan önce birim kütlelerde EK durumundaki numuneler üzerinde tespit edilmiştir.

2.3.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Boyutları 40 mm × 40 mm × 160 mm olan prizma numuneler deney aletine (Şekil 2.7) yan yüzeylerden biri üzerine ve uzunluğuna, eksenini mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde yerleştirilir. Yükleme, yükleyici silindir aracılığı ile, yan yüzünden eksenine dik olarak uygulanır ve 50 ± 10 N/s hızında artırılarak numune kırılıncaya kadar sürdürülür. İki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanım deneyine kadar ıslak bir bezle sarılarak muhafaza edilir.

Eğilme dayanımı R_f , N/mm² olarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (2.1)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı (N/mm²),

b : Prizma kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),

F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan en büyük yük kuvveti (N),

l : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

2.3.2. Sehimin Ölçülmesi

Lif katkısı ile numunelerin sehim değerlerindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla bu değerler tespit edilmiştir. Eğilme cihazı şekil değiştirme kontrol donanımına sahip olmadığından bu işlem bir dijital şekil değiştirme ölçer (ekstansometre) yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Eğilme deneyinde sehîm ölçümü

2.3.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı sonrası kırılan numunenin iki yarım parçası ayrı ayrı basınç dayanımına tabi tutulurlar. Böylece bir seferde üç kalıp halinde dökülen bir harç numunesinden altı farklı değer elde edilmiş olur. Yarım prizmalar, cihazın plakaları arasına ± 0.5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plakadan veya yardımcı plakalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilir.

Basınç aletinin çene alanı 40 mm $\times$ 40 mm'dir. Yükleme 2400 $\pm$ 200 N/s hızla, prizma kırılıncaya kadar artırılarak sürdürülür.

Basınç dayanımı R_c , aşağıdaki eşitlik (2.2) yardımıyla hesaplanır:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.2)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm²),

F_c : Kırılma anındaki en büyük yük kuvveti (N),

1600 : Plâkaların veya yardımcı plâkaların (40 mm $\times$ 40 mm) alanı (mm²)'dir.

2.3.4. Numune Kütlesinin Değişimlerinin Tespiti

Çimento harç örneklerinin, mekanik özellikleriyle ilişkisini ortaya koymak üzere bazı fiziksel özellikleri (havadaki kütle, su içerisindeki kütle, etüv kurusu kütle) belirlenirken, TS EN 12390-7 standardında yer alan ilkeler temel alınmıştır.

Numunenin havadaki kütlesi, aşağıda verilen işlem kullanılarak belirlenir.

Numune, terazinin kefesinden alınır ve nemli bez kullanılarak yüzeylerdeki su kurulanır. Numune teraziye yerleştirilir ve havadaki kütle belirlenerek (m_a), gram cinsinden kaydedilir.

Numunenin su içerisindeki kütlesi, aşağıda verilen işlem kullanılarak belirlenir.

Boş numune kefesi su içerisine tamamen batacak ancak depo tabanına değmeyecek şekilde su deposu, yukarıya kaldırılır. Numune kefesinin görünür kütlesi (m_{st}), gram olarak kaydedilir.

Suya batırılmış numune ve kefenin toplam görünür kütlesi ($m_{st} + m_w$), gram olarak kaydedilir.

Etüv kurusu kütle; numunenin 24 saat ve/veya kütlesi sabit kalıncaya kadar, fırında (etüv) 100-110 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra bulunan kütlesidir.

Numune hacmi, aşağıda verilen eşitlik (2.3) kullanılarak hesaplanır:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (2.3)$$

Burada;

$$\rho_c = \frac{m_a}{V}$$

(2.4)

V: numunenin hacmi (m^3)

m_a : numunenin havadaki kütlesi (g)

m_{st} : kefenin su içerisindeki görünür kütlesi (g)

m_w : numunenin su içerisindeki görünür kütlesi (g)

ρ_w : suyun 998 kg/ m^3 olarak kabul edilen, 20 °C sıcaklıktaki yoğunluğudur.

ρ_c : numunenin birim kütlesi (g/ cm^3)

2.4. Malzeme Özellikleri

Üç kısımdan oluşan bu çalışmanın, birinci kısmında çimento harcına en iyi mekanik özellikler kazandıran en uygun lif boyu, ikinci kısmında DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri ve son kısmında ise beş farklı sıcaklığa maruz bırakılmış çimento harçlarının mekanik özellikleri incelenmiştir.

Birinci kısımda polimer türü olmamasına rağmen, çimento hamuru ile iyi uyumu sebebiyle karbon lif kullanılarak en uygun lif boyu tespit edilmiştir (Şekil 2.8). Diğer kısımlarda ise üç farklı polimer lif türünün (HPP, CPP ve AR) (Şekil 2.9) normal ve yüksek sıcaklıklarda çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Bu lif türlerinin özellikleri Tablo 2.2’ de verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi polimer liflerin özgül kütlelerinin 0.91-1.44 g/cm³ arasında, lif çaplarının 12-750 µm arasında, uzama oranlarının %3.6-25 arasında, çekme dayanımlarının 338-2920 MPa arasında ve elastisite modüllerinin ise 1550-83000 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Aramidin genel olarak HPP ve CPP’ye nazaran daha gevrek olduğu ve karbon lifinin diğer polimer liflerinden açıkça ayrıldığı görülmektedir.

Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan liflerin özellikleri

ÖZELLİKLER	(CF)	(HPP)	(CPP)	(AR)
Özgül Kütle (g/cm ³)	1.76	0.88-0.92	0.91	1.44
Lif Uzunluğu (mm)	12	10	10	10
Lif Çapı (µm)	6.9	750	550-750	12 (Dtex:1670)
Ergime Noktası (°C)	3500	150-170	162-168	149-177
Yanma Noktası (°C)	Yanmaz	350	593	450 (kavrulma)
Alkali Direnci	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Uzama (%)	1.8	15-25	8-10	3.6
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	4200	338	570-660	2920
Elastisite Modülü (N/mm ²)	240000	1550	4700	83000



Şekil 2.8. Karbon lifi



HPP lif



CPP lif



AR lif

Şekil 2.9. Deneylerde kullanılan polimer türü lifler

2.4.1. Portland çimentosu

Portland çimentosu klinkeri, kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikatlardan ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ve $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ve geri kalanı alüminyum ve demir ihtiva eden klinker fazları ile diğer bileşiklerden oluşan hidrolik bir maddedir. Kütlece CaO/SiO_2 oranı 2.0'den az olmamalıdır. MgO muhtevası kütlece % 5'den fazla olmamalıdır (TS EN 197-1, 2002).

Deneyler sırasında Aşkale Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R türü çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 2.3'te verilmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi MgO oranı standartta belirtilen sınırın oldukça altında kalmakta ve CaO/SiO_2 oranı da istenilen şartları sağlamaktadır ($2.85 > 2.00$).

Deneyler EN 196'ya göre yapılmıştır, bu yüzden harçlarda agrega olarak CEN-standart kumu kullanılmıştır.

Tablo 2.3. CEM 42.5 R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analiz (%)		Özgül Yüzey (cm^2/g)	4050
SiO_2	21.21	Katılaşma Başlangıcı (dak.)	140
Al_2O_3	3.23	Katılaşma Sonu (dak.)	195
Fe_2O_3	1.37	Özgül Kütle (g/cm^3)	3.08
CaO	60.44	Le Chatelier Genleşmesi (mm)	2
MgO	3.51	Basınç Dayanımı (MPa)	
SO_3	2.90	1. Gün sonunda	17.8
LOI	3.34	2. Gün sonunda	28.8
Toplam	96.00	28. Gün sonunda	60.5

2.4.2. Standart kum

CEN referans kumu, tercihen yuvarlak tanecikli ve silisyum dioksit miktarı en az % 98 olan doğal silis kumu olmalıdır. Tanecik büyüklük dağılımı Tablo 2.4'te verilen sınırlar dahilinde olmalıdır. CEN standart kumu her tanecik büyüklüğüne göre ayrı ayrı veya önceden karıştırılmış deneye hazır halde 1350 g'lık torbalar içinde hazır bulunmaktadır.

Tablo 2.4. CEN referans kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2.0	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

3. BULGULAR ve İRDELEMELER

Çalışmanın amacına göre, önce farklı boyutlardaki karbon lifleri (CF) harca eklenmiştir ve en uygun lif uzunluğu bulunmuştur. İkinci olarak, farklı türde ve farklı oranda polimer lif içeren harçlar kütle özellikleri, eğilme dayanımları ve basınç dayanımları gibi özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üçüncü olarak ise yüksek sıcaklıklara maruz kalmış farklı türde ve farklı oranda polimer lif içeren harçların mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

3.1. Lif Katkısının Boy Değişiminin Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

Karbon lifin polimer liflere nazaran daha üstün mekanik özellikleri bulunmaktadır. Karbon lifi harca eklendiğinde harcın sünekliliği artar ve basınç dayanımı çok fazla düşmez (Chung, 2000; Garcés, 2005; Wang, 2008; Çavdar, 2012). Bu sebeple en uygun lif boyunu bulurken lif etkisini daha iyi görebilmek için CF oranı % 2 gibi yüksek bir değerde seçilmiştir.

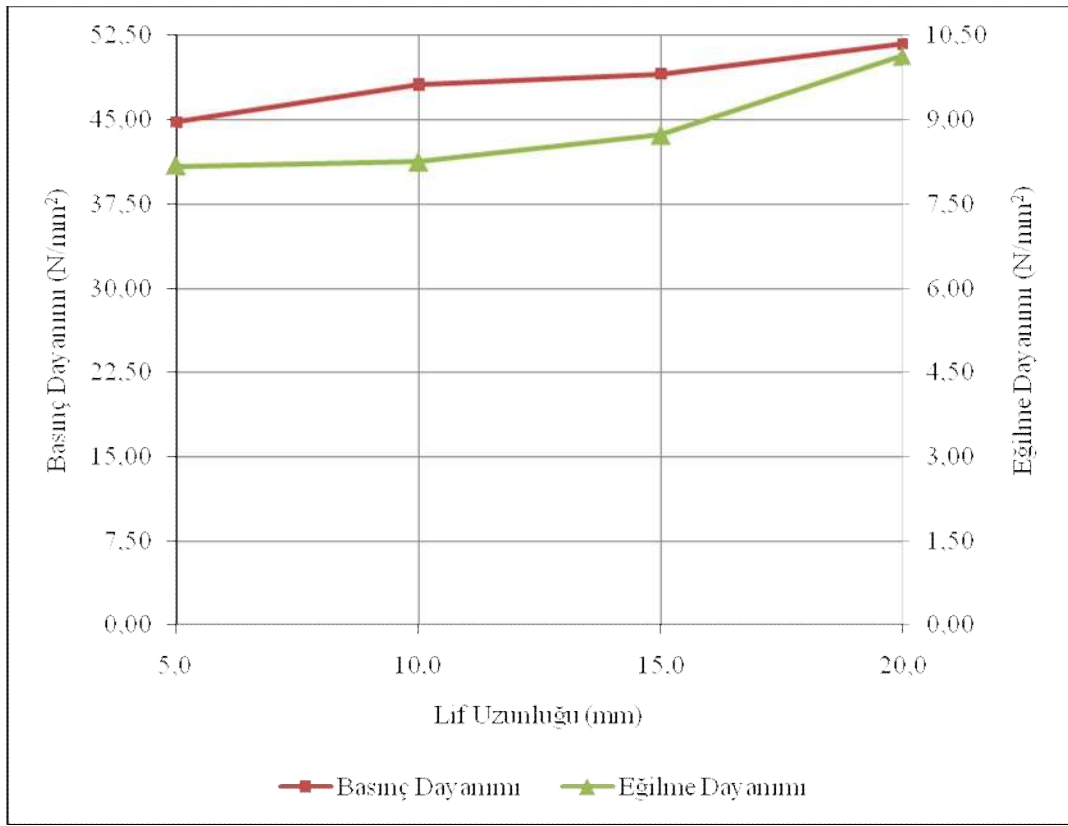
Tablo 3.1 ve Şekil 3.1’den, lif katkılı harçta hem eğilme hem de basınç dayanımının lif uzunluğu arttıkça arttığı görülmektedir. Katkılı harçlarda 5 mm uzunluktaki lifle karşılaştırıldığında, 20 mm uzunluğundaki lifin eklenmesinin eğilme dayanımını % 24, basınç dayanımını % 15 oranında artırdığı görülmüştür. bu çalışmada kullanılan karbon lif boyları arasında en iyi lif boyunun 20 mm olduğu tespit edilmiştir. Ancak karbon lifi için lif boyu 20 mm den daha fazla olması durumunda daha farklı sonuçlar elde edileceğini söylemenin mümkün olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, azami tanecik büyüklüğü 1.6 mm olan CEN standart kum agrega olarak kullanılmıştır. Bu yüzden, en uygun lif boyutu lif çapına, lif türüne ve agrega boyutuna göre değişkenlik gösterebilir.

En uygun lif boyutu 20 mm bulursa bile bu durumun malzemedan malzemeye fark edeceği açıktır. Özellikle CF ve diğer polimer türü liflerin elastisite modülleri arasındaki fark bunun açık göstergesidir. Bu sebeple ikinci ve üçüncü kısımdaki deneylerde lif boyu 20 mm değil, 10 mm alınarak deneylere devam edilmiştir

Tablo 3.1. Lif uzunluğunun eğilme ve basınç dayanımlarında meydana getirdiği değişimler.

Lif uzunluğu (mm)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
5.00	8.18	44.82
10.00	8.25	48.16
15.00	8.73	49.09
20.00	10.15	51.76

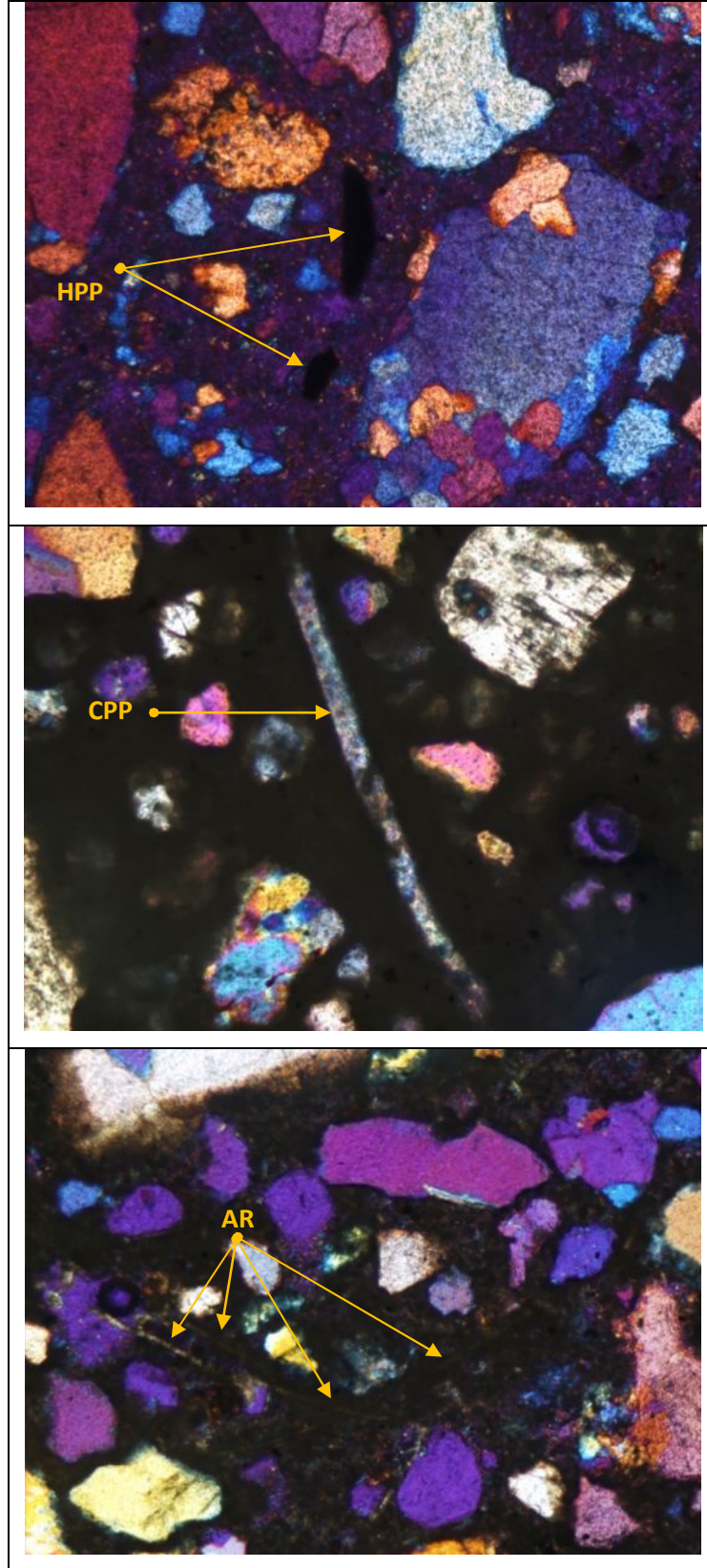


Şekil 3.1. Lif uzunluğundaki değişimle basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki

3.2. Polimer Türü Lif Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

İkinci kısımda ise HPP, CPP ve AR lif katkılarının harçların mekanik özellikleri incelenmiştir. Buna göre lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Numunelerden alınan ince kesit örneklerinde çimento hamuru ile lif türlerinin arasındaki aderans Şekil 3.2’de görülmektedir. Kesitlerde ayrıca liflerinin kalınlıkları da anlaşılabilmektedir. Görüldüğü gibi AR lifler filamentler halinde ayrışınca hamur içerisinde güçlükle ayırt edilebilmektedir.



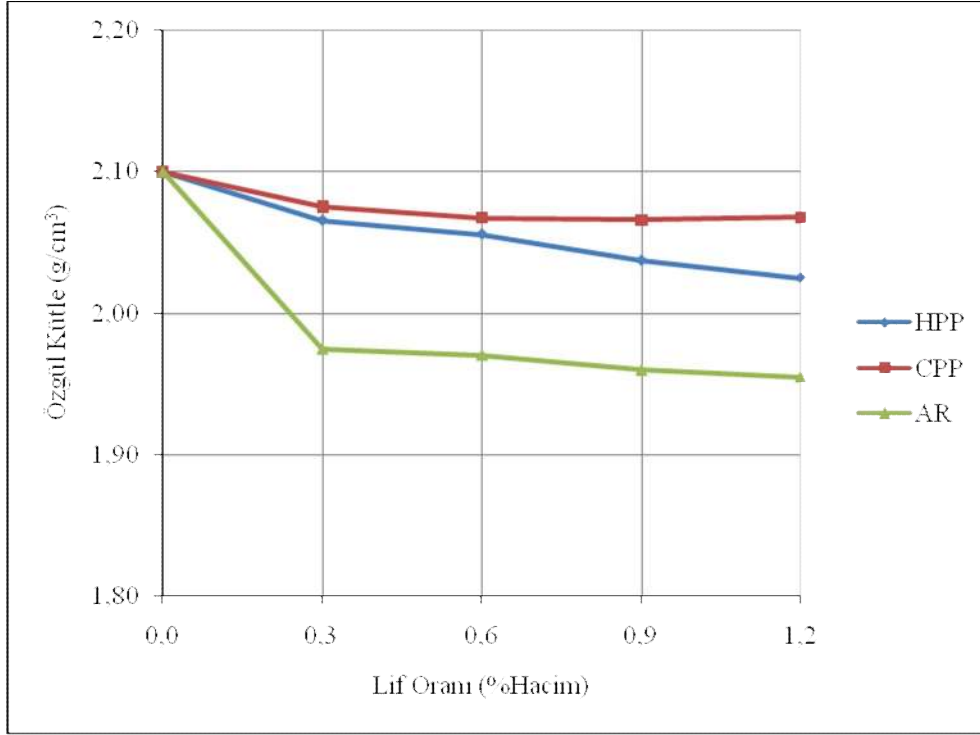
Şekil 3.2. Harçlarda kullanılan liflerin ince kesit görüntüleri

3.2.1. Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Birim Kütlelerine Etkisi

Birim kütleleri (0.91 g/cm^3) harcınkine (2.1 g/cm^3) nazaran düşük olan HPP ve CPP lifleri, harçlara eklendiğinde, harcın birim kütlesinin azalması beklenir. Şekil 3.3'te ve Tablo 3.2'de HPP ve CPP liflerinin harca ilavesiyle harcın birim kütlesinde sırasıyla %1 ve %3 oranlarında düştüğü görülmüştür. AR lifinin HPP ve CPP'den daha yüksek birim kütleye sahip olması sebebiyle harçlara ilaveleriyle harç birim kütlelerinin HPP ve CPP içeren harçlara göre daha yüksek olması beklenir, ancak AR içeren harçlar kontrol örneklerine göre % 7 daha düşük birim kütleye sahiptir. Hacimce % 1.2 HPP, CPP ve AR ilavesiyle birim kütleler sırasıyla 2.02 , 2.07 ve 1.96 g/cm^3 değerlerine düşmüştür.

Tablo 3.2. Lif katkılı harçların özgül kütlesi

Hacimce Katılan lif Oranı	Kuru Özgül Kütle (g/cm^3)		
	HPP	CPP	AR
% 0.0	2.10	2.10	2.10
% 0.3	2.07	2.08	1.97
% 0.6	2.06	2.07	1.97
% 0.9	2.04	2.07	1.96
% 1.2	2.02	2.07	1.96



Şekil 3.3. Lif oranı ve birim kütle arasındaki ilişki

3.2.2. Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Eğilme Dayanımına Etkileri

Eğer farklı seviyelerdeki (%0.0-1.2) lif miktarlarının eğilme dayanımındaki etkisi incelenirse, ıslak ortamlarda (DYK), tüm liflerin kararsız davranış sergilediği (Tablo 3.3 , Şekil 3.4) ve hiçbir harcın eğilme dayanımlarına % 2'den fazla katkısının bulunmadığı görülmüştür. Kontrol örneklerinin DYK durumundaki eğilme dayanımı 11.13 N/mm² iken % 0.6 CPP'den oluşan örneklerin 11.3 N/mm² ve % 0.9 AR'dan oluşan örneklerin de 11.3 N/mm² eğilme dayanımları tespit edilmiştir. HPP'nin ise DYK durumda harç örneklerine yükseltici yönde bir katkı sağlayamadığı görülmüştür.

EK durumundaki (Tablo 3.3, Şekil 3.5) örneklerde lifler DYK durumuna göre daha iyi performans göstermektedirler. % 0.6'lık HPP ilavesiyle bu lif için en yüksek eğilme dayanımı elde edilir. Bu orandan sonra ise bir düşüş gözlemlenmektedir. Harçların eğilme dayanımları CPP lifinin % 0.6 - % 1.2 oranları arasında artış göstermektedir. AR içeren harçlar ise % 0.9 oranındaki katılımlarıyla iyi bir başarımla göstermişlerdir. % 0.9 AR ilavesinden sonra ise açık bir düşüş gözlemlenmektedir. Fakat eğilme dayanımı hala kontrol örneğinden yüksektir. Kontrol örnekleriyle (% 0.0 lif) karşılaştırıldıklarında %

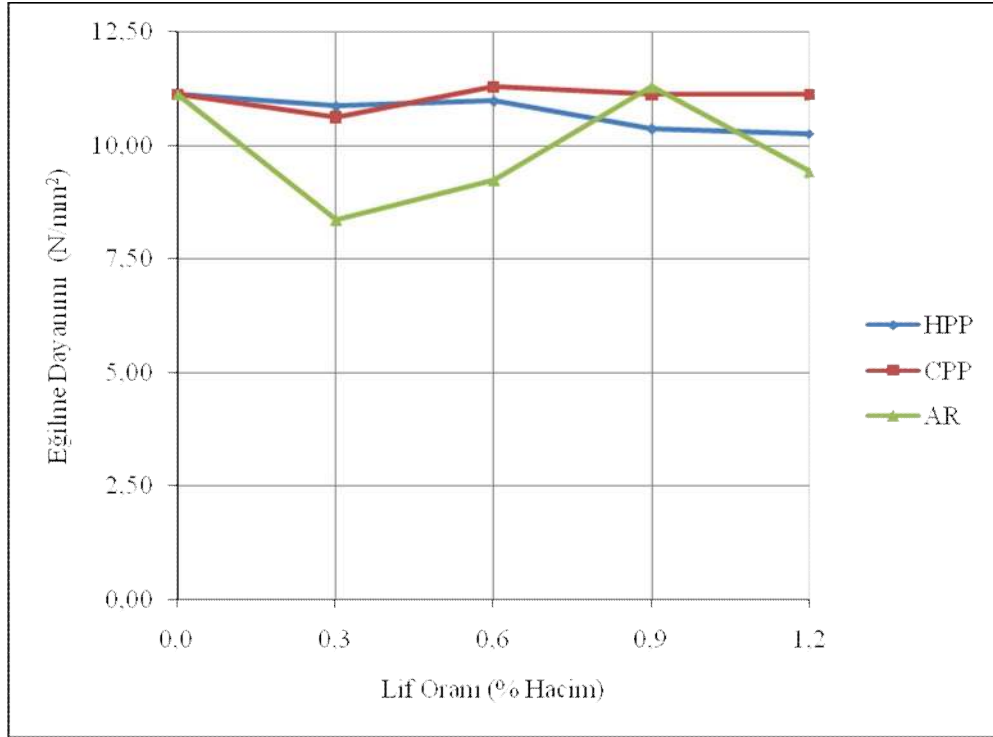
0.3-0.9 HPP, % 0.9-1.2 CPP ve % 0.6-1.2 AR miktarları daha iyi performans göstermektedir.

Buradan farklı türdeki liflerin farklı ilave oranlarında eğilme dayanımına katkıda bulunduğu anlaşılmaktadır. HPP, % 0.6 ilavede % 5'lik eğilme dayanımı katkısıyla en iyi artışı göstermektedir. CPP'de bu artış, hacmen % 1.2 lif katkısı ile % 4 olarak belirlenmiştir. AR, diğer liflere nazaran şaşırtıcı bir artış göstermektedir. Hacmen % 0.9 AR ilavesi, eğilme dayanımını % 15 dolayında artırmaktadır. Kontrol örneklerinin eğilme dayanımı, EK durumunda 11.05 N/mm^2 'dir, % 0.9 AR'den oluşan örneklerin 12.70 N/mm^2 eğilme dayanımı vardır. % 0.6 HPP olan örneklerin 11.61 N/mm^2 eğilme dayanımı bulunmaktadır. Ve % 1.2 CPP olan örneklerin 11.45 N/mm^2 eğilme dayanımı tespit edilmiştir.

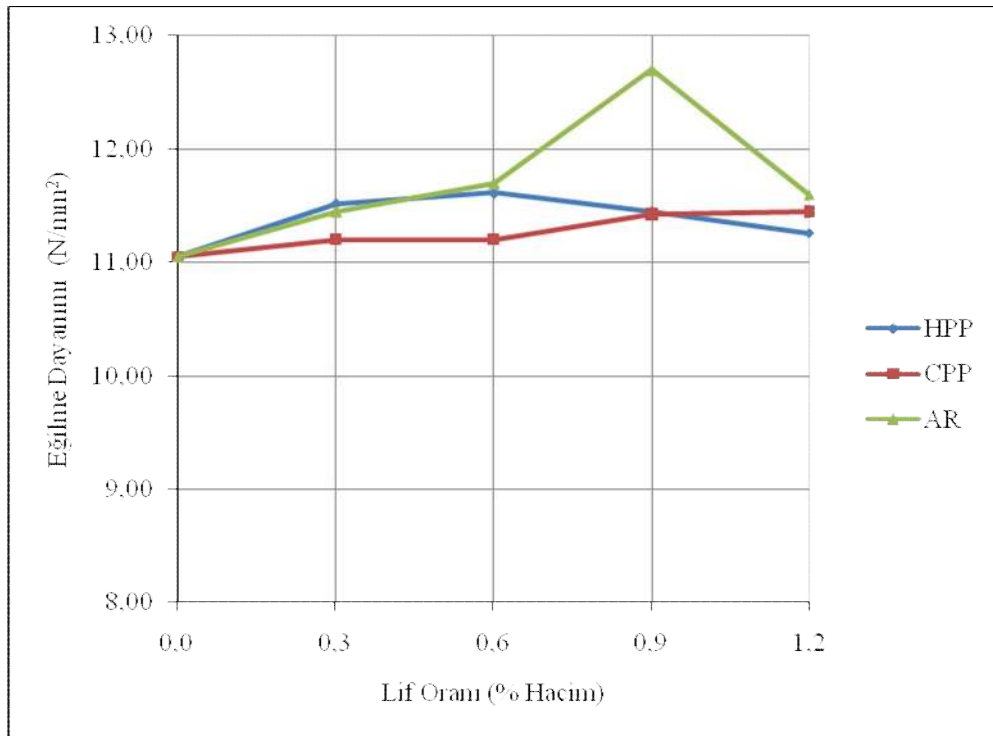
AR lifi, bu çalışmadaki en yüksek mekanik özelliklere (Tablo 2.2) sahip liftir, AR bulunan örnekler de en iyi eğilme performansını gösterirler.

Tablo 3.3. Lif katkılı harçların eğilme dayanımı

Lif Oranı (%Hacim)	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)					
	HPP		CPP		AR	
	DYK	EK	DYK	EK	DYK	EK
% 0.0	11.13	11.05	11.13	11.05	11.13	11.05
% 0.3	10.88	11.52	10.63	11.20	8.37	11.45
% 0.6	10.99	11.61	11.30	11.21	9.25	11.70
% 0.9	10.38	11.45	11.13	11.43	11.30	12.70
% 1.2	10.27	11.26	11.13	11.45	9.43	11.60



Şekil 3.4. DYK durumunda lif katkısının eğilme dayanımına etkisi



Şekil 3.5. EK durumunda lif katkısının eğilme dayanımına etkisi

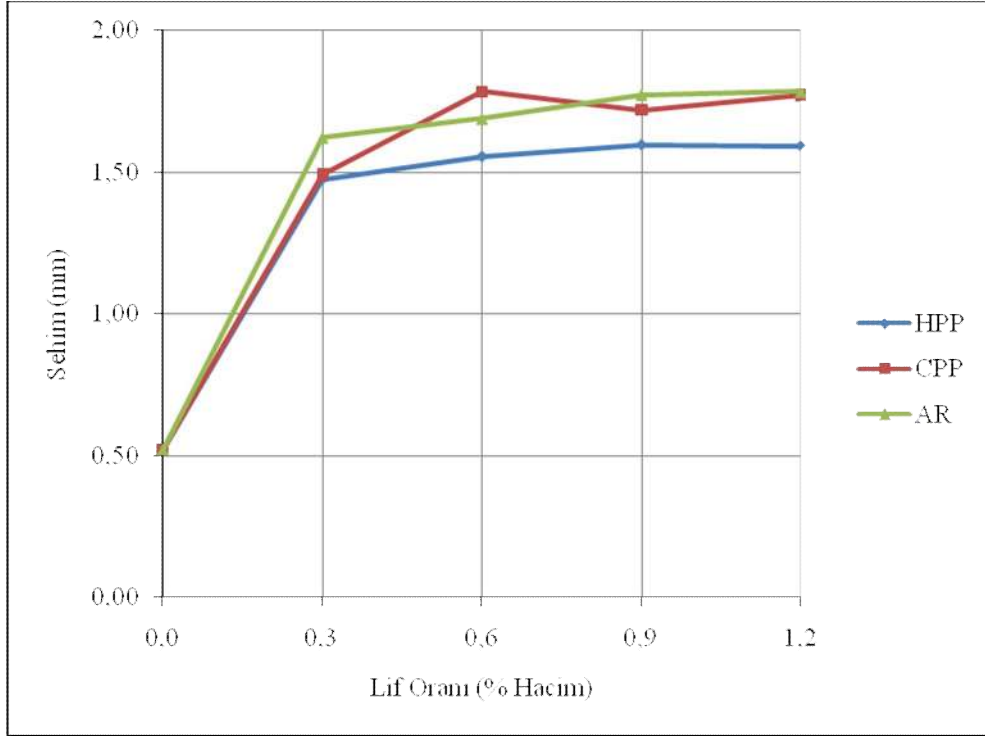
3.2.3. Lif Türünün ve Oranının Lif Katkılı Harçların Sehimi Üzerine Etkileri

Çimento harçlarının eğilme dayanımı deneyleri sırasında, sehim miktarı da belirlenmiştir. Çimento harcına lif ilavesinin önemli bir diğer sebebi de küçük çekme dayanımında sehiminin miktarını arttırarak çatlak oluşumunu engellemektir. Bu sebeple yüksek seviyede sehim yapabilme kabiliyeti amaçlanmaktadır. Her iki durumda da (DYK, EK) özellikle CPP ve AR ilave edilmiş çimento harçlarının yüksek sehim kabiliyetine sahip olukları tespit edilmiştir (Tablo 3.4, Şekil 3.6-3.7). Lif ilavesi yapılan harçlarda normal harçlarınkine göre sehim kabiliyeti yaklaşık dört katına yükselmiştir. Liflerin mekanik özellikleri birbirinden farklı özellik göstermesine rağmen, CPP ve HPP ilaveli harçlarda, lif miktarının artmasıyla sehim değerlerinde önemli değişimlerin olmadığı tespit edilmiştir.

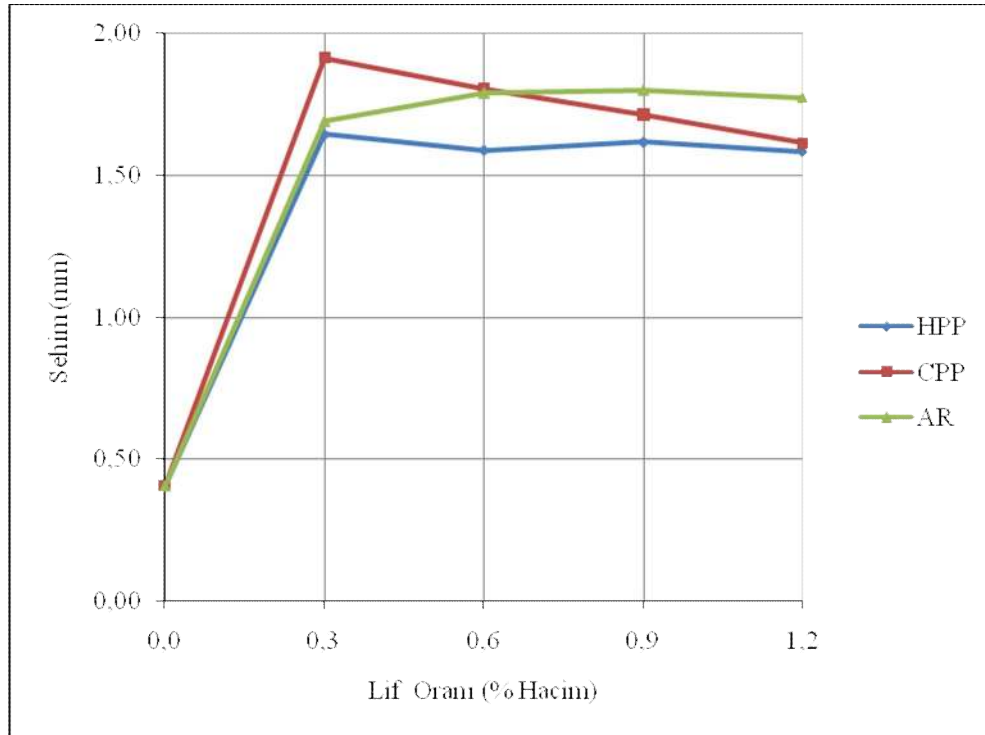
Bu nedenle harçların sehimleri ve eğilme dayanımları arasında doğrudan bir bağlantı kurulamadığı gözlenmiştir.

Tablo 3.4. Lif katkılı harçların sehim değerleri

Lif Katılım Oranları (% Hacim)	Sehim (mm)					
	HPP		CPP		AR	
	DYK	EK	DYK	EK	DYK	EK
% 0.0	0.523	0.406	0.523	0.406	0.523	0.406
% 0.3	1.475	1.645	1.493	1.915	1.623	1.690
% 0.6	1.555	1.590	1.786	1.806	1.690	1.790
% 0.9	1.597	1.619	1.720	1.715	1.775	1.800
% 1.2	1.593	1.585	1.774	1.614	1.785	1.775



Şekil 3.6. Lif oranı ve DYK durumundaki sehim arasındaki ilişki



Şekil 3.7. Lif oranı ve EK durumundaki sehim arasındaki ilişki

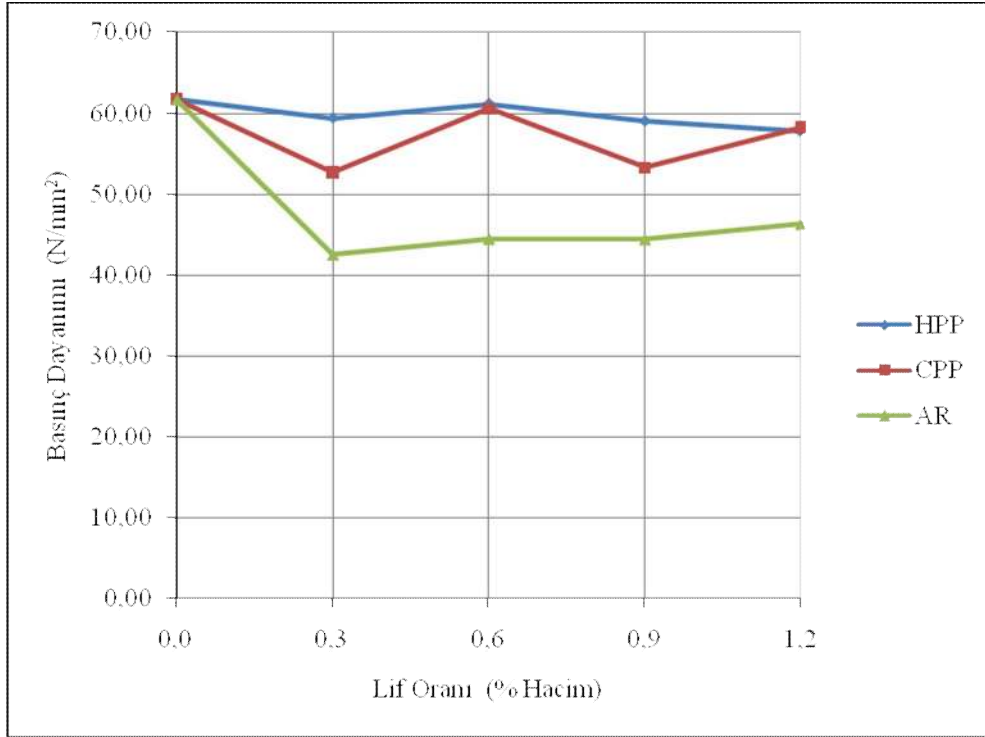
3.2.4. Lif Türünün ve Oranının Katkılı Harçların Basınç Dayanımına Etkisi

Lifler harçlara ilave edildiğinde, lifler çimento hamuru ve agregalara nazaran daha elastik bir yapıya sahip olduklarından, çimento matrisinde süreksizliğe yol açarlar. Bunun basınç dayanımını düşürmesi beklenir. Eğer farklı lif türlerinin ilavesiyle harçların basınç dayanımı özelliklerindeki değişim incelenirse, basınç dayanımının her türdeki lifin ilavesiyle düşmekte olduğu görülmüştür (Tablo 3.5, Şekiller 3.8-3.9). Yine de özellikle HPP lifi ilavesiyle basınç dayanımlarında meydana gelen düşüşler kabul edilebilir seviyelerde kalmıştır. HPP'nin en düşük elastisite modülüne sahip olmasına rağmen, iyi basınç dayanımı performansı gösterdiği belirlenmiştir. Her iki durumda da (EK, DYK) lif ilavesiyle HPP bulunduran harçlarda basınç dayanımının ortalama % 5 düştüğü gözlemlenmiştir. EK durumunda HPP için % 0.6'lık lif ilave oranında düşüş sadece % 1'dir. Bu değerler basınç dayanımının 62.88 N/mm^2 den 62.18 N/mm^2 'ye düştüğü anlamına gelir. AR en yüksek elastisite modülüne sahip olmasıyla bu çalışmada kullanılan en gevrek lif türüdür. Fakat her iki durumda da (EK, DYK) basınç dayanımı bakımından en düşük performansı göstermektedir. % 0.3'luk AR ilaveli harçların basınç dayanımı her iki durumda da (EK, DYK) % 31 civarında düşer ve bu düşüş % 1.2 AR ilave oranında en düşük seviyesine (% 25) düşer. CPP'deki basınç dayanımı düşüşünün ise % 9-11 civarında olduğu gözlemlenmiştir.

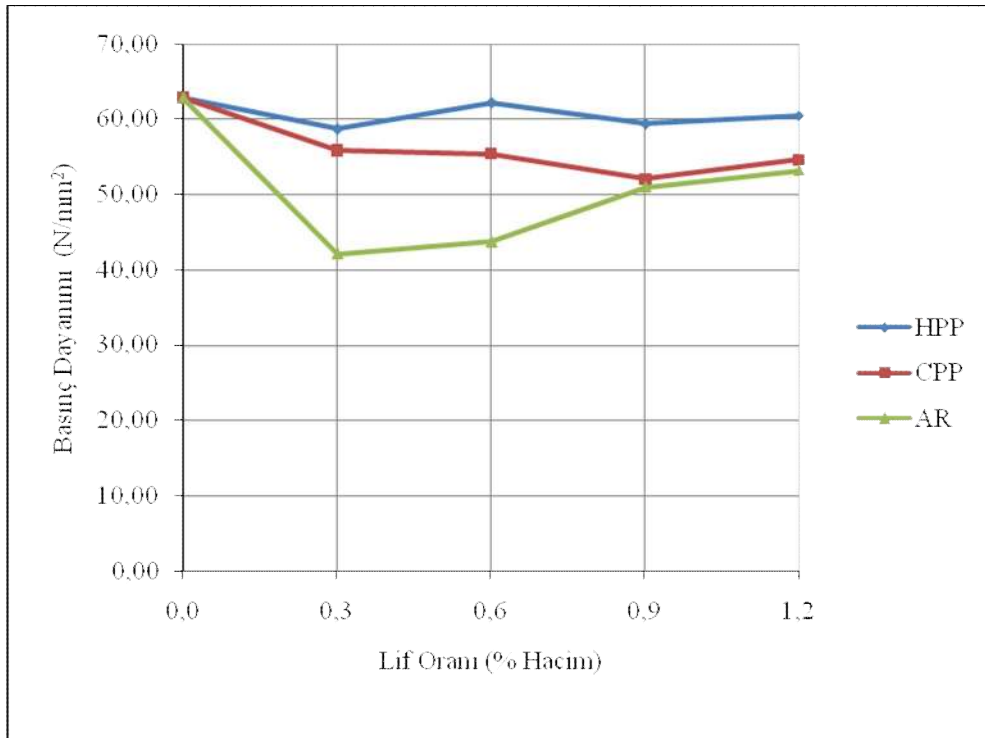
Bu incelemelerden sonra aşağıdaki gibi bir tavsiyede bulunmak isabetli olacaktır; lifler harçların eğilme dayanımına katkıda bulunsun da basınç dayanımlarını olumsuz etkiledikleri için beton karışımı hazırlarken dayanım sınıfı bir üst seviyede seçilmelidir. Mesela, C25/30 katkılı beton üretilcekse, TS EN 206 beton sınıflarına göre en az C30/37 sınıfı beton tasarlanmalıdır.

Tablo 3.5. Lif katkılı harçların basınç dayanımı

Lif Oranı (% Hacim)	Basınç Dayanımı (N/mm^2)					
	HPP		CPP		AR	
	DYK	EK	DYK	EK	DYK	EK
% 0.0	61.73	62.88	61.73	62.88	61.72	62.88
% 0.3	59.43	58.72	52.71	55.88	42.54	42.16
% 0.6	61.17	62.18	60.61	55.46	44.49	43.73
% 0.9	59.05	59.40	53.29	52.10	44.43	51.01
% 1.2	57.74	60.44	58.25	54.63	46.33	53.24



Şekil 3.8. Lif oranı ve DYK durumundaki harçların basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 3.9. Lif oranı EK durumundaki harçların basınç dayanımı arasındaki ilişki

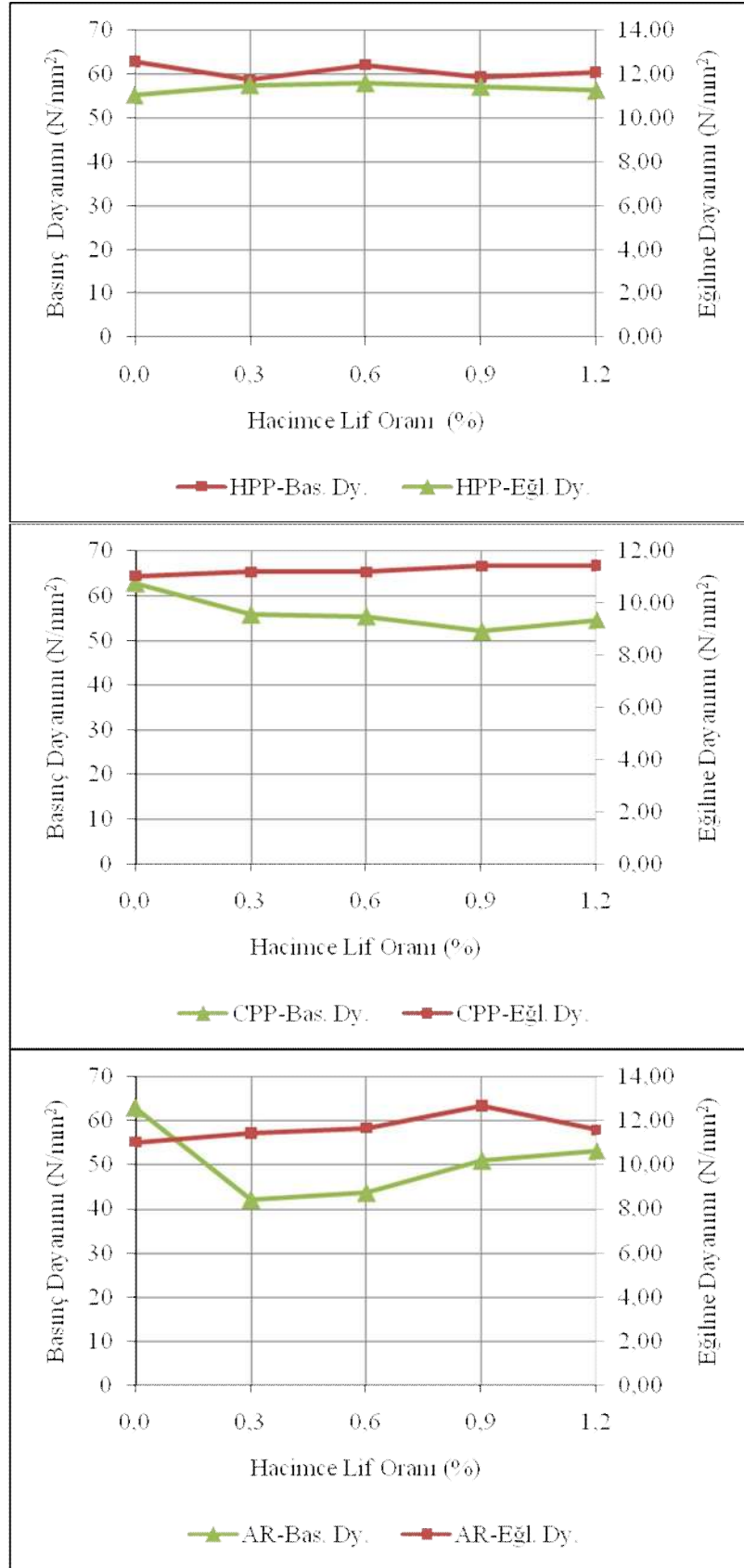
3.2.5. Eğilme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkiden Kullanılacak En Uygun Lif Oranının Belirlenmesi

Yukarıda incelendiği gibi, lif katkısıyla eğilme dayanımı artarken basınç dayanımı olumsuz etkilenir. Bu bölümde, her türdeki lif türüyle daha iyi basınç ve eğilme dayanımını sunan en uygun lif oranı belirlenmeye çalışılmıştır. DYK koşullarında katkılı harçlar kararsız davranış gösterdiğinden bu karşılaştırmalar sadece EK durumdaki harçların mekanik özellikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tartışmadan görüldüğü üzere, her lifin basınç ve eğilme dayanımı aynı anda göz önünde bulundurulduğunda en iyi başarımları farklı katılım oranlarıyla sağladıkları görülmektedir. Şekil 3.10'dan da görüldüğü gibi HPP lif katkılı çimento hamurlarında % 0.3-0.9 lif katkı oranları en uygun basınç ve eğilme dayanımlarının elde edildiği oranlardır. HPP katkılı harçların özellikle % 0.6 lif katkı oranında en uygun başarımları gösterdiği anlaşılmıştır. % 0.6 lif katkı oranı için, eğilme dayanımı % 5 arttığında, basınç dayanımı sadece % 1 düşmektedir. Bu, çimento harcına HPP lif ilavesinin en yararlı tarafının eğilme dayanımını çok fazla arttırmasa da basınç dayanımını çok fazla düşürmemesi olarak ifade edilebilir. CPP lif katkılı çimento hamuru için eğilme dayanımı % 1.2 katkı oranında sadece % 4 artış göstermiştir. Fakat bu oranda basınç dayanımını % 13 azalmıştır. Bu iki durum aynı anda göz önünde bulundurulursa, CPP lifini çimento harcına katmanın çok büyük bir katkısının olmayacağını söylemek mümkün gözükmemektedir.

% 0.9 AR katkılı çimento harçlarında eğilme dayanımının % 15 arttığı, fakat, basınç dayanımı % 19 azaldığı görülmüştür. Bu durum göz önünde bulundurularak eğer eğilme dayanımında artış isteniyorsa, yukarıda tavsiye edildiği gibi basınç dayanım sınıfı bir seviye yukarıdan alınarak, basınç dayanımındaki azalma bu şekilde göz ardı edilebilir.

Sonuç olarak, lif katkısıyla eğilme dayanımlarında genel olarak bir artış, basınç dayanımlarında ise bir düşüş tespit edilmiştir. Ayrıca, EK ve DYK durumundaki lif içeren harçların durumları kendi içlerinde değerlendirildiğinde, doğrudan kür havuzundan çıkarılarak test edilen örnekler (DYK) çimento hamuru-lif ara yüzeyindeki aderansın tam sağlanamamasından dolayı kararsız bir davranış sergilemiş ve eğilme dayanımını olumsuz etkilemiştir. EK numunelerde ise bu durum gözlemlenmemiştir. Bu sebeple özellikle ıslak ortamlarda kullanılacak beton veya harçlar için lif kullanımının sakıncalı olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 3.10. EK durumunda harçların, lif katılım oranları ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki

3.3. Polimer Türü Lif Katkıların Yüksek Sıcaklığa Maruz Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

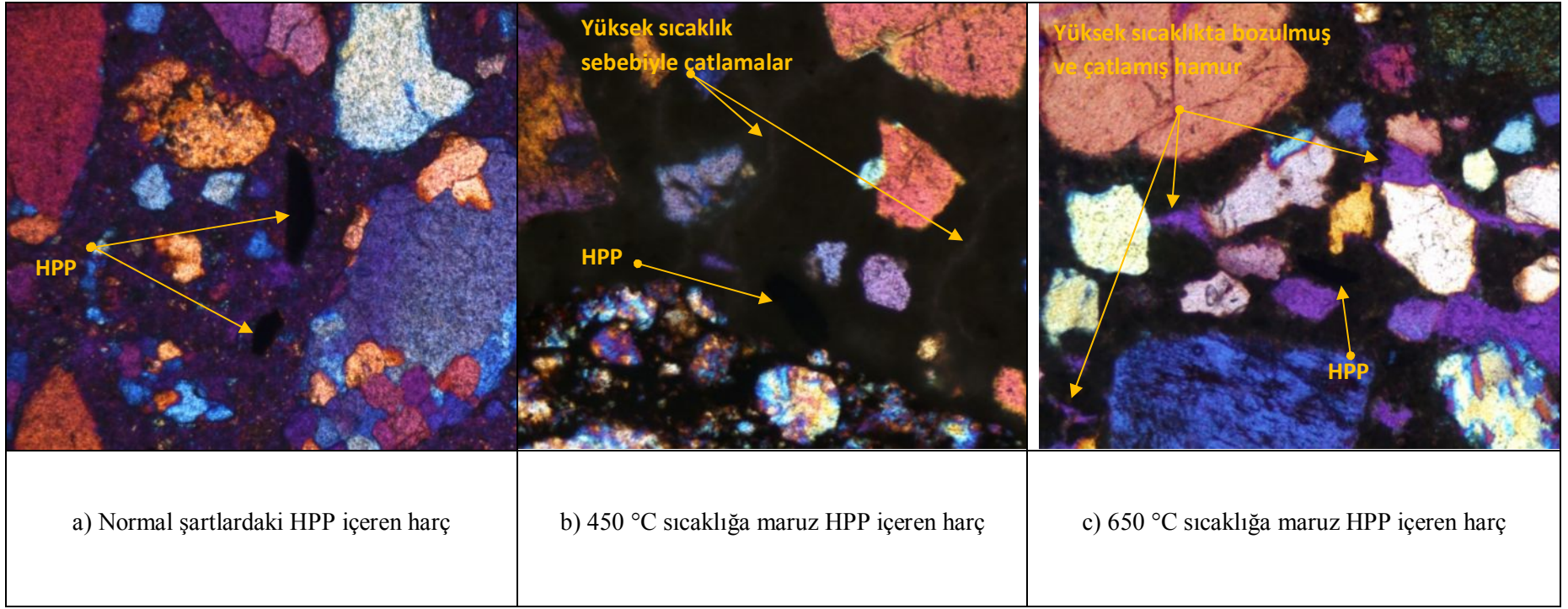
Çalışmanın üçüncü ve son kısmında ise lif boyları (10 mm) sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, beş farklı sıcaklığa (21 °C (DYK), 100 °C (EK), 450 °C, 650 °C ve 850 °C) maruz bırakılmış ve bu numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Şekil 3.11’de yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçların yapılarındaki petrografik değişimler ince kesit görüntüleri yardımıyla incelenmektedir. Hem 21 °C’ de hem de 100 °C’ de çimento harcı matrisleri benzer olduğu için, sadece 21 °C’ deki durum (Şekil 3.11) normal durum olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklıklara maruz çimento harçlarının ince kesit resimlerinde, liflerin boyutları yada çapları arasındaki farklar kolayca görülebilmektedir. Çimento harcıyla Polimer türü lifler arasındaki aderans açıkça görülebilmektedir (Şekil 3.11).

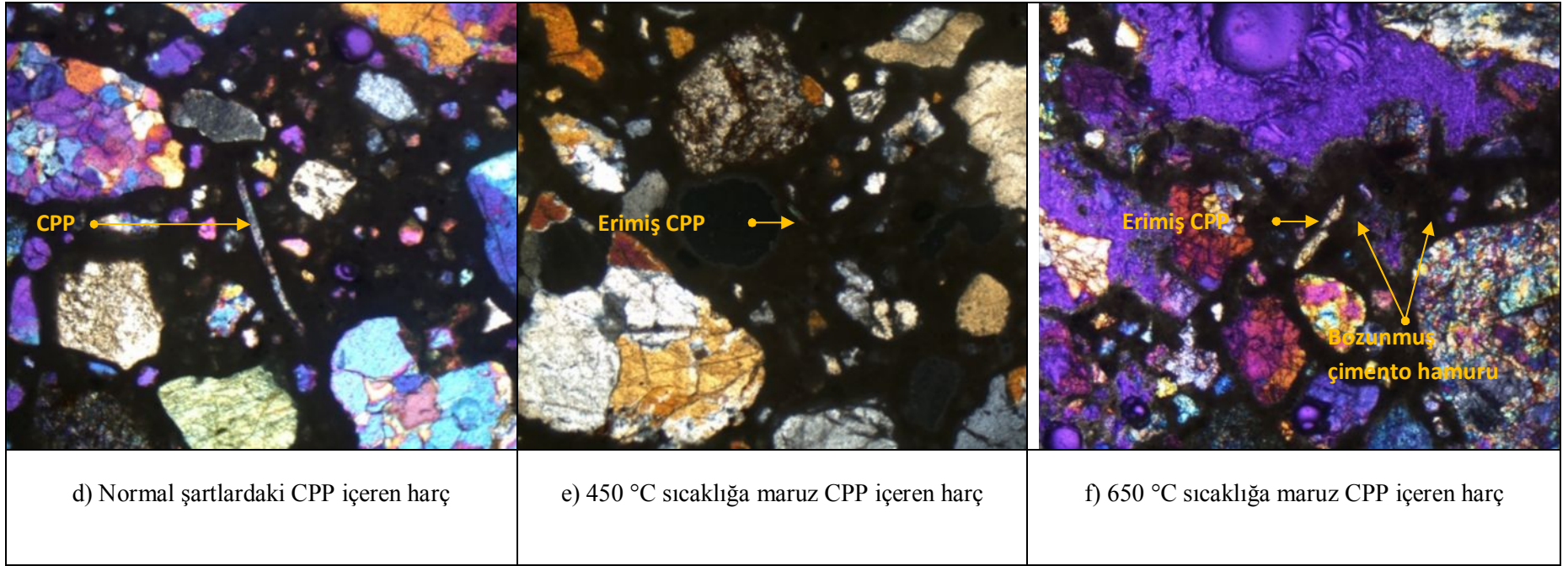
450 °C’de çimento hamuru matrislerinde bazı bozulmalar ve çatlaklar olduğu görülmüştür (Şekil 3.11). Örneklerin yüzeylerinde ise belli bir ölçüde kavlama gözlenmiştir. Polimer liflerin erime noktaları göz önünde bulundurulduğunda (Tablo 2.2) hepsi 450 °C’nin altında erimişlerdir. Tüm lifler bu derece altında erise de her birinin çimento matrisinde ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir.

650 °C’de çimento hamuru matrisleri zayıflamış, bozulmuş ya da çatlamıştır. Bu sıcaklıkta matrisler zayıfladığı için ince kesit görüntüsü almak oldukça zorlaşmıştır. Tüm lifler, AR katkılı harç örnekleri hariç, çimento hamuru ince kesitinde açıkça gözlemlenebilmiştir (Şekil 3.11). Fakat tüm lif türleri erimiştir ya da bozulmuştur.

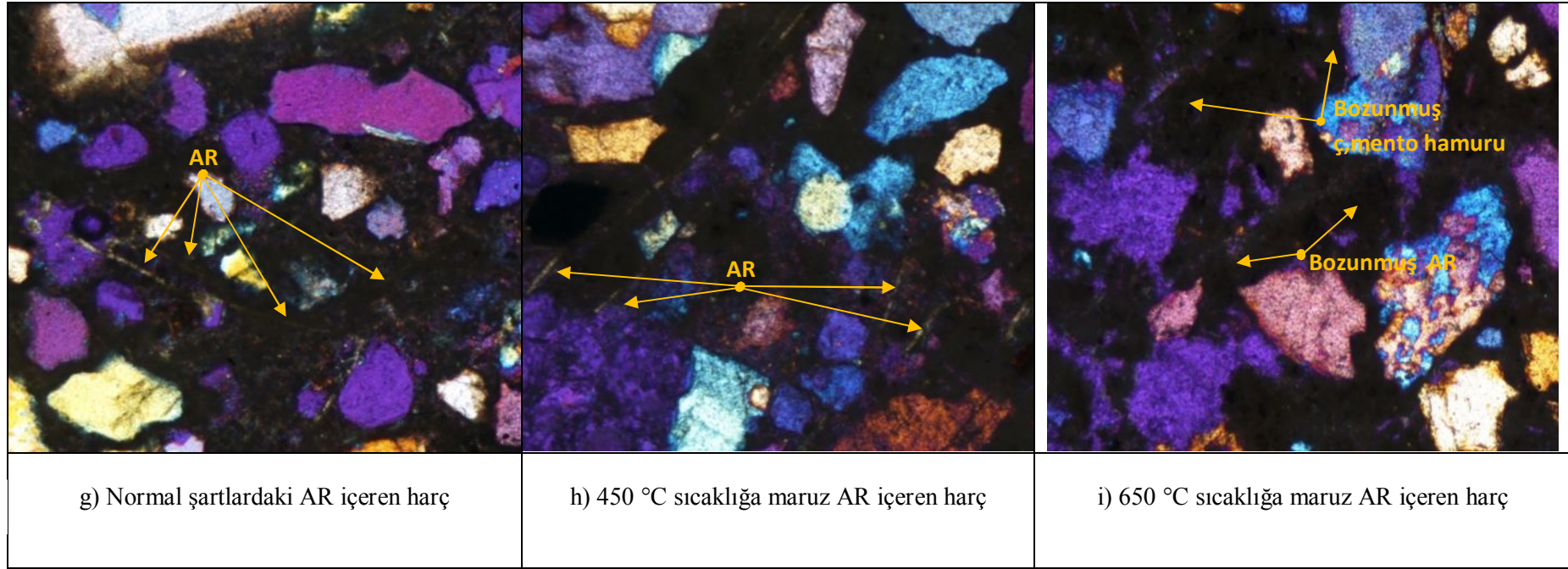
850 °C’de harçların mekanik nitelikleri zayıflamıştır, bu yüzden harçlardan ince kesit görüntüsü almak mümkün olmamıştır.



Şekil 3.11a. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan HPP lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri



Şekil 3.11b. Yüksek sıcaklıklara maruz CPP lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri



Şekil 3.11c. Yüksek sıcaklıklara maruz AR lif katkılı harçların ince kesit görüntüleri

3.3.1. Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve İlave Oranlarının Harçların Birim Kütlesi Üzerindeki Etkisi

Çimento harçları yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıklarında bazı kimyasal tepkimeler oluşmaktadır. Özellikle kimyasal olarak bağlanan su, bünyeden ayrıldığı için özgül kütlede bir düşüş beklenmektedir.

Lifsiz harçlarda özgül kütle, maruz kaldıkları; 450 °C, 650 °C ve 850 °C'deki sıcaklıklar için 2.1 g/cm³'den sırasıyla; 1.99 g/cm³ (% 5), 1.98 g/cm³ (% 6) ve 1.96 g/cm³ (% 7) değerlerine düşmüştür (Tablo 3.6).

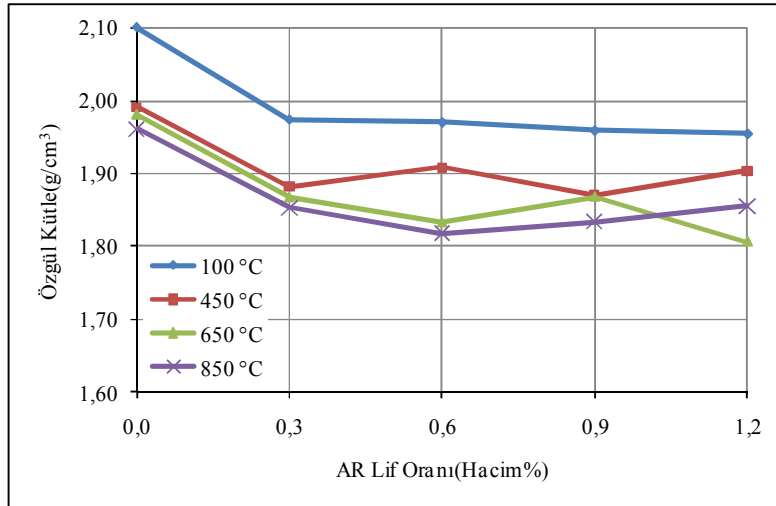
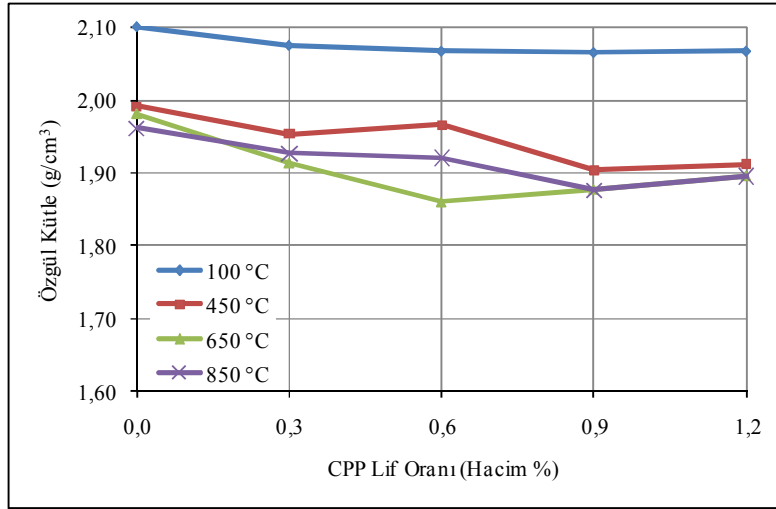
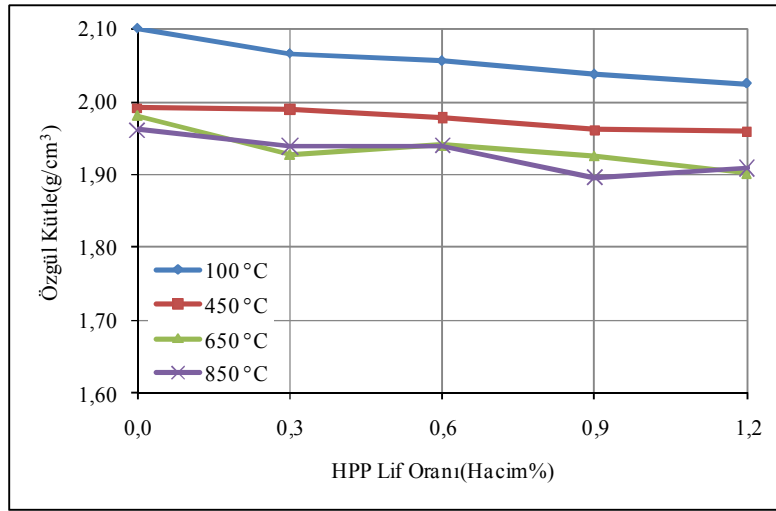
Özgül kütleleri harcın bu özelliğinden daha düşük olan (0.91 g/cm³) HPP ve CPP lifleri harca ilave edildiğinde harcın birim kütlesinin (2.1 g/cm³) azalması beklenmektedir. Şekil 3.12 ve Tablo 3.6'dan görüldüğü gibi, normal durumda, hacmen % 0.3 HPP ve CPP lif ilavesinin harcın birim kütlesini ikisinde de % 1 düşürdüğü görülmüştür. Diğer taraftan, harçlar 450 °C, 650 °C ve 850 °C'ye maruz bırakıldıklarında ise, aynı sıcaklık altında, aynı katkı oranında HPP lifi bulunan çimento harçlarıyla karşılaştırıldığında, birim kütleler yaklaşık olarak sırasıyla % 4, % 7 ve % 6 azaldığı tespit edilmiştir. CPP için bu düşüşler sırasıyla % 6, % 8 ve % 7 olarak gerçekleşmiştir.

HPP ve CPP liflerine nazaran AR lifi daha yüksek özgül kütleyle sahip olsa da harçlarının özgül kütleleri HPP ve CPP lifleri ilave edilmiş harçlarının özgül kütlelerinden daha düşüktür. Harcın birim kütlesi hacmen % 1.2 AR lif ilavesiyle 1.96 g/cm³'e kadar düşmüştür. Ayrıca özgül kütlesi 450 °C'de % 3, 650 °C'de % 8 ve 850 °C'de % 5 azalmaktadır.

İlginç olarak 650 °C'de birim kütleler 850 °C'deki birim kütlelerden yüksektir. HPP, CPP ve AR liflerinin % 1.2 oranında ilavesiyle çimento harçları 850 °C'ye tabi tutulduğunda birim kütle sırasıyla 1.91 g/cm³, 1.90 g/cm³ ve 1.86 g/cm³'e düşmektedir.

Tablo 3.6. Yüksek sıcaklığa maruz polimer lif katkılı harçların özgül kütleleri

Hacmen lif oranı	Sıcaklık (°C)	Kuru özgül kütle (g/cm ³)		
		HPP	CPP	AR
% 0.0	100	2.10	2.10	2.10
	450	1.99	1.99	1.99
	650	1.98	1.98	1.98
	850	1.96	1.96	1.96
% 0.3	100	2.07	2.08	1.97
	450	1.99	1.95	1.88
	650	1.93	1.91	1.87
	850	1.94	1.93	1.85
% 0.6	100	2.06	2.07	1.97
	450	1.98	1.97	1.91
	650	1.94	1.86	1.83
	850	1.94	1.92	1.82
% 0.9	100	2.04	2.07	1.96
	450	1.96	1.90	1.87
	650	1.93	1.88	1.87
	850	1.90	1.88	1.83
% 1.2	100	2.02	2.07	1.96
	450	1.96	1.91	1.90
	650	1.90	1.90	1.81
	850	1.91	1.90	1.86



Şekil 3.12. Yüksek sıcaklık altında lif oranı ile özgül kütle arasındaki ilişki

3.3.2. Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve İçeriklerinin Harçların Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklık altında kalsiyum esaslı bileşenlerin ayrışması sebebiyle harçların mekanik niteliklerinin azalması beklenir. Fakat lif ilavesiyle özellikle eğilme dayanımlarında bir ölçüde artış beklenmektedir.

Lifsiz harçlarda sıcaklık arttıkça eğilme dayanımı büyük ölçüde azalmaktadır. Lifsiz harçların eğilme dayanımı 450 °C’de % 74, 650 °C’de % 85 ve 850 °C’de % 86 azalmaktadır. HPP içeren harçların eğilme dayanımı ortalama 450 °C’de % 51, 650 °C’de % 92 ve 850 °C’de % 96 oranlarında bir düşüş sergilemektedir. CPP’li harçların eğilme dayanımı ortalama olarak 450 °C’de % 31, 650 °C’de % 90 ve 850 °C’de % 96 azalmaktadır (Şekil 3.13). AR lifi katkılı harçlarda düşüşler 450 °C’de ortalama % 48, 650 °C’de % 88 ve 850 °C’de % 95 (Şekil 3.13) civarında gözlemlenmiştir. Bu, genel olarak eğilme dayanımı açısından lifli harçların 450 °C’ye kadar etkili olduğu, fakat 650 °C de önemli bir katkısının bulunmadığı anlamına gelmektedir. 850 °C’ye maruz kalan kontrol örneklerinin ise lifli harçlara göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip oldukları anlaşılmıştır.

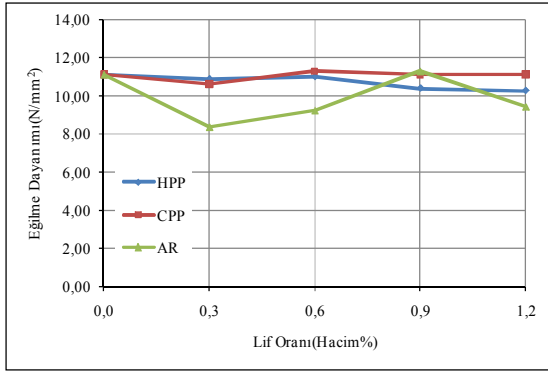
21 °C’de örnekler kür havuzundan yeni çıkarılmıştır ve içleri ıslaktır. Eğer farklı oranlardaki lif katkılarının (% 0.0-1.2) harçların eğilme dayanımlarına etkisi incelenirse, ıslak durumlarda (21 °C) tüm liflerin kararsız davranış sergilediği (Tablo 3.7, Şekil 3.13) ve eğilme dayanımına en fazla % 2 oranında katkıda bulunduğu görülür. Islak durumda kontrol örneklerinin eğilme dayanımı 11.13 N/mm² iken, lifli harçlarda bu değerden yüksek değerler sadece % 0.6 oranında CPP lif içeren harçlarda 11.3 N/mm² ve % 0.9 oranında AR lifi içeren harçlarda 11.3 N/mm² düzeyinde çok küçük katkılar şeklinde ortaya çıkmıştır.

Etüv sıcaklığına maruz kalan örneklerde (100 °C) (Tablo 3.7, Şekil 3.13), lifler, ıslak durumdakilere (21 °C) nazaran daha iyi performans gösterirler. 100 °C’ ye maruz kalan örneklerde, % 0.6 oranında HPP lif katkılı harcın eğilme dayanımı en uygun değeri verdiği görülmüştür. 100 °C’ ye maruz CPP lif katkılı harçların ilave oranları arttıkça eğilme dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir. AR lifi içeren harçlar ise her ilave oranında iyi performans gösterirler. % 0.9 oranında AR lifi ilavesinden sonra keskin bir düşüş gözlenmiştir, fakat eğilme dayanımı hala kontrol örneğinden fazladır. Buradan farklı türlerden liflerin farklı ilave oranlarında eğilme dayanımına katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. HPP katkılı harçlarda eğilme dayanımındaki en iyi artış, % 0.6 lif içeriğinde

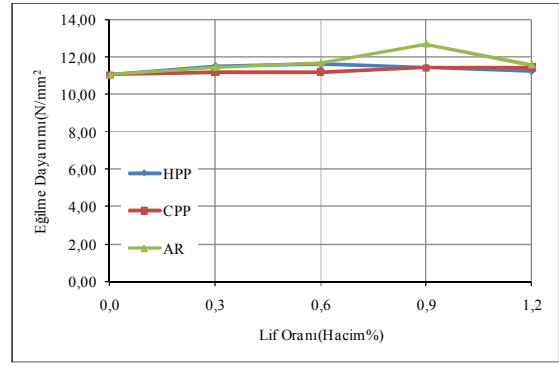
% 5 olarak gözlemlenmiştir. CPP lifli içeren harçlarda eğilme dayanımındaki % 4'lük artış hacmen % 1.2 lif ilavesiyle sağlanmıştır. AR lifli içeren harçlar diğer lif katkılı harç türlerine göre şaşırtıcı bir artış göstermiştir. Hacmen % 0.9 oranında AR lifli ilavesi eğilme dayanımı % 15 civarında artırmıştır. Kontrol örneklerinin 100 °C'de eğilme dayanımı 11.05 N/mm²'dir, % 1.2 ilave oranında AR lifli katkılı örnekler 12.70 N/mm² eğilme dayanımına, % 0.6 ilave oranında HPP lifli katkılı örnekler 11.61 N/mm² eğilme dayanımına, ve % 1.2 ilave oranında CPP lifli katkılı örnekler ise 11.45 N/mm² eğilme dayanımına sahiptir.

Tablo 3.7. Yüksek sıcaklığa maruz kalan lif katkılı harçların eğilme dayanımı

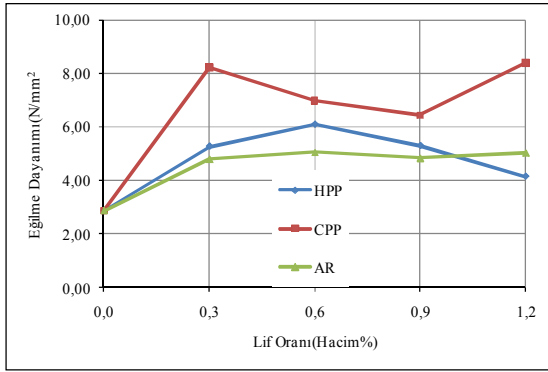
Hacimce Lif Katkı Oranı	Sıcaklık (°C)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)		
		HPP	CPP	AR
% 0.0	21	11.13	11.13	11.13
	100	11.05	11.05	11.05
	450	2.87	2.87	2.87
	650	1.64	1.64	1.64
	850	1.56	1.56	1.56
% 0.3	21	10.88	10.63	8.37
	100	11.52	11.20	11.45
	450	5.27	8.23	4.80
	650	1.18	1.17	0.67
	850	0.45	0.42	0.35
% 0.6	21	10.99	11.30	9.25
	100	11.61	11.21	11.70
	450	6.09	6.98	5.06
	650	0.96	1.09	0.75
	850	0.18	0.30	0.56
% 0.9	21	10.38	11.13	11.30
	100	11.45	11.43	12.70
	450	5.30	6.45	4.84
	650	0.52	0.90	1.46
	850	0.30	0.30	0.35
% 1.2	21	10.27	11.13	9.43
	100	11.26	11.45	11.60
	450	4.15	8.41	5.04
	650	0.74	1.14	1.49
	850	0.59	0.49	0.40



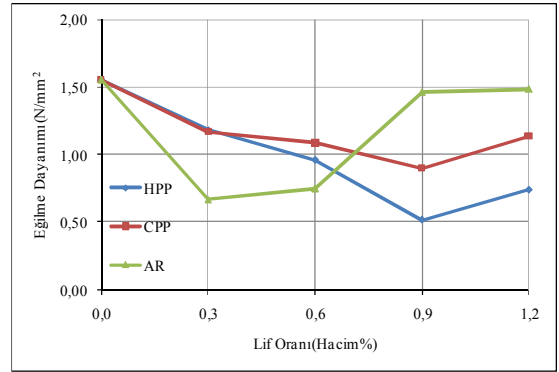
a) (21 °C sıcaklığa maruz farklı Lifler)



b) (100 °C sıcaklığa maruz farklı Lifler)

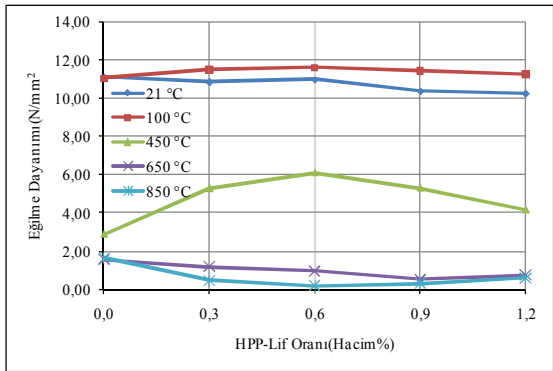
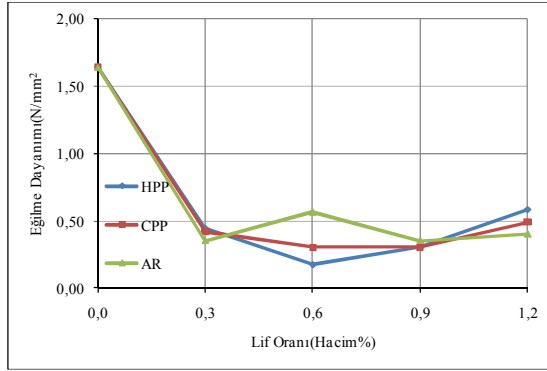


c) (450 °C sıcaklığa maruz farklı Lifler)



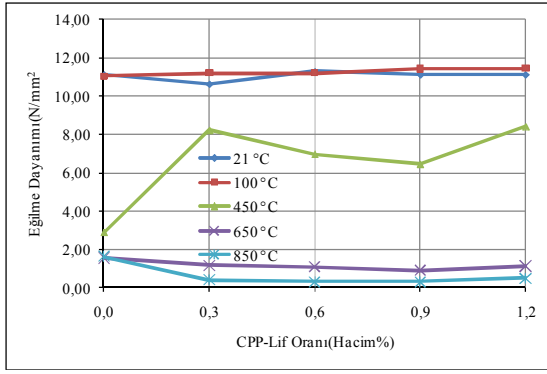
d) (650 °C sıcaklığa maruz farklı

Lifler)

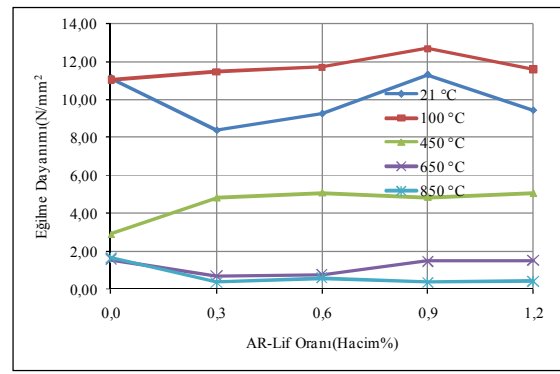


f) (farklı sıcaklıklara maruz HPP için eğl. day.)

e) (850 °C sıcaklığa maruz farklı Lifler)



g) (farklı sıcaklıklara maruz CPP için eğl. day.)



h) (farklı sıcaklıklara maruz AR için eğl. day.)

Şekil 3.13. Yüksek sıcaklık altında lif katkı oranı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

450 °C sıcaklığa maruz kalan lifli harçlar kontrol örneklerine nazaran daha iyi başarımlar göstermişlerdir. Bu sıcaklığa maruz kalan tüm lifli örnekler her ilave oranında yüksek eğilme dayanımı göstermişlerdir. Bu sıcaklıkta ve tüm ilave oranlarında HPP içeren harç, kontrol harçlarına nazaran % 45-112 daha fazla eğilme dayanımı göstermiştir. CPP lifi ilavesi harçların eğilme dayanımını % 125-193 civarında artırmıştır. Bu oran AR lif katkı harçlar için % 67-76 civarında gözlemlenmiştir.

650 °C'ye maruz bırakılan lifli harçlar lifsiz harçlara nazaran % 10-70 daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Bu sıcaklıkta HPP lifi ve CPP lifi katkı harçlar en iyi performansı hacmen % 0.3 lif ilave oranında ve AR'li harçlar bu performansı % 0.9-1.2 ilave oranında göstermiştir.

850 °C'ye maruz bırakılan lifli harçlar lifsiz harçlara nazaran %90 civarında daha düşük eğilme dayanımı sergilemiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan polimer lifler normal durumda (100 °C) harçların eğilme dayanımına katkıda bulunmuşlardır. Bu etki açıkça 450 °C'ye kadar devam etmiştir ve polimer liflerin eğilme dayanımına, özellikle 450 °C'ye kadar etkili oldukları anlaşılmıştır. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda lifsiz harçlara nazaran, liflerin eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

3.3.3. Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve Katılım Oranlarının Harçların Şehimi Üzerindeki Etkisi

Çimento harçlarının eğilme dayanımları belirlenirken sehimi miktarları da belirlenmiştir. Harca lif ilavesinin bir önemli nedeni harçların sünek davranış yeteneğini

artırmak ve küçük gerilmeler altında çatlamayı engellemektir. Bu yüzden, yüksek seviyede sehimi arzu edilen bir durumdur. Diğer yandan yüksek sıcaklık harçları daha gevrek yapar.

Tablo 3.8 ve Şekil 3.14’de sıcaklık arttıkça her lif katkılı harç için sehimin azaldığı görülmektedir. 850 °C’ ye maruz kalan harçlar için sehimi ölçmek mümkün olamamıştır çünkü harçlar ölçüm yapamayacak kadar zayıflamışlardır.

Lifsiz harçlarda sıcaklık arttıkça sehimi önemli derecede düşer. Lifsiz harcın sehimi 450 °C’de % 63 ve 650 °C’de % 77 oranında, HPP lif katkılı harçlarda sehimi ortalama olarak 450 °C’de % 28 ve 650 °C’de % 98 oranında, CPP lif katkılı harçlarda ortalama olarak sehimi 450 °C’de % 59 ve 650 °C’de % 99 oranında ve AR ortalama olarak lif katkılı harçlarda ise sehimi 450 °C’de % 34 ve 650 °C’de % 82 düşüş göstermiştir (Şekil 3.14).

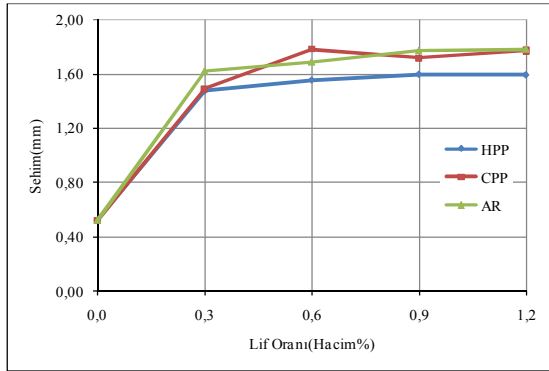
Eğilme dayanımı niteliklerine benzer olarak, liflerin harçların sehimlerine katkılarının 450 °C’ ye kadar olumlu olduğu görülmüştür. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda sehimi ölçülemeyecek değerlere düşmektedir.

Kontrol örnekleriyle (lifsiz ve normal koşullarda) karşılaştırıldığında lifli örneklerin normal durumlarda ortalama % 200-236 büyük sehimi gerçekleştirdiği ve 450 °C’de % 32-114 yüksek sehimi değerleri verdiği görülmüştür. Bu sehimi farklılıkları 650 °C’de negatif yönde % 42-97 civarında tespit edilmiştir.

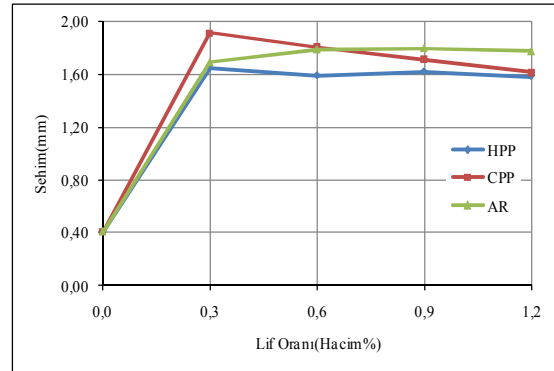
Tablo 3.8. Yüksek sıcaklığa maruz lif katkılı harçların sehimi

Lif Katkı Oranı (% hacim)	Sıcaklık (°C)	Sehimi (mm)		
		HPP	CPP	AR
% 0.0	21	0.523	0.523	0.523
	100	0.406	0.406	0.406
	450	0.190	0.190	0.190
	650	0.120	0.120	0.120
% 0.3	21	1.885	1.191	0.542
	100	1.310	1.222	0.390
	450	1.107	1.170	0.345
	650	0.930	1.150	0.317
% 0.6	21	1.903	1.272	0.592
	100	1.691	1.311	0.380
	450	0.940	1.210	0.365
	650	0.900	1.180	0.292

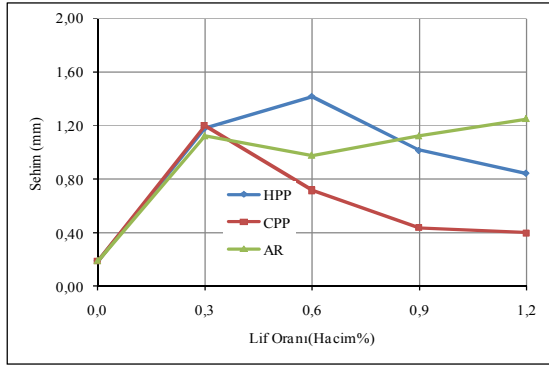
% 0.9	21	1.748	1.400	0.641
	100	1.250	1.502	0.364
	450	0.670	1.330	0.292
	650	0.630	1.218	0.261
% 1.2	21	1.454	1.381	0.560
	100	1.042	1.373	0.309
	450	0.430	0.900	0.220
	650	0.370	0.830	0.212



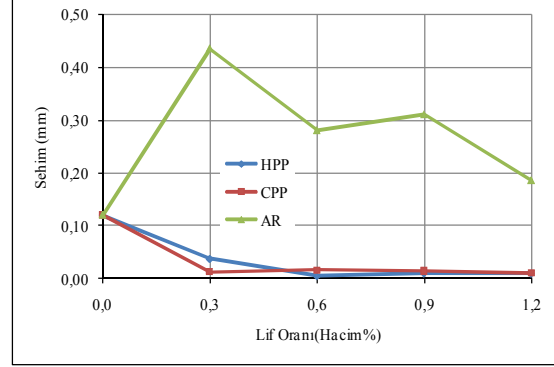
a) (21 °C sıcaklığa maruz Lifler)



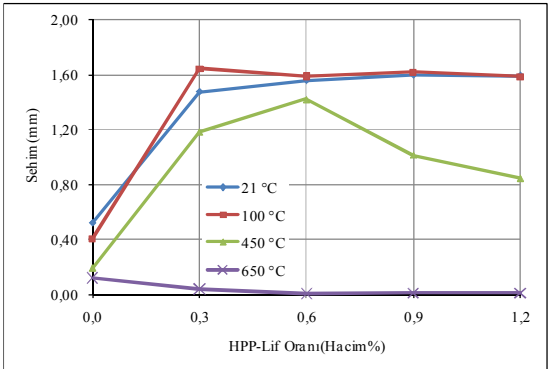
b) (100 °C sıcaklığa maruz Lifler)



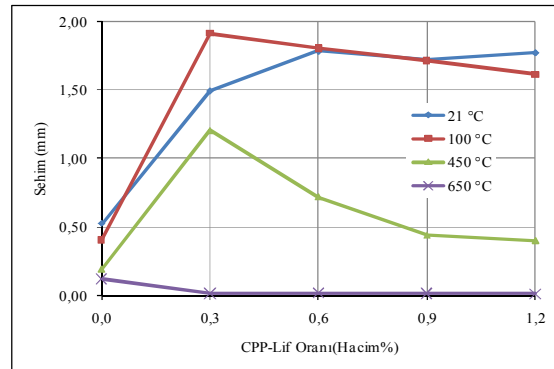
c) (450 °C sıcaklığa maruz Lifler)



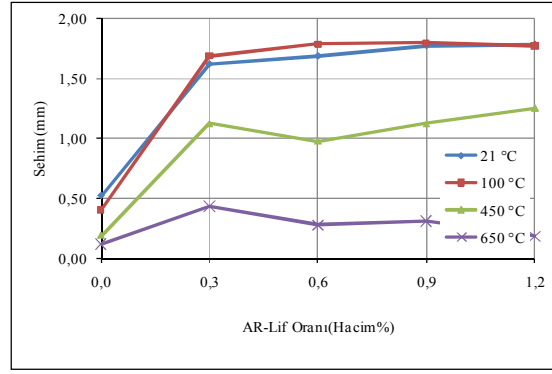
d) (650 °C sıcaklığa maruz Lifler)



e) (Farklı sıcaklıklara maruz HPP)



f) (Farklı sıcaklıklara maruz CPP)



g) (Farklı sıcaklıklara maruz AR)

Şekil 3.14. Yüksek sıcaklık ve sehim arasındaki ilişki

3.3.4. Yüksek Sıcaklık Altında Polimer Lif Türlerinin ve Katkı Oranlarının Harçların Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklık çimento hamurunun kimyasal yapısını değiştirerek harçları bozar. Diğer yandan, lifler harçlara eklendiğinde, liflerin çimento matrisine nazaran daha sünek yapısı olduğu için çimento matrisinde süreksizliğe neden olurlar. Bu nedenle basınç dayanımında düşüş beklenmektedir.

Tablo 3.9 ve Şekil 3.15’de görüldüğü üzere, sıcaklık arttıkça basınç dayanımının neredeyse tüm lif katkılı harçlar için düştüğü görülür. Lifsiz harçlarda sıcaklık arttıkça basınç dayanımı özellikle 650 °C’de ve daha yüksek sıcaklıklarda önemli derecede düşer. Lifsiz harçların basınç dayanımı 450 °C’de % 20 ve 650 °C’de % 53 ve 850 °C’de % 84 oranında düşmüştür. HPP lif katkılı harçlarda basınç dayanımı ortalama 450 °C’de %12 , 650 °C’de % 62 ve 850 °C’de % 88 oranında düşmüştür (Şekil 3.15). CPP lif katkılı harçlarda basınç dayanımı ortalama 450 °C’de % 20. 650 °C’de % 70 ve 850 °C’de % 88 oranında düşmüştür (Şekil 3.15). AR lif katkılı harçlarda basınç dayanımı ortalama 450 °C’de % 8 , 650 °C’de % 60 ve 850 °C’de %90 oranında düşmüştür (Şekil 3.15).

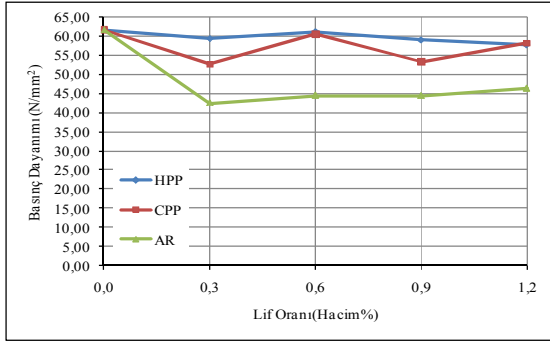
Farklı lif türlerine sahip harçlar incelendiğinde, basınç dayanımı her türden lif ilavesiyle bir düşüş sergilemektedir (Tablo 3.9, Şekil 3.15). Islak durumlarda (21 °C), aynı sıcaklıktaki kontrol örnekleriyle karşılaştırıldığında, HPP lifi eklenmiş harçların basınç dayanımı % 1-6 oranın, CPP lifi eklenmiş harçların basınç dayanımı % 2-15 oranında, AR lifi eklenmiş harçların basınç dayanımı % 25-31 oranlarında düşmüştür. Etüvde kurutulmuş (100 °C) örneklerde bu düşüşler HPP, CPP ve AR için sırasıyla % 1-7, % 11-17 ve % 15-33 oranlarında gerçekleşmiştir. İlginç bir şekilde 450 °C’de HPP, aynı

sıcaklıktaki kontrol örneğine nazaran % 12'ye kadar daha iyi sonuçlar vermiştir. Fakat farklı türden life sahip harçlar, aynı sıcaklık altında kontrol örneklerine nazaran daha olumsuz performans göstermektedir. 650 °C'de kontrol örneğiyle aynı sıcaklık altında karşılaştırıldığında bu düşüşler HPP, CPP ve AR lifleri katkılı harçlar için sırasıyla % 15-32, % 38-50 ve % 30-46 oranlarında gözlemlenmiş ve 850 °C'de basınç dayanımı HPP, CPP ve AR lif katkılı harçlar için sırasıyla % 18-32, % 25-40 ve % 49-64 oranlarında düşmüştür.

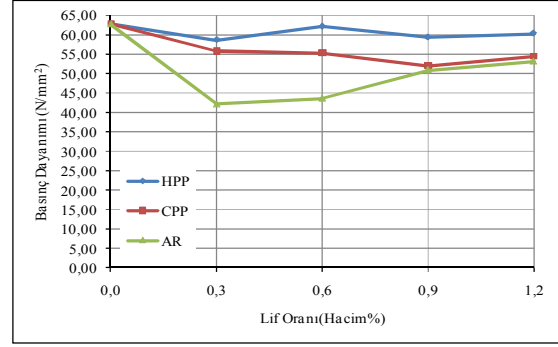
Sonuç olarak, lifli harçlar kontrol örnekleriyle karşılaştırıldıklarında 450 °C'ye kadar basınç dayanımlarına katkı sağlayabilmektedirler.

Tablo 3.9. Yüksek sıcaklığa maruz kalan lif katkılı harçlarının basınç dayanımları

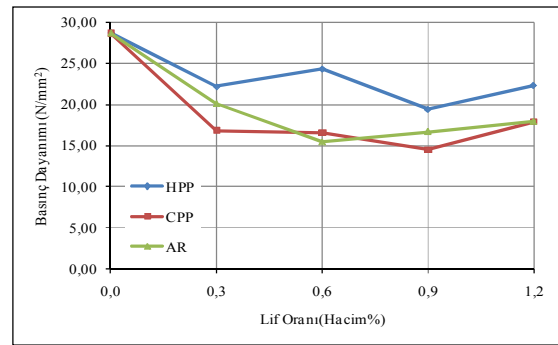
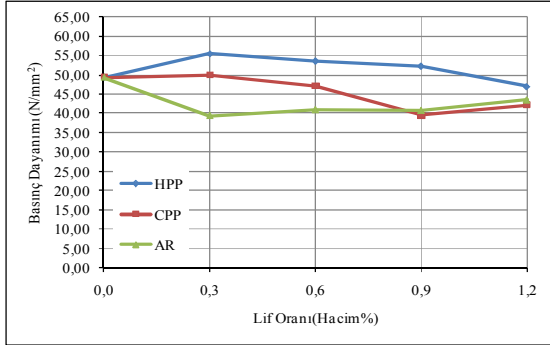
Lif Oranı (% Hacim)	Sıcaklık (°C)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)		
		HPP	CPP	AR
% 0.0	21	61.73	61.73	61.73
	100	62.88	62.88	62.88
	450	49.38	49.38	49.38
	650	28.70	28.70	28.70
	850	9.51	9.51	9.51
% 0.3	21	59.43	52.71	42.54
	100	58.72	55.88	42.16
	450	55.49	49.93	39.40
	650	22.17	16.85	20.11
	850	6.59	7.18	4.83
% 0.6	21	61.17	60.61	44.49
	100	62.18	55.46	43.73
	450	53.59	47.12	40.90
	650	24.31	16.59	15.44
	850	7.76	7.09	3.89
% 0.9	21	59.05	53.29	44.43
	100	59.40	52.10	51.01
	450	52.26	39.44	40.70
	650	19.45	14.49	16.73
	850	6.51	5.67	4.24
% 1.2	21	57.74	58.25	46.33
	100	60.44	54.63	53.24
	450	46.88	42.18	43.45
	650	22.34	17.88	17.93
	850	6.58	7.04	3.38



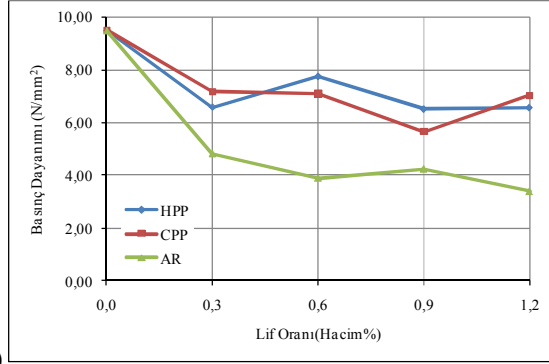
a) (21 °C sıcaklığa maruz lifli harçlar)



b) (100 °C sıcaklığa maruz lifli harçlar)

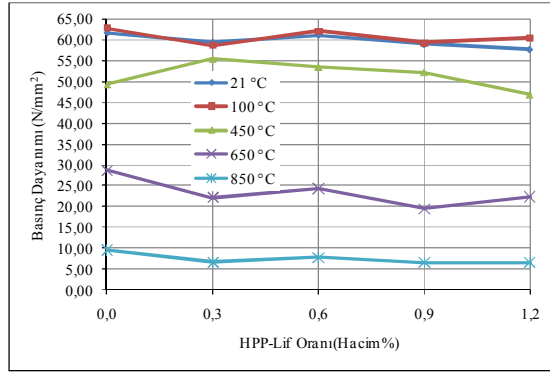


c) (450 °C sıcaklığa maruz lifli harçlar)

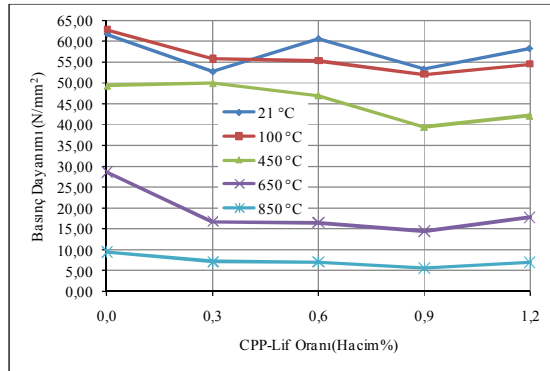


d) (650 °C sıcaklığa maruz lifli

harçlar)

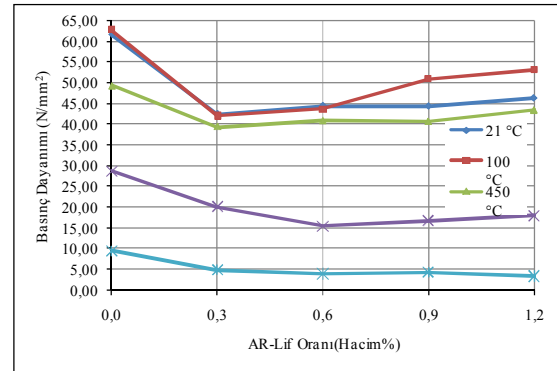


e) (850 °C sıcaklığa maruz lifli harçlar)



g) (Farklı sıcaklıklara maruz CPP içeren harçlar)

f) (Farklı sıcaklıklara maruz HPP içeren harçlar)



h) (Farklı sıcaklıklara maruz AR içeren harçlar)

Şekil 3.15. Lif katkılı harçlarda yüksek sıcaklık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

3.3.5. Yüksek Sıcaklık Altında Eğilme Dayanımı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkiden En Uygun Polimer Lif Türü ve İlave Oranının Belirlenmesi

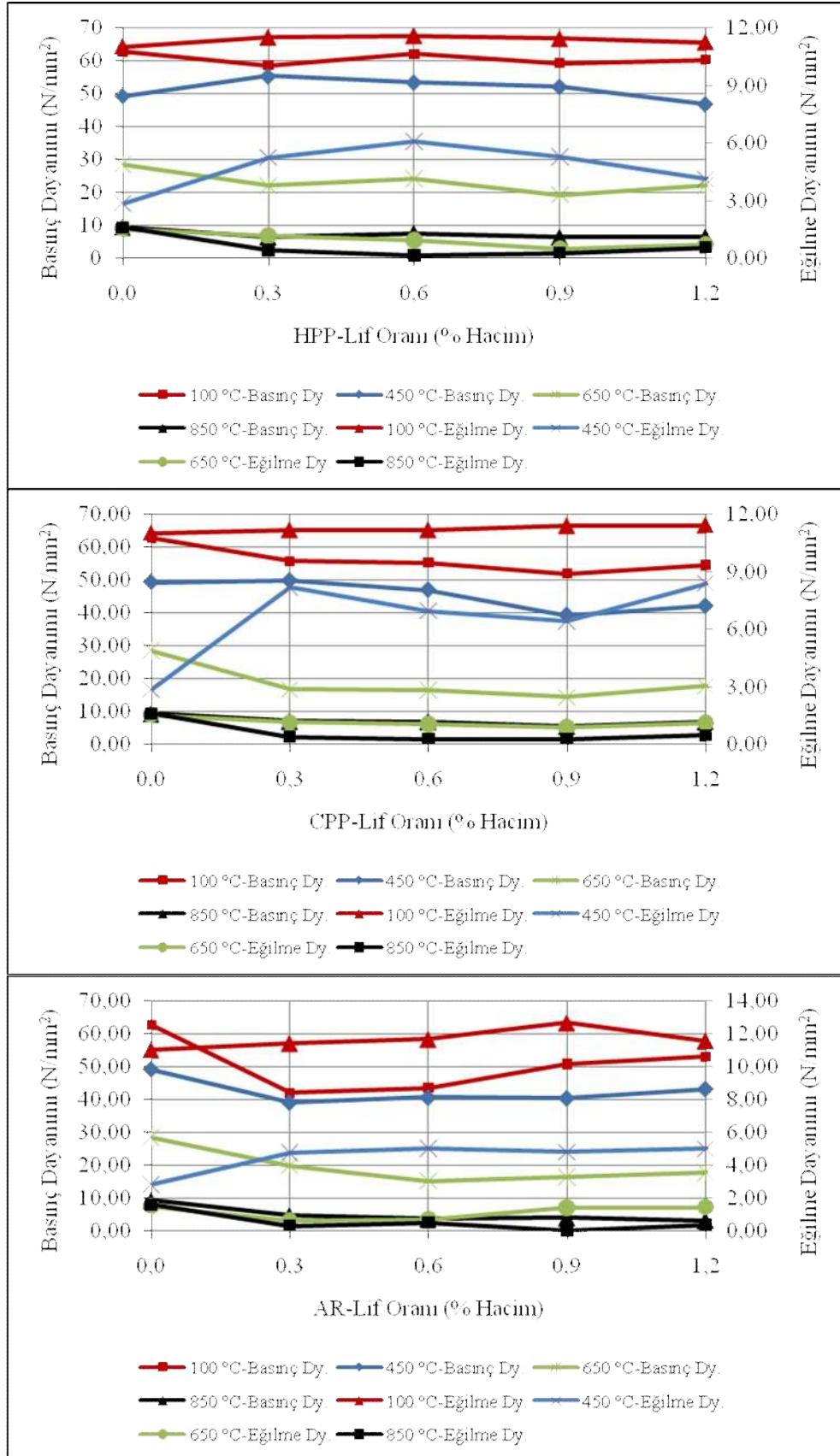
Yukarıda incelendiği üzere, lif ilavesiyle, eğilme dayanımı artarken basınç dayanımı her sıcaklıkta olumsuz etkilenmektedir. Bu alt bölümde, her tür lif için en iyi eğilme ve basınç dayanımını gösteren en uygun lif oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

Yukarıdaki tartışmadan eğilme dayanımı ve basınç dayanımı aynı anda göz önünde bulundurulduğunda her lifin en iyi başarımı farklı ilave oranında gösterdiği anlaşılmıştır.

Şekil 3.16'dan eğilme dayanımındaki en yüksek artışın ve basınç dayanımındaki en düşük azalışın HPP lif içeren örneğın % 0.3-0.9 ilave oranında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum hemen hemen her sıcaklık için geçerlidir. Özellikle 450 °C'de bu lif katkılı harç, lifsiz harçlara nispeten daha iyi performans göstermektedir.

CPP içeren örnekler 100 °C'de hacmen % 0.9 ilave oranıyla en iyi eğilme dayanımı gösterse de başka sıcaklıklarda % 0.3-0.6 CPP ilave oranıyla iyi performans göstermektedir.

Ayrıca Şekil 3.16'dan tüm sıcaklık durumları için, AR içeren örneklerde en uygun lif ilave oranının % 0.9 olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.16. Yüksek sıcaklığa maruz kalan farklı türdeki liflerin katılım oranı ile eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çalışmanın amacına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, üç kısımdan oluşan bu çalışmanın, birinci kısmında en iyi mekanik davranışı sağlayacak olan en uygun lif boyutuna karar verilmiştir. İkinci aşamada polimer lif türleri ve katılım oranlarının çimento harçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üçüncü kısımda ise yüksek sıcaklığın polimer lif katkılı çimento harçlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- a. Çalışmanın birinci kısmında lif katkı oranı (% 2.0 hacim oranında) ve malzeme özellikleri (yalnız karbon lif) sabit tutularak dört farklı boyda (5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm) lif kullanılmış ve böylece çimento hamuruna en iyi mekanik özellikler kazandıran en uygun lif boyu tespit edilmiştir. Buna göre;

Karbon lif katkılı harçların hem eğilme hem de basınç dayanımlarının lif boyutu arttıkça arttığı belirlenmiştir. 20 mm uzunluğundaki lif ilavesi yapılmış harçların, 5 mm lif ilavesi yapılmış harçlara nazaran eğilme dayanımını % 24, basınç dayanımını % 15 artırdığı görülmüştür. Karbon lifi için en iyi lif boyutunun 20 mm olduğuna karar verilmiştir.

- b. İkinci kısımda lif boyları sabit olan üç farklı türdeki (homopolimer polipropilen (HPP), kopolimer polipropilen (CPP) ve aramid (AR)) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, DYK ve EK haldeki numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Buna göre;

1. Farklı türlerdeki polimer türü lifler eğilme dayanımına farkı oranlarda katkı sağlamışlardır. EK durumdaki harçlar için, HPP, % 0.6 ilavede % 5'lik eğilme dayanımı katkısıyla en iyi artışı göstermektedir. CPP'de bu artış, hacmen % 1.2 lif katkısı ile % 4 olarak belirlenmiştir. AR, diğer liflere nazaran şaşırtıcı bir artış göstermektedir. Hacmen % 0.9 AR ilavesi, eğilme dayanımını % 15 dolayında artırmaktadır.

2. DYK durumundaki harçlar kararsız davranış sergilemektedirler. Bunun muhtemel sebebi ıslak ortamda lif ve çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasıdır. Bu da liflerin performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

3. Özellikle CPP lifi ve AR lifi bulunduran harçlarda, her iki durumda da (DYK ve EK) yüksek derecede sehim performansı sergiledikleri gözlemlenmiştir.

4. Bu çalışmada kullanılan polimer türü liflerin ilavesiyle her oranda harç örneklerinin basınç dayanımları düşmektedir. % 0.6 oranında HPP lifi ilavesiyle basınç dayanımındaki düşüş sadece % 1 olarak tespit edilmiştir. CPP lif katkılı harçlar için basınç dayanımındaki düşüş % 9-11 civarında olmuştur. % 1.2 oranında AR lif katkısıyla harçların basınç dayanımı yaklaşık % 25 düşmüştür.

5. Lif katkısı, harçların basınç dayanımını olumsuz etkilediği için, beton karışımı hazırlanırken dayanım sınıfının bir seviye yukarıdan alınması İnşaat Mühendisliği uygulamaları için yararlı olacaktır.

6. Eğilme ve basınç dayanımı aynı anda göz önünde bulundurulduğunda, lifler her lif türü için farklı ilave oranlarında en iyi başarıyı sergilemişlerdir. HPP lifi içeren örnekler için en uygun lif ilave oranı % 0.3 ila 0.9 arasında kalmıştır. AR lifi içeren örneklerde en iyi performans % 0.9 lif katkısıyla sağlanmıştır. CPP lifi içeren örnekler bu çalışmada seçilen oranlar ve durumlar için iyi sonuç vermemiştir.

- c. Son kısımda ise lif boyları sabit olan üç farklı türdeki (HPP, CPP ve AR) polimer lif, beş farklı oranda (% 0.0, % 0.3, % 0.6, % 0.9 ve % 1.2) çimento hamuruna katılarak, beş farklı sıcaklığa (21 °C, 100 °C, 450 °C, 650 °C ve 850 °C) maruz bırakılmış ve bu numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Buna göre;

1. Yüksek sıcaklık etkisi altında çimento matrisinde birçok değişim gözlemlenmiştir. 450 °C’de çimento matrislerinde bazı bozulmalar ve çatlamlar oluşmuş, 650 °C’den sonra ise matris zayıflamış, bozulmuş ve çatlamıştır. Ayrıca sıcaklık arttıkça bazı kimyasal tepkimeler oluşmuştur. Bu nedenle lifli ya da lifsiz harçlarda % 3-8’lik kütle kaybı gerçekleşmiştir.

2. Yüksek sıcaklık altında harçların eğilme dayanımı azalmıştır. Fakat lif ilavesiyle nispeten bir miktar artış gözlemlenmiştir. Lifsiz harçların eğilme dayanımı 450 °C’de % 74, 650 °C’de % 85, ve 850 °C’de % 86 oranlarında düşmüştür. Fakat tüm lifli harçlarda ortalama, 450 °C’de % 31-51, 650 °C’de % 88-92 ve 850 °C’de % 95-96 civarında düşüş gerçekleşmiştir. Normal şartlarda (100 °C), bu çalışmada kullanılan liflerin, harçların eğilme dayanımlarına katkıda bulundukları anlaşılmıştır. Bu katkı 450 °C’ye kadar devam etmiş ve polimer lifler eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini özellikle 450 °C’de göstermişlerdir. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda, lif katkılı harçların, eğilme dayanımı lif katkısız harçlara göre daha düşük çıkmıştır.

3. Kontrol örnekleriyle (lifsiz ve normal koşullarda) karşılaştırıldığında lifli örneklerin normal durumlarda ortalama % 200-236 daha büyük sehim gerçekleştirdiği

ve 450 °C’de % 32-114 yüksek sehim değerleri verdiği görülmüştür. Bu sehim farklılıkları 650°C’de negatif yönde % 42-97 olarak tespit edilmiştir.

4. Harçların basınç dayanımı hem yüksek sıcaklık ile birlikte hem de lif ilavesiyle düşmektedir. Lifsiz harçların basınç dayanımı 450 °C’de % 20, 650 °C’de % 53, ve 850 °C’de % 84 d şm ştir. Polimer lif katkılı harçlarda ise ortalama 450 °C’de % 8-20, 650 °C’de % 60-70 ve 850 °C’de % 88-90 oranlarında d şm ştir. Sonuç olarak lifli harçlar kontrol örneklerine nazaran, basınç dayanımında 450 °C’ye kadar olumlu yönde etki göstermişlerdir.

5. Yüksek sıcaklık altında eğilme ve basınç dayanımı aynı anda dikkate alındığında her lif en iyi başarımını farklı ilave oranında göstermiştir. HPP lif katkılı harçlar için eğilme dayanımındaki en yüksek artış ve basınç dayanımındaki en düşük azalış % 0.3-0.9 lif ilave oranında g r lm ştir. Bu durum hemen hemen her sıcaklık derecesi için geçerli olduğu anlaşılmıştır. Özellikle 450 °C’de HPP lif katkılı harçlar, lifsiz harçlara nazaran daha iyi performans göstermektedir. Her ne kadar CPP lifi içeren  rnekler 100 °C’de en iyi eğilme dayanımını hacmen % 0.9 lif ilavesiyle gösterse de diğer sıcaklık derecelerinde % 0.3-0.6 CPP ilave oranıyla iyi performans göstermektedirler. Her sıcaklık durumu için, AR lifi içeren örnekler için en uygun lif ilave oranı hacmen % 0.9 olarak tespit edilmiştir.

6. En yüksek mekanik özelliklere sahip AR lifi, bu çalışmada kullanılan Polimer lifler arasında en iyi mekanik özellikleri göstermiş ve en iyi başarımı sağlamıştır.

5. KAYNAKLAR

- ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute.
- Anderberg Y. Spalling phenomena of HPC and OC. International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, MD; 13–14 February 1997.
- Asokan P, Osmani M and ADF, Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 448–460.
- Balaguru PN, Shah SP, Fiber-reinforced cement composites, New York, McGraw-Hill Inc, 1992.
- Banthia N and R. Gupta, Influence of polypropylene fibre geometry on plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1263–1267.
- Bhargava AK, Engineering Materials-Polymers, Ceramics, Composites, Prentice Hall Limited, 2004.
- Bazant ZP, Kaplan MF. Concrete at high temperature. Material properties and mathematical models, Longman House, Burnt Mill, England; 1997.
- Cengiz O and L. Turanli, Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1357–1364.
- Choi Y, R.L. Yuan, Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1587–1591.
- Chung DDL, Cement Reinforced with Short Carbon Fibers: a Multifunctional Material, *Composites: Part B*, 31 (2000) 511–526.
- Cülfik MS, Özturan T, Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1486–1493.
- Çavdar A, A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites, *Composites: Part B* (2012), doi:10.1016/j.compositesb.2011.10.005.
- Diederichs U, Jumppanen UM. High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete. *Verlog für architektur und techn.wissencheften, Ernst & schn*; 1992. p. 191–7.

- Do M.H. and Springer G.S., Failure Time of Loaded Wooden Beams During Fire, *Journal of Fire Sciences*, July 1983; vol. 1, 4: pp. 297-303.
- Ersoy H.Y., 2001. 'Kompozit Malzemeler' Literatür Yayıncılık Dağıtım, Pazarlama Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. İstanbul.
- Garces P, J Fraile, EV Ortego, DC Amoros, EG Alcocel, LG Andion, Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 324–331.
- Georgali B, Tsakiridis PE, Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, *Cement Concrete Composites*, 27 (2005), 255–9.
- Han CG, YS Hwang, SH Yang, N. Gowripalan, Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1747–1753.
- Hannant, D. J. 1978. *Fibre cements and fibre concretes*, Wiley, New York.
- Hannant DJ, Durability of polypropylene fibers in portland cement-based composites: eighteen years of data, *Cement and Concrete Research* 28 (12) (1998) 1809–1817.
- Harmathy TZ, Effect of moisture on the fire endurance of building, *ASTM Special Technical Publication*, 1964, 74–95.
- Harris B, *Engineering Composite Materials*, The Institute of Materials, London, 1999.
- Jackson N and R. Dhir, *Civil Engineering Materials*, Palgrave Publishers Ltd, London, 1996.
- Kalifa P, Chene G, Galle C. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres- from spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31, 1487–99.
- Kuder KG, Shah SP, Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 181–186.
- Mehta PK and Monteiro PJM, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Third Edition, New York, 2006.
- Mindess S, Fibre reinforced concrete challenges and prospects, *Fibre reinforced concrete*, N. Banthia and S. Mindess, eds., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993, 1–11.
- National Research Council, *Polymer Science and Engineering*, National Academy Press, Washington, 1994.

- Nishida A, Yamazaki N, Inoue H, Schneider U, Diederichs U, Study on the properties of high-strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance. In: Proceedings of international conference on concrete under severe conditions, Consec'95, Sapporo, Japan; August 1995, 1141–50.
- Noumowé N. Temperature distribution and mechanical properties of highstrength silica fume concrete at temperatures up to 200 °C. ACI Materials Journal, 2003, 326–30.
- Noumowé NA, Siddique R, Debicki G, Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C), Constructions and Building Materials 2009, 23, 1855–61.
- Saçak M., 2010. ‘‘Polimer Kimyası’’ Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara
- Sanjayan G, Stocks L, Spalling of high-strength silica fume concrete in fire, ACI Material Journal, 1993, 90, 170–3.
- Sawyer L, Grubb D and Meyers G, Polymer Microscopy, Springer, Third Edition, 2008.
- Song PS, S. Hwang and B.C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1546–1550.
- Şahin Y., 2000. ‘‘Kompozit Malzemelere Giriş’’ Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- Tonoli GHD, Savastano H, Santos SF, Dias4 CMR, John VM and Lahr FAR, Hybrid Reinforcement of Sisal and Polypropylene Fibers in Cement-Based Composites, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 2, February 1, 2011.
- TSE, 2002. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 6 s.TSE, 2002.
- Çimento Deney Metodları-Bölüm 1: Dayanım, TS EN 196-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 7 s.
- TS EN, 2002. Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, TS EN-12390-7, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2002. Çimento Deney Metodları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, TS EN 196-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 30 s.
- Ulm FJ, Coussy O, Bazant ZP. The ‘‘Chunnel’’ fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete. Journal of Engineering Mechanic 1999, March, 272–82.
- URL-1, <http://camelsan.com.tr/gallery.asp>, 05.01.2012.
- URL-2, http://nuveforum.net/attachments/4004d1213936984-asbestos_with_muscovite.jpg, 05.01.2012.

- Venecanin SD, Thermal incompatibility of concrete components and thermal properties of carbonate rocks, *ACI Material Journal*, 1990, 87 (6), 602–7.
- Wang C, KZ Li, HJ Li, GS Jiao, J Lua, DS Hou, Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites, *Materials Science and Engineering A* 487 (2008) 52–57.
- Won JP, Choi SW, Lee SW, Jang C, Lee SJ, Mix proportion and properties of fire-resistant wet-mixed high-strength polypropylene fiber-reinforced sprayed polymer cement composites, *Composite Structures* 92 (2010) 2166–2172.
- Xiao J, Falkner H. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevates temperatures. *Fire Safety Journal*, 2006, 41, 115–21.
- Yetgin Ş., Ö Çavdar and A. Çavdar, The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 3, Pages 222-227, March 2008.
- Zeiml M, Leithner D, Lackner R, Mang H. How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? *Cement and Concrete Research*, 2006, 36, 929–42.

ÖZGEÇMİŞ

Selahattin Ziya TEKER, 1987 yılında Trabzon’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon’da tamamlayarak 2004 yılında Trabzon Lisesinden Mezun oldu. 2005 yılında girdiği ÖSS sınavı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2010 yılında bu bölümden mezun olarak lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans programına başlayan Selahattin Ziya TEKER, bekardır.