

Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı

Ramazan Cingi

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Ağustos 2017

Behavior of Cement Based Fiber Composites Under High Temperature and Fire Effect

Ramazan Cingi

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

August 2017

Ramazan Cingi

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Y.Doç.Dr. Mehmet CANBAZ

"[Bu Tez ESOGU BAP tarafından \“2016-1176\” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir]"

Ağustos 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ramazan Cingi'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Y.Doç.Dr. Mehmet CANBAZ

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof.Dr. İlker Bekir TOPÇU

Üye : Prof.Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

Üye : Doç.Dr. Cenk KARAKURT

Üye : Y.Doç.Dr. Mehmet CANBAZ

Üye : Y.Doç.Dr. Abdullah DEMİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Y.Doç.Dr. Mehmet Canbaz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

04.08.2017

Ramazan Cingi

ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, çimento esaslı, yüksek dayanımlı lifli kompozitlerin yangın ve yüksek sıcaklıktaki dayanım performansı incelenmiştir. Gelişmiş ülkelerde kullanımı gittikçe artan çimento esaslı yüksek dayanımlı lifli kompozitler genellikle rögar kapakları ve yağmur ızgaralarında kullanılmaktadır. Türkiye'de ise kullanımı maliyet açısından normal betona göre oldukça yüksek olduğundan dolayı kısıtlıdır. Ayrıca bu konu hakkında ülkemizde yeterince Ar-Ge çalışmaları da yapılmamıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının ana amacı; çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın riski bulunan özel yerlerde kullanımı arttırmak, literatüre çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın performansı araştırması ile katkıda bulunmak ve yangına en dayanıklı RPB'lerin üretilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda bilimsel incelemeler yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan çimento esaslı lifli kompozit numunelerinin içeriğinde silis dumanı ve sarı silis kumu bulunmaktadır. Numunelerin içeriğine ayrıca; %0 (referans numunesi); %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında polipropilen lif katılarak 10x10x10 cm³ ve 15x15x15 cm³ boyutlarında olmak üzere toplam 73 adet numune elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerinin bir yüzü aleve maruz kalacak ve diğer yüzünde ısı ölçülecek şekilde bir deney yapılmıştır. Daha sonra numunelerden küçük parçalar alınarak SEM Laboratuvarlarında mikro yapı incelemesi ve EDX taraması yapılmış; numunelerde kimyasal değişimler ve bu değişimlere nelerin yol açtığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı Beton, Lifli Kompozitler, Yangın Etkisi, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Mikro Yapı Analizi, Kabuk Atma, Yüksek Sıcaklık

SUMMARY

In this Master Thesis, cement based fiber composites which is a high strength composite building material is observed its performance in a fire and high temperature. Usually cement based fiber composites, is used in manhole covers and rain gates. In Turkey, because of its expensiveness it is rarely used. Moreover, there has not been enough R & D works on this subject in our country.

The main aim of this master thesis study is; Increasing the use of Reactive Powder Concrete in special locations where there is a risk of fire is to contribute to the study of fire performance of cement based fiber composites in the literature and to produce fire resistant RPBs. For this purpose, experiments and scientific studies were carried out.

Cement based fiber composite samples used in this experiment contain silica fume and yellow silica sand. In addition to the contents of the samples; Polypropylene fibres were added in the proportions of 0% (reference sample); 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1%, and total of 73 samples were obtained with dimensions of 10x10x10 cm³ and 15x15x15 cm³. A fire test was conducted while one surface of specimen is exposure with fire and the other surface is used for temperature measurement. Microstructure examination and EDX scanning were performed at SEM Laboratories; It has been observed that chemical substances in specimens and what leads to these changes.

Keywords: High Strength Concrete, Fiber Composites, Fire Effect, Scanning Electron Microscope (SEM), Micro Structure Analysis, Spalling, High Temperature

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, deneyim, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ'a,

Deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve 2016-1176 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi için gerekli her türlü desteği sağlayan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonu, Sn. Fatih Özalp ve diğer İSTON İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. ve Tic. A.Ő. ve Efectis Era Test ve Belgelendirme AŐ. çalışanlarına,

Çalışmam sırasında yardım, destek ve dostluklarını esirgemeyen değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Ergun Eray AKKAYA'ya,

Her türlü sıkıntı ve sevinçlerimde hep yanımda olan, benden desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevdiğim eşim ve hayat arkadaşım ArŐ. Gör. Didem ODABAŐI CİNGİ'ye

Öğrenim hayatım boyunca, maddi manevi bana her türlü destek olan ve bugünlere ulaşmamda borçlu olduğum annem Hakime CİNGİ, babam Mehmet CİNGİ'ye teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar.....	3
2.1.1. Yüksek dayanımlı özel betonlar	3
2.1.2. Yüksek dayanımlı betonların gelişimi ve özellikleri	4
2.1.3. Su - çimento oranının yüksek dayanımlı betonlara etkisi.....	5
2.1.4. Yüksek dayanımlı betonların içyapısı	6
2.2. Polimer Lifli Çimento Esaslı Lifli Kompozitler	9
2.2.1. Polipropilen lifler.....	9
2.2.2. Polipropilen liflerin sınıflandırılması	11
2.2.3. Polipropilen liflerin çimento esaslı lifli kompozitlerde kullanım amacı	12
2.3. Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisi	13
2.3.1. Yangın – çimento esaslı lifli kompozit ilişkisi	13
2.3.2. Polimer liflerin yüksek sıcaklıktaki davranışı	16
2.4. Çimento Esaslı Lifli Kompozitler ile İlgili Yapılan Çalışmalar	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Üretilen Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler	19
3.1.1. Bağlayıcılar.....	19
3.1.2. Su	20
3.1.3. Agregalar	21

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.4. Kimyasal katkı.....	22
3.1.5. Çelik ve sentetik lifler.....	23
3.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Üretilmesi.....	23
3.3. Mekanik ve Fiziksel Özellik Deneyleri	24
3.3.1. Birim ağırlık deneyi.....	24
3.3.2. Ultrases geçiş süresi deneyi.....	25
3.3.3. Basınç dayanım deneyi.....	26
3.3.4. Yangın ve yüksek sıcaklık deneyi	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	32
4.2. Mikro yapı Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	34
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	53
EK AÇIKLAMALAR-A	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Betondaki CH ve C-S-H'ın elektron mikroskobu altındaki görünümü.....	7
2.2. RPB'de kullanılan çelik lifler.....	9
2.3. Yangın olayının aşamaları.....	13
2.4. Etkin yangın aşamasındaki betonarme bina.....	14
3.1. Numune üretiminde kullanılan sentetik lifler.....	23
3.2. Çimento esaslı kompozit harcının karıştırılması.....	24
3.3. Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deney düzenekleri.....	26
3.4. Basınç dayanım deney düzeneği (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi).....	26
3.5. Yangın ve yüksek sıcaklık deneyi sıcaklık-zaman eğrisi.....	28
3.6. Yangın ve yüksek sıcaklık deney düzeneği.....	29
4.1. Birim ağırlık deneyi sonuçları.....	33
4.2. Ultrases geçiş süresi deneyi sonuçları.....	33
4.3. Basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	34
4.4. Altın kaplama yapılan deney numunelerinin santrifüjde bekletilmesi.....	35
4.5. Referans numunesinin mikro yapısı.....	35
4.6. Referans numunesinin EDX analizi.....	36
4.7. % 0.25 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	37
4.8. % 0.25 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	38
4.9. % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	38
4.10. % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	39
4.11. % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	40
4.12. % 0.75 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	41
4.13. % 1 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	41
4.14. % 1 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	42
4.15. Yangın etkisinde kalmış referans numunelerin mikro yapısı.....	43
4.16. Yangın etkisinde kalmış referans numunelerin EDX analizi.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.17. Yangın etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	44
4.18. Yangın etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	45
4.19. Yangın etkisinde kalmış % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı.....	45
4.20. Yangın etkisinde kalmış % 0.5 plastik lif içeren numunelerin EDX analizi.....	46
4.21. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış referans numunelerin mikro yapısı.....	47
4.22. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış referans numunelerin EDX analizi.....	48
4.23. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.25 plastik lifli numunelerin mikro yapısı..	48
4.24. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.25 plastik lifli numunelerin EDX analizi.	49
4.25. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.5 plastik lifli numunelerin mikro yapısı...	49
4.26. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.5 plastik lifli numunelerin EDX analizi....	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Normal beton, yüksek dayanımlı beton ve lifli yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	8
2.2. Polipropilen liflerin sınıflandırılması.....	11
3.1. 1 m ³ çimento esaslı lifli kompozit numunesindeki pudra betonundaki teorik malzeme miktarı.....	19
3.2. CEM I 42.5 R özellikleri.....	20
3.3. Kullanılan silis dumanı özellikleri.....	20
3.4. İstanbul Ömerli Barajı su kalite raporu (Ekim 2016).....	21
3.5. Kullanılan agreganın özellikleri.....	22
3.6. Kullanılan kimyasal katkıının özellikleri.....	22
3.7. Kullanılan liflerin özellikleri.....	23
3.8. TS EN 206-1'e göre normal betonun basınç dayanım sınıfları.....	27
3.9. Reaktif pudra betonu numuneleri üzerinde yapılan deneyler.....	30
4.1. Kontrol karışımlarının özellikleri.....	32

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

İSTON

RPB

RPB200

RPB800

SEM

Açıklamalar

İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. ve Tic.
A.Ş.

Reaktif Pudra Betonu

170-220 MPa basınç dayanımına sahip reaktif pudra betonu

800 MPa'a kadar basınç dayanımına sahip reaktif pudra betonu

Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Çimento esaslı lifli kompozitler liflerle güçlendirilmiş, çok düşük su / çimento oranında çimento ve silis dumanı karışımının süper akışkanlaştırıcı kullanılarak ince öğütülmüş kuvars tozuyla karıştırılması sonucu elde edilen yüksek dayanımlı kompozit bir yapı malzemesidir. Gelişmiş olan ülkelerde kullanımı gittikçe artan reaktif pudra betonunun; Türkiye'de kullanımı maliyet açısından normal betona göre oldukça yüksek olduğundan dolayı kullanım alanları kısıtlı kalmaktadır. Bu nedenle reaktif pudra betonu üzerine ülkemizde ar-ge yeterince yapılmamıştır. Üretimi yapılan çimento esaslı lifli kompozitlerin kullanım alanları rögar kapakları ve yağmur ızgaraları ile sınırlı kalmaktadır.

Çimento esaslı lifli kompozitlerde çok az boşluk bulunduğu için yüksek sıcaklıklara karşı direnci düşüktür. Böyle ortamlarda kompozitin içindeki serbest su buharlaşır, ancak bu su buharı malzemenin yoğun yapısından dolayı uzaklaşamaz. Sonuç olarak beton yüzeyinde dökülmelere sebep olur.

Çimento esaslı lifli bir kompozit olan Reaktif Pudra Betonunu da (RPB) dayanımı polipropilen kullanıldıkça düşmektedir. Ancak polipropilen lif kullanılmayan reaktif pudra betonunun 900⁰C'nin üzerinde kullanımı uygun değildir. Yüksek sıcaklık riski olan yerlerde Polipropilen (Plastik) lif kullanılan ve yüksek sıcaklıkta küre maruz bırakılan RPB'ler üretilmelidir (Canbaz, 2014). Lif kullanılan RPB'lerin yüksek sıcaklıklara karşı normal betondan daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Ancak yangın, yüksek sıcaklıkla aynı etkiyi göstermez. Bunun nedeni, yangında alevlerin direk beton yüzeyine tesir etmesidir. RPB'ler, normal betona kıyasla düşük su - çimento oranı içerdiklerinden; yangında kabuk atma riskinin daha büyük olması beklenir. Literatürde bu konuda yapılmış yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, lifli kompozitlerin sadece yüksek sıcaklığa değil, yangına karşı da etkisini incelemek ve hangi lif oranında, yangına ne kadar süre dayanabileceğini tayin etmek üzere, çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın performansı araştırılmıştır. Yapılacak deneyler ile yangının çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısında nasıl bir değişim meydana getirdiği de incelenmiştir.

Çimento esaslı lifli kompozitlerin; yangın riski bulunan özel yerlerde kullanımı arttırmak (jet motorlarının egzozlarına maruz kalan havaalanı ızgaralarında; orman yangını riski taşıyan köprülerde, acil durumlar için geçiş tünellerinde vb.), literatüre Çimento esaslı lifli kompozitlerin, özellikle reaktif pudra betonlarının yangın performansı araştırması ile katkı sağlamak ve de yangına en dayanıklı çimento esaslı lifli kompozitin üretilmesini sağlamak amacıyla bir dizi deney ve inceleme yapılmıştır.

Çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın ve yüksek sıcaklık performansının incelenmesi için yüksek dayanımlı çimento esaslı lifli beton numuneleri hazırlanmıştır. İçeriğinde Silis dumanı ve Sarı Silis kumu bulunan bu numunelerin içeriğine ayrıca; %0 (referans); %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 Plastik Lif (Polipropilen Lif) katılarak 10x10x10 cm³ ve 15x15x15 cm³ boyutlarında olmak üzere toplam 73 adet numune elde edilmiştir. Hazırlanan çimento esaslı lifli kompozit numunelerinden seçilecek 15 numune (Her lif oranı için 3'er numune) bir yüzü aleve maruz kalacak diğer yüzünde ısı ölçülecek şekilde bir yangın ve yüksek sıcaklık deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonunda seçilmiş numunelerden küçük parçalar alınarak SEM Laboratuvarlarında mikro yapı incelemesi yapılmış; numunelerdeki kimyasal değişimler gözlemlenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar

2.1.1. Yüksek dayanımlı özel betonlar

Betonları, kullanım alanları, fiziksel ve kimyasal özelliklere bağlı olarak 2 sınıfta incelemek mümkündür:

Normal betonlar üretimi kolay, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilen ve basınç dayanımları genellikle 20 MPa ile 50 MPa arasında değişen betonlara normal betonlar denmektedir. Doğal taneli agrega ile üretilir ve birim ağırlıkları genellikle 1.800-2.800 kg/dm³ arasında değişir. Bu betonlar önemli bir ayrıcalık özelliği istenmeyen yapılarda kullanılmaktadır. Yol, bina, tünel, sanat yapıları vb. yapılar göz önünde bulundurulduğunda bu betonların uygulamada her zaman yer bulacağı söylenebilir. Üretim maliyeti ucuz olup dayanımı görece yüksektir. Kolay işlenebilme özelliklerine sahiptir ve günümüzde diğer tüm yapı malzemelerine göre daha fazla kullanılmaktadır (Demirkollu, 2015).

Diğer beton sınıfı olan özel betonlar ise, normal betonların fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinde amaca uygun olarak iyileştirme yapılması ile elde edilirler. Yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, hafif betonlar, polipropilen ve çelik tel takviyeli betonlar, püskürtme betonlar, reaktif pudra betonları ve ultra yüksek dayanımlı betonlar bu sınıfta örnek olarak gösterilebilir. Özel betonların üretim maliyeti normal betonlara göre daha yüksektir (Özalp, 2006).

Gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde yüksek dayanımlı özel betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Günümüzdeki büyük gelişmelerin sonucu olarak hem üretim teknolojisi hem de deneysel tekniklerdeki gelişmeler betonun dayanımına da yansımıştır. Son zamanlarda gökdelenlerde,

reaktörlerde, deniz yapılarında, savunma amaçlı depolama binaları gibi uzun servis ömrü istenen yapılarda kullanması da yüksek dayanımlı betonlara karşı artan bir ilginin oluşmasına neden olmaktadır. TS500, C50'ye (28 günlük silindir basınç dayanımı 50 MPa) varan beton dayanımı öngörmekle birlikte TS EN 206-1, C100'e kadar beton sınıfını hedeflemektedir. Avrupa'da da Almanya'nın öncülüğünde C60- C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım ilkeleri ve hesap yöntemleri geliştirilmeye devam etmektedir (Karabulut, 2006). Halen dünyanın en uzun gökdeleni kabul edilen; çelik yapı ve betonarmenin kompoze bir sistemle bir arada kullanılmasıyla inşa edilen bir Burç Halife'de C80/100 sınıfı beton kullanılmıştır.

2.1.2. Yüksek dayanımlı betonların gelişimi ve özellikleri

Çimento, agrega, su ve gerekirse katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen beton; başlangıçta plastik kıvamlı olup daha sonra sertleşen ve döküldüğü kalıbın şeklini alan bir inşaat yapı malzemesidir. İngiltere'de J. Smeaton 1793'te içerisinde kil olan kireç taşlarını fırınlayarak farklı bir kireç elde etmiştir. Bu kireçle yapılan harcın su altında sertleştiği gözlemlenmiş ve modern çimentonun keşfinin yolu açılmıştır. J. Aspdin'in 1824'te öğütülmüş kireç taşı ve kili fırınlayarak "Portland Çimentosu" denilen modern çimentoyu keşfetmesiyle kısa sürede beton; tüm dünyada en sık kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir.

Betonun temel yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla birlikte ilk betonarme bina 1875'te, ilk betonarme köprü 1889'da ve ilk betonarme gökdelen 1904'te yapılmıştır. Günümüzde hala beton en sık kullanılan yapı malzemesi olmakla birlikte, ilk kullanılmaya başladığı günden itibaren üzerinde sürekli olarak araştırma yapılmakta ve iyileştirme çalışmaları durmaksızın devam etmektedir. Bu iyileştirme çalışmalarının temelini en düşük maliyetle en yüksek dayanımlı betonun oluşturulma isteği oluşturmaktadır.

Reaktif pudra betonu (RPB) içeriğindeki silis dumanı ve çok küçük mertebedeki agrega çapı ile; ince taneli malzemelerden oluşan yüksek dozajda çimento ve çok düşük su oranına sahip betonlardandır. RPB, yüksek dayanımlı özel betonlara örnek olarak gösterilebilir. Basınç dayanımı 200 ile 800 MPa arasında, çekme dayanımı 25 ile 150 MPa arasında, kırılma enerjisi yaklaşık 30000 J/m², elastisite modülü 50000 ile 75000 MPa

arasında ve birim ağırlığı 2500-3000 kg/m³ değerleri arasındadır. Bu özellikleri ile RPB'ler üstün mekanik ve fiziksel özelliklere, mükemmel sünekliğe ve çok düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı betonlardır (İpek, 2011).

RPB ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve ilk çalışmalar Richard ve Cherezy tarafından yapılmıştır. RPB'lerin ilk kullanımı ise Kanada'nın Quebec eyaletinin güney doğusunda bulunan Sherbrooke şehrinde yaya köprüsünde olmuş ve kullanımı daha sonraki yıllarda giderek artmıştır (Richard ve Cherezy, 1995).

RPB üretebilmek için öncelikle su / çimento oranını en düşük düzeyde tutmak gerekir. Bunun için beton içindeki boşluk oranı çok az olmalıdır. su / çimento oranı eşit ya da birbirine yakın olan tasarımlar karşılaştırıldığında içerisinde çelik lif olan tasarımlar her seferinde daha yüksek basınç ve çekme dayanımına ulaşmıştır. RPB üretebilmek için tasarıma en az % 3-4 oranında çelik lif ilave edilmelidir.

2.1.3. Su - çimento oranının yüksek dayanımlı betonlara etkisi

1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15-25 MPa arasında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşınabilmesi için 40-50 MPa beton basınç dayanımlarına ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. 1892 yılında Fransa'da Ferret ve daha sonra Amerika'da Abram's tarafından ortaya konulan Abrams Kuralına göre. "Beton ne kadar az su içerirse, o kadar dayanımlı olur." Kural, aynı beton bileşenleri (karışım içeriği) ve test koşullarında karışımdaki çimento miktarı ve su - çimento oranının beton karışımının işlenebilir olması koşuluyla, beton dayanımını belirlediğini söylemektedir. Bu kurala göre, bir beton veya harcın dayanımı karışımda kullanılan su kütlesinin, çimento kütlesine oranına bağlıdır. Betondaki dayanım artışıyla doğru orantılı olarak zaman içerisinde su - çimento oranında da düşüş gerçekleşmiştir.

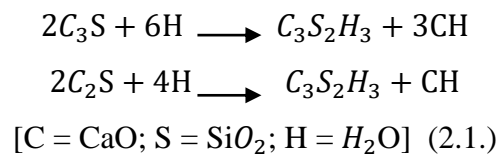
1950'li yıllarda su - çimento oranı 0.60-0.70 aralığında değişirken 1970'li yıllarda akışkanlaştırıcıların kullanılmaya başlaması ile bu aralık 0.40-0.55'e düşmüş, 1980 ve 1990'lı yıllarda ise süper akışkanlaştırıcılar sayesinde su - çimento oranı 0.25-0.35 aralığına kadar inmiştir (Topçu ve Karakurt, 2005).

Reaktif pudra betonu karışımında çok ince agrega kullanılması nedeniyle mikro boşluklar azaltılmıştır. Dolayısıyla eğilme ve basınç dayanımında artışlar gözlemlenmiştir. Karışımında gerçekleştirilen bu düzenleme ile betonun porozitesinin azaldığı donma-çözülme gibi çevresel etkilerine karşı direncinin ise arttığı görülmüştür. Portland çimentosu içerikli kompozitler ile karşılaştırıldığında RPB'nin en belirgin özelliği, düşük boşluk oranı, homojen yapısı ve güçlendirilmiş çimento matrisidir. Reaktif pudra betonu karışımında çok ince taneli agreganın ultra ince bir malzeme olan silis dumanı ile birlikte kullanılması agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyini arttırmaktadır. Bu durum da RPB'nin mekanik özelliklerinin iyileşmesine olanak vermektedir.

2.1.4. Yüksek dayanımlı betonların içyapısı

Ultra yüksek dayanımlı betonlara en iyi örneklerden biri olan reaktif pudra betonu (RPB); en büyük parçacık boyutu yaklaşık 800µm olan ultra yüksek dayanımlı bir yapı malzemesidir. Çok ince puzolanik malzeme, yapılarda dayanımı artırıcı olarak kabul edilse de silis dumanı RPB'lerde tek başına dayanıma katkıda bulunmaz.

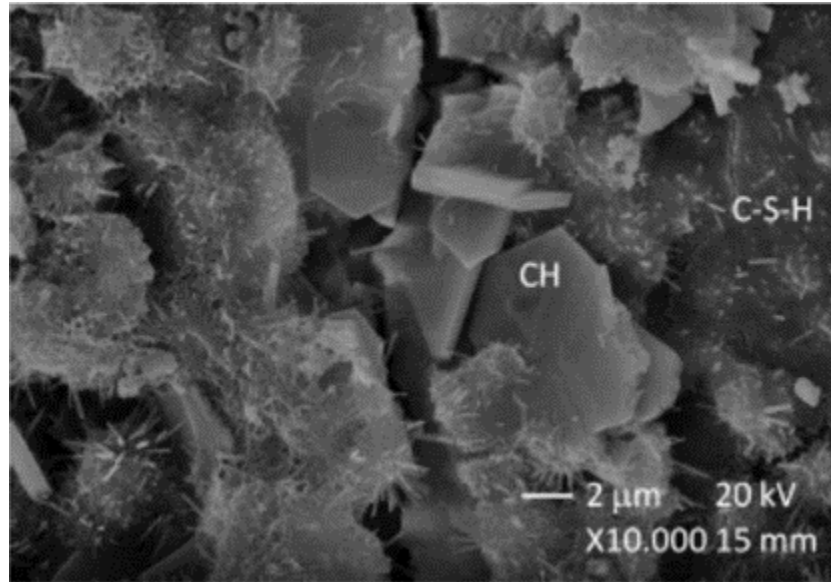
Silis dumanı, uçucu küllerden veya diğer doğal puzolanlardan çok daha reaktiftir. Bu reaktivite; RPB karışımındaki toplam $Ca(OH)_2$ miktarının farklı zamanlarda ölçülmesi ile gözlemlenebilir. RPB karışımındaki hidrasyon reaksiyonunun Denklem 2.1'deki gibi olduğu görülmektedir.



Buradaki $C_3S_2H_3$ 'e C-S-H veya kalsiyum silikat hidrat jelleri denmektedir. Betona dayanım kazandırma özelliği bulunmaktadır. Kalsiyum Silikat Hidrat Jelleri; İçyapı olarak genellikle lif ve ince levha ya da yaprak halinde olmak üzere iki değişik şekle sahiptir. Yapısında fazla boşluk içerdiğinden bünyesine fazla su alırlar. Yapısındaki suyu kaybetmeleri halinde dayanımlarında azalma olurken su tekrar içyapıya girdiğinde dayanımı yeniden kazanırlar. Ayrıca C-S-H jelleri dağılımında bir düzen yoktur. C-S-H

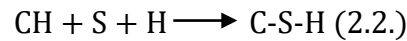
jellerinin yüzeylerinde de su yer almaktadır. Ayrıca jel yapısındaki iç tabakalar arasında çok küçük jel boşlukları bulunmaktadır.

Hidratasyon ile üretilen kalsiyum hidroksit (CH) hacimce karışımın % 20-25'ini kaplar ve dayanıma katkıda bulunmaz. CH düzgün altıgen şeklinde tabakalı bir yapıdadır. C-S-H bileşimine oranla oldukça büyük boyutta olan CH genelde boşluklarda ve karışımın agrega ara yüzeylerinde birikir. Çimentonun boşluklu yapısının sebebidir. Şekil 2.1.'de taramalı elektron mikroskobu altında betondaki kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum silikat hidrat jelleri (C-S-H) görülmektedir.



Şekil 2.1. Betondaki CH ve C-S-H'nin elektron mikroskobu altındaki görünümü (Armentrout, 2009)

Boşluk oluşumunu azaltmanın yolu mineral katkıların kullanılmasıdır. Amorf silis dumanı ve uçucu kül ilavesi, kalsiyum hidroksit karşılığında daha fazla C-S-H oluşturulmasını sağlar C-S-H oluşumu Denklem 2.2'de gösterilmiştir.



Sonuçta RPB'de silis dumanının düşük su - çimento oranında basınç dayanımını ve akışkanlığı arttırdığı görülmüştür.

Mekanik özellikler açısından RPB'den C-S-H yapısının kuvvetlenmesiyle karışımın yoğun yapısı basınç dayanımını en üst değere taşımaktadır. Bu yüksek dayanım; RPB'nin yapılarda Çelik donatı olmaksızın kullanılabilmesini sağlamıştır. Kırılma Enerjisi açısından bakıldığında RPB, normal betonlara göre 240 kat daha fazla enerjiyi karşılamaktadır. Lifli yüksek dayanımlı betonların normal ve yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Normal beton, yüksek dayanımlı beton ve lifli yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. (İpek, 2011).

Mekanik özellikler	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Lifli Yüksek Dayanımlı Beton
Basınç Dayanımı, MPa	20-60	60-115	200-800
Eğilme Dayanımı, MPa	4-8	6-10	50-140
Kırılma Enerjisi, J/m ²	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite Modürü, GPa	20-30	35-40	60-75

Reaktif pudra betonlarında çelik lifler (bkz. Şekil 2.2.) kullanıldığında, basınç dayanımındaki artış, çelik lifler olmadan elde edilen basınç dayanımından % 10 ila % 15 daha fazladır. Çelik lifler kullanılarak elde edilen RPB'nin eğilme dayanımı sıcak su kürü uygulandığında düz RPB'ye kıyasla %50 artmış ve normal kür uygulandığı kabul edildiğinde de düz RPB'den %18 daha yüksek olmuştur (Maroliya, 2012).



Şekil 2.2. RPB’de kullanılan çelik lifler

Termogravimetrik ve XRD çalışmaları, RPB’deki mikro yapısal değişikliklerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. C-S-H’ın yüksek sıcaklıklarda RPB’nin mikro yapısını değiştirdiği gözlemlenmiştir. Puzolanik aktivite de ortam sıcaklığına bağlı olarak şiddetlenmektedir. RPB’de 200 °C ile 250 °C arasında bir kristal hidrat olan ksonotlit gözlemlenmiştir (Cheyrezy vd.,1995).

2.2. Polimer Lifli Çimento Esaslı Lifli Kompozitler

2.2.1. Polipropilen lifler

Sentetik lifler, sentez yoluyla üretilen polimerlerden çeşitli kimyasal yöntemler kullanılarak elde edilen liflerdir. Bu tarz liflerin molekülleri doğada bulunmamaktadır ve tamamen yapaydır. Önceleri doğal liflerin yerini tutması ve doğal liflerin ihtiyacı karşılamaması durumunda kullanılmak üzere üretilmiştir. Ancak daha sonra tüketicinin farklı taleplerine yanıt verebilmesi amacıyla çeşitli özellikler geliştirilmiştir.

Kimyasal yapılarına göre sentetik lifler beş grupta incelenmektedir. Bunlar: Poliester lifleri, (Terilen, trevira), poliamid lifleri, (Naylon 6, naylon 6.6, naylon 11), polivinil lifleri, (Akrilik, modakrilik, polivinilklorür, polivinilidenklorür, polivinilalkol, polistren), poliolefin lifleri (Poliyeten lifleri, polipropilen lifleri, politetrafluoroetilen lifleri) ve poliüretan lifleridir. (Karahana, 2006).

Bir sentetik lif olan polipropilen, malzeme olarak termoplastiklerin içinde yer alan ve oldukça hafif bir polimer olup günlük hayatta kullanılan plastiklerin çoğunun hammaddesini oluşturmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, üretimi diğer sentetik liflere nazaran daha ucuz bir plastik oluşu da söylenebilir.

Plastik malzemelerin dışında polipropilen lifler beton ve sıvada da kullanılmaktadır. polipropilen lifli betonun en önemli etkisi, beton dökümünden sonraki ilk saatlerde plastik büzülme nedeniyle oluşacak çatlakları kontrol altına alma yeteneğidir. Söz konusu plastik büzülme, esas itibarıyla su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve buharlaşmanın bir sonucudur. Bununla birlikte polipropilen lifler, çelik liflere nazaran betonun mekanik dayanımlarını arttırmada etkili olmazlar. Yine de azda olsa betona enerjiyi absorbe etme özelliği kazandırır ve plastik rötrede çok etkili olurlar. Özellikle çok güçlü olmayan büzülmeleere karşı polipropilen lifler günümüzde çok tercih edilmektedirler.

Polipropilen liflerin fonksiyonu betonun yumuşak, plastik safhasıyla sınırlı iken, çelik liflerin dayanım artırıcı etkisi beton prizini alıp sertleştikten sonra da belirgin şekilde devam eder. Betonun plastik safhasında çelik liflerin çatlak önleyici ve sınırlayıcı etkisi de mevcuttur. Ancak, betonda mükemmel şekilde dağılmış olan polipropilen liflerin etkisine göre zayıftır. Bununla birlikte sertleşmiş betonda uzun dönemde kuruma büzülmeleerinden dolayı oluşacak çatlakların azaltılmasında çelik lifler malzemeye belirli bir dayanıklılık ve tokluk vererek betonun dayanımını önemli ölçüde arttırır (Açıkgenç vd., 2012).

Polipropilen lif betonun içinde üç boyutlu bir mikro donatı ağ oluşturarak, betonda doğal olarak varlığı kabullenilen eksiklik ve zaafı azaltır ve betonun bazı özelliklerini iyileştirebilirler. Polipropilen lifleri hasır demir en hafif mikro donatı sistemidir. m² başına ağırlığı 90 gram ila 200 gram arasında değişmektedir. Polipropilen liflerin bu derece hafif

olması; yapıya diğer donatı sistemleri kadar ölü donatı ağırlığı vermemelerini sağlamaktadır.

Polipropilen lifler bir katkı maddesi olarak beton, sıva, harç ve püskürtme beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanımında ilave işçilik gerektirmeyen, kolay uygulanabilen, betonun ve sıvanın kalitesini artırmak için kullanılan çürümeyen bir üründür. Polimer liflerden betona katılan ve en iyi sonucu veren ve en yaygın kullanılan polipropilen liflerdir (Karahana, 2006).

2.2.2. Polipropilen liflerin sınıflandırılması

Polipropilen lifler F ve M olmak üzere iki tipte imal edilmektedir. F–fibrilize elyaflarını, M–multifilament elyaflarını 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. Polipropilen lif tipleri ve teknik özellikleri Çizelge 2.2.’de gösterilmiştir:

Çizelge 2.2. Polipropilen liflerin sınıflandırılması. (Açıkgenç vd., 2012).

Tip	Fibrilize	Multifilament
Polipropilen (%)	100	100
Ürün Tipi	Standard F	Standard M
Yoğunluk (kg/dm ³)	0.91	0.91
Kesit	Karesel	Yuvarlak
Kalınlık (n)	36	18
Renk	Transparent	Transparent
Görünüm	Visible	Invisible
Gerilme Dayanımı (MPa)	500	700
Young Modülü (MPa)	7161.20	7161.20
Uzama (%)	Max 10	Min 10
Uzunluk (mm)	3 – 6 – 23 – 15 – 19 – 25 – 31 – 37 – 46 – 51	

2.2.3. Polipropilen liflerin çimento esaslı lifli kompozitlerde kullanım amacı

Beton; yangın etkisi altındayken özellikle sıcaklık değişimi ve boşluk basıncı artışına bağlı olarak parçalanmaktadır. Parçalanmaya karşı aktif ve pasif koruma sağlamak için teknolojik çözümler geliştirilmiş ve son zamanlarda yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonun arta kalan özelliklerini iyileştirmek amacıyla çok sayıda lif kullanılmaya başlanmıştır.

Polipropilen lifler 170 °C’de eriyerek lif kanalları oluşturmaktadır. Bu kanallar gazların dışarı çıkmasına neden olur ve boşluk basıncını azaltarak betonda oluşan hasarın derecesini azaltır. RPB’de polipropilen lifli betonun en önemli etkisi, beton üretiminden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülmelerden dolayı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Sertleşme priz almanın ilk safhasında beton dayanımının oluşma hızı, büzülmelerden dolayı meydana gelen iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Söz konusu plastik büzülme esas olarak su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve buharlaşmanın tabii bir sonucudur (Karahana, 2006).

Betonda olduğu gibi reaktif pudra betonunda da polipropilen ve çelik lifler genel olarak yüksek sıcaklık ve yangında çatlama ve parçalanmayı azaltmak için kullanılmaktadır (Yaprak ve Karacı, 2009).

Genel olarak polipropilen lifler,

- Betona çok iyi şekilde yapışırlar,
- Beton içinde homojen olarak dağılırlar,
- Büzülme gerilmelerine karşı bir direnç meydana getirirler,
- Büzülmeden dolayı oluşacak çatlak tehlikesini asgari düzeye indirirler
- Elastisite modülü değeri plastik haldeki betona oranla oldukça yüksektirler,
- Etkileri betonun plastiklik safhasında geçerlidir ve katkı malzemesi görevi görürler.

2.3. Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisi

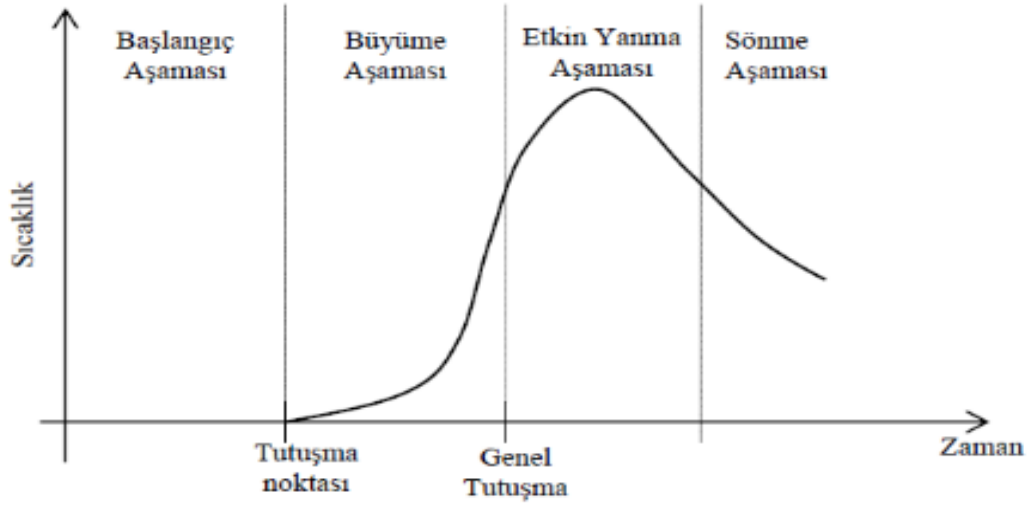
2.3.1. Yangın – çimento esaslı lifli kompozit ilişkisi

Bir cismin oksijenle birleşmesi sırasında oluşan kimyasal tepkimelerin tümüne yangın denmektedir. Yangının olayının gerçekleşmesi için ortamda üç etmenin birlikte bulunması gerekmektedir. Bunlar; yanıcı bir malzeme, oksijen ve ısı kaynağıdır. Tutuşmanın asgari sıcaklığı, yanıcı malzemenin cinsine, şekline, yüzeyine ve porozitesine bağlıdır. Yanış hızı ise, yanma yerinde oksijenin yenilenme olanaklarıyla orantılıdır (Harmanthy, 1986).

TS EN-2 ve TS-EN 2/A1'e göre yangın sınıflarının tarifi aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

- Sınıf A: Yanmanın, normal olarak parlak korların oluşumuyla yürüdüğü, genellikle organik esaslı katı madde yangınları,
- Sınıf B: Sıvılar veya sıvılaştırılabilir katılar ile ilgili yangınlar,
- Sınıf C: Gaz yangınları,
- Sınıf D: Metal yangınları,
- Sınıf F: Pişirme gereçlerindeki pişirme ortamı (bitkisel veya hayvansal sıvı ve katı yağlar) yangınları

Bir yangında Q; sıcaklığının t zamanına bağlı değişim diyagramının incelenmesi, yangın olayını üç aşamaya ayırır. Çıkış ve gelişme aşamasından etkin yanışa geçiş genelde kısa bir zaman aralığında gerçekleşir ve genel tutuşma olarak adlandırılır. Genel tutuşma gerçekleştikten sonra etkin yanma aşamasına geçilir. Bu aşamaya geçen bir cisim dışardan söndürücü bir müdahalede bulunulmadığı sürece yanmaya devam etmekte ve yanan cismin içyapısının tamamen bozulmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.3'te yangın olayının aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.3. Yangın olayının aşamaları

Eğilme ve çekme güçlerine dayanması için içine metal yerleştirilmiş betonlara betonarme yapı denilmektedir. Betonarmenin betonun yangın dayanımı ile ilgili özellikleri bu kompozit yapı sistemini oluşturan çelik ve beton malzemelerinin özelliklerine bağlıdır.

Sıcaklığa karşı çok hassas olan donatı ve öngörme çeliklerinin fazla ısınmaya karşı korunmalıdır. Bu görev yeter kalınlıktaki beton pas payı tabakası tarafından üstlenir. Pas payı tabakası ısı yalıtkanlığı görevini yerine getirir.

Sıcaklık arttıkça çeliklerin çekme dayanımı ve akma sınırı gibi mekanik özellik değerlerinin hızla azaldığı ve 500~600 °C gibi yüksek sıcaklıklarda bütün çelik türlerinin hemen hemen aynı derecede düşük mekanik özelliklere sahip oldukları görülmüştür. Buna ilave olarak dikkat edilmesi gereken bir nokta da soğuk şekil değiştirme yolu ile sertleştirilmiş çelik türlerinde yangındaki ısınma ve soğuma sonucunda çeliğin setliğini kaybedecek kalitesini değiştirmesidir. Etkin yangın aşamasındaki betonarme yapı Şekil 2.4.'te gösterilmiştir. Yapıda yükselen sıcaklıkla birlikte hem betonun hem de çeliğin dezenformasyona uğradığı görülmektedir:



Şekil 2.4. Etkin yangın aşamasındaki betonarme bina (Anonim, 2008)

Betonun yangına maruz kaldığında göstereceği davranış, içeriğindeki agreganın ve çimento harcının özelliğine, rutubet miktarına, beton içerisindeki hava yüzdesine ve yangın sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık derecesine bağlıdır. Beklenilenin aksine, yüksek dayanımlı betonlar yangın durumunda oluşacak yüksek sıcaklığa karşı, düşük dayanımlı betonlara göre daha az dirençlidir ve bu davranış deneylerle kanıtlanmıştır (Erdoğan vd., 2014).

Yüksek dayanımlı betonlarda su - çimento oranı yangın performansı için büyük önem taşımaktadır. Düşük su - çimento oranı elemanın yangında dökülme – kabuk atma ihtimalini arttırmaktadır (Phan, 2007).

Beton genel anlamda 500-600 °C'de büyük hasarlar almaya başlar fakat içerisindeki bileşenlerin yani çimentonun, su içeriğinin ve kullanılan agreganın yüksek sıcaklığa dayanımlı olarak seçilmesi bu özelliği büyük ölçüde artırır (Uysal, 2004). 250°C'a kadar yüksek sıcaklığa maruz kalacak beton yapılarda kullanılacak olan agregaların uygunluk deneylerinin yaptırılması gerekmektedir. Ayrıca yangına karşı beton direncinin artırılması için polimer liflerin kullanımına izin verilebilir (TS EN 206-1, 2014).

2.3.2. Polimer liflerin yüksek sıcaklıktaki davranışı

RPB'nin dayanımı polimer liflerin (Poliprolenlerin) kullanıldıkça düşmektedir. Bununla birlikte Polipropilen lif kullanılmayan reaktif pudra betonunun 900 °C'nin üzerinde kullanımı uygun değildir. Yüksek sıcaklık riski olan yerlerde Polipropilen (plastik) lif kullanılan ve yüksek sıcaklıkta küre maruz bırakılan RPB'ler üretilmelidir (Canbaz, 2014).

Lif kullanılan RPB'lerin yüksek sıcaklıklara karşı normal betondan daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Ancak yangın, yüksek sıcaklıkla aynı etkiyi göstermez. Bunun nedeni, yangında alevlerin direk beton yüzeyine tesir etmesidir. RPB'ler, normal betona kıyasla düşük su - çimento oranı içerdiklerinden; yangında kabuk atma riskinin daha büyük olması beklenir. Literatürde bu konuda yapılmış yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, reaktif pudra betonunun sadece yüksek sıcaklığa değil, yangına karşı da etkisini incelemek ve RPB'nin hangi lif oranında, yangına ne kadar süre dayanabileceğini tayin etmek üzere, RPB'nin yangın performansı araştırılmıştır. Yapılacak deneyler ile yangının RPB'nin mikro yapısında nasıl bir değişim meydana getirdiği de incelenmiştir.

2.4. Çimento Esaslı Lifli Kompozitler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

1990'lı yıllarda Richard ve Cheyrezy tarafından geliştirilen reaktif pudra betonları üzerinde, bu zamana kadar birçok araştırma yapılmış, RPB'lerin dayanımını artırma, mümkün olan en sıkı mikro yapıyı elde etme, çevresel dış etkilere karşı RPB'leri daha dayanıklı hale getirme, üretim teknolojisini geliştirme ve kolaylaştırma gibi birçok amaç hedeflenmiştir.

Reaktif pudra betonu basınç dayanımlarına göre RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bu iki grup arasında, RPB'nin üretim teknolojisinden gelen farklar bulunmaktadır. RPB200 normal betonun üretim teknolojisiyle benzer şekilde üretilir. Basınç dayanımı 170 MPa ve 230 MPa arasındadır. RPB800 ise karışımında çelik lif gibi farklı malzemeler içeren ve farklı kür teknolojileriyle üretilmiş, dayanımı 800 MPa'ya kadar çıkan betonlardır (Bonneau vd., 1997).

RPB200 ve RPB800 üzerinde farklı sıcaklıkta ve sürelerde kür uygulanmış ardından bu numuneler üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. RPB200 numunelerinin basınç dayanımları ortalama 200 MPa, Elastisite Modülü 66GPa; RPB800 numunelerinin basınç dayanımları ortalama 500 MPa, Elastisite Modülleri 74 GPa olarak ölçülmüştür (Dugat vd.,1996).

RPB'ler üzerinde yapılan bir dizi deney sonucunda; düşük su - çimento oranlarında RPB harçlarına katılan silis dumanının hem basınç dayanımlarını hem de akışkanlığı arttırdığını belirtilmiştir. Ayrıca, dairesel çelik lifler kullanılarak elde edilen RPB'nin eğilme dayanımının, düz RPB'ye göre %50'ye kadar daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur (Maroliya, 2012).

RPB'lere katılan çelik lif oranının artmasıyla, akıcılığın azaldığı gözlemlenmiştir. Lif oranı %10'ı geçtiğinde, numunelerin kalıba yerleştirilmesinde sorunlarla karşılaşmıştır. Bununla birlikte çelik lif miktarı arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Bu artış lif oranı %4'e kadar belirgin bir şekilde gözlemlense de %6'lara gelindiğinde bu artış miktarı azalmaktadır. Yapılan ölçümlerde RPB'nin basınç dayanımı lifsiz 124 MPa iken; %4 lif içeren numunelerde 170 MPa ve %10 lif içeren numunelerde 242 MPa değerine çıktığı görülmüştür (İpek, 2009).

RPB'nin fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalar sonucu; RPB'nin normal beton ve yüksek dayanımlı betonlara göre oldukça fazla olumlu karakteristik özellik gösterdiği belirtilmiştir. RPB'nin sünek kırılma mekanizması sayesinde, malzemeye etkileyen eğilme kuvvetlerinin karşılanması için donatıya gerek duyulmamasını sağlamaktadır. Yüksek basınç dayanımına ilaveten yüksek eğilme kapasitesi de bulunmaktadır. Bununla birlikte RPB üretimi, yüksek dayanımlı betonlara göre 5-10 kat daha masraflıdır (Topçu ve Karakurt, 2005).

RPB'ler normal betonlara kıyasla daha gevrek bir yapıya sahiptir. Bu nedenle daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip oldukları söylenebilir. RPB'lerin sünek bir yapıya kavuşturulması, uygulama alanlarının artırılması açısından önemli bir unsur teşkil etmektedir. Gevrek davranışa sahip RPB'lerin enerji yutma kapasiteleri lif kullanımıyla artırılabilir (Şahinoğlu, 2010).

Aleve maruz bırakılan yüksek dayanımlı betonların kabuk atma ve dökülmeleri incelenmiş; su - çimento oranının önemi vurgulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda su - çimento oranı düştükçe kabuk atma oranı artmaktadır. Bununla birlikte; aynı yapıdaki 1 yıllık betonlarda kabuk atma oranı, 2 aylık betonlara göre daha düşüktür. Beton yaşının kabuk atma ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir (Morita, Nishida, Yamazaki, 1998).

Farklı su - çimento oranlarındaki RPB'ler, 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış; su - çimento oranı 0.20'den düşük olan reaktif pudra betonları yüksek sıcaklıklarda dağılmaya meyilli olduğunu göstermiştir. Genele bakıldığında RPB'ler düz betona nazaran daha yüksek kırılma enerjisine sahiptir. 600 °C'ye maruz bırakılan RPB'lerde de bu enerji hala yüksek seviyelerde olmasına karşın, ortamda yüksek rutubet varsa RPB'lerin dağıldığı, patladığı görülmüştür. Rutubetli ortamda RPB'nin içyapısındaki su molekülleri buharlaşarak kırılma enerjisini düşürmektedir (Peng, Kang vd., 2012).

Normal Beton, yüksek dayanımlı beton ve süper akışkanlaştırıcı katkı reaktif pudra beton numuneleri 500 °C'ye maruz bırakılarak mekanik değişimleri incelenmiştir. Aynı anda aynı sıcaklığa maruz tutulan numunelerde RPB'nin toplam ağırlık kaybının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle RPB'nin yüksek sıcaklık sonrası en basınç dayanımları diğer numunelerde olduğu kadar düşmemiştir. Mükemmel işlenebilirlik ve yüksek basınç dayanımının yanı sıra; reaktif pudra betonunun, normal beton ve Yüksek Dayanımlı Betonlara nazaran daha iyi yangın direnci sağladığı sonucuna varılmıştır (Liu ve Huang, 2009).

Yüksek sıcaklıklarda RPB'lerin ultrases geçiş süresi ve birim ağırlığı; polipropilen lif olsun ya da olmasın düşmektedir. Polipropilen lif olmayan RPB numunelerinin mekanik davranışları 100 °C'ye kadar olumlu etkilenmektedir. RPB dayanımları 400 °C'de 200 MPa'yı aşmış olsa da daha yüksek sıcaklıklarda dayanımda önemli kayıplar gözlemlenmiş; 900 °C'yi aşan numuneler ise parçalanmaya başlanmıştır. Sonuç olarak Polipropilen lifli RPB'nin mekanik davranışları yüksek sıcaklıklarda daha üstündür ancak sıcaklık 400 °C'yi aştıktan sonra basınç dayanımlarının da düşmeye başladığı gözlemlenmiştir (Canbaz, 2014).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Üretilen Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler

Reçetesinde Silis dumanı ve farklı oranda sentetik lif katılarak 10x10x10 cm ve 15x15x15 cm boyutlarında olmak üzere toplam 73 adet numune üretilmiştir.

Çalışmada hazırlanan betonların bileşimleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu numuneler; farklı plastik lif oranlarına göre harflendirilmiştir. D1 - Referans numunesi plastik lif (Polipropilen) içermemektedir.

Çizelge 3.1. 1 m³ çimento esaslı lifli kompozit numunesindeki teorik malzeme miktarı

Karışım Kodu	1 m ³ Betondaki teorik malzeme miktarı (Kg)							
	Çimento	Silis Dumanı	Su	Kimyasal Katkı	Çelik Lif	Sentetik Lif	İnce Kum	İri Kum
D1 - Referans	1000	250	120	125	250	0	420	300
D2	1000	250	120	125	250	2,5	420	300
D3	1000	250	120	125	250	5	420	300
D4	1000	250	120	125	250	7,5	420	300
D5	1000	250	120	125	250	10	420	300

3.1.1. Bağlayıcılar

Beton üretiminde CEM I 42.5R tipi Portland Çimentosu ve silis dumanı kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. CEM I 42.5 R özellikleri.

Özgül Yüzey (Blaine)	3937 cm ² /g
Özgül Ağırlık	3,17
Priz başlangıcı	142 dakika
Priz sonu	210 dakika
Basınç dayanımı (2./28.gün)	28,6 /61,7 MPa
Cl-	% 0.0026
SO ₃	% 2.98
Çözünmeyen kalıntı	% 0.45
Kızdırma kaybı	% 3,29
C ₃ S	% 69.67
C ₂ S	% 0.56
C ₃ A	% 6.74
C ₄ AF	% 10.27

Çizelge 3.3. Kullanılan silis dumanı özellikleri

Özgül Ağırlık	2.25
SiO ₂	% 93.47
Nem içeriği	% 0.25
Kızdırma kaybı	% 3.55

3.1.2. Su

Üretilen karışımlarda İstanbul Ömerli Barajı şebeke suyu kullanılmıştır. Ömerli Barajı su kalite raporu Çizelge 3.4.' de verilmiştir. Özellikle RPB karışımında çok düşük su - çimento oranı kullanılması nedeniyle, kullanılan suyun betonun özelliklerinde kayda değer bir etki yapması beklenmemektedir.

Çizelge 3.4. İstanbul Ömerli Barajı su kalite raporu (Ekim 2016)

Bulanıklık	0.16 NTU
Alüminyum	0.017 mg/l
Arsenik	0.0003 mg/l
Bor	0.58 mg/l
Nikel	0.0037 mg/l
Baryum	0.027 mg/l
Kadmiyum	0.0001 mg/l
Krom	0.0003 mg/l
Bromür	0.01 mg/l
Florür	0.078 mg/l
Siyanür	0.02 mg/l
Kurşun	0.0003 mg/l
Civa	0.0001 mg/l
Nitrat	5.8 mg/l
Selenyum	0.0003 mg/l
Gümüş	0.0001 mg/l
Antimon	0.0002 mg/l
Berilyum	0.0001 mg/l

3.1.3. Agrega

Üretilen karışımlarda iki farklı boyutta silis agrega kullanılmıştır. Agregaların granülometrik bileşimleri ve özgül ağırlıkları Çizelge 3.5.' de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan agreganın özellikleri.

	İnce Kum (0-0.5mm)	İri Kum (0.5-1.5mm)
0.063	4	0
0.125	18	1
0.25	78	5
0.5	100	19
1	100	55
2	100	100
4	100	100
8	100	100
16	100	100
31.5	100	100
Özgül Ağırlık	2.60	2.61

3.1.4. Kimyasal katkı

Numunelerin üretiminde kullanılan İNKA-BS 2000 marka hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri Çizelge 3.6.' da verilmiştir. Betonda çok yüksek oranda su azaltan ve mukavemet arttıran bu akışkanlaştırıcı katkı, yüksek hacimli ve problemlili beton dökümlerinde vibrasyon gereksinimini de azaltmakta, ilk ve son dayanımlarda çok büyük artışlar sağlamaktadır.

Çizelge 3.6. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri.

Katkı türü	Özgül ağırlık	Katı Madde	pH (% 10 çöz)
Hiperakışkanlaştırıcı	1.11	% 31.5	4.6

3.1.5. Çelik ve sentetik lifler

Çalışmada kullanılan çelik ve sentetik liflerin (bkz. Şekil 3.1) özellikleri Çizelge 3.7.'de verilmiştir:

Çizelge 3.7. Kullanılan liflerin özellikleri.

Lif Tipi	Boy, l (mm)	Çap, d (mm)	Narinlik (l/d) (uzunluk/çap)	Yoğunluk (g/ cm ³)	Çekme Dayanım, f_{su} (N/mm ²)
Çelik	6	0.15	40	7.85	2200
Sentetik (Polipropilen)	19	-	-	0.90	400



Şekil 3.1. Numune üretiminde kullanılan sentetik lifler.

3.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Üretilmesi

Bu çalışmada üretilen betonların üretimi sırasındaki izlenen yol aşağıdaki gibi olmuştur:

- Agregaların hava kurusu hale getirilmesi,

- Çimento, silis dumanı ve agregaların kuru olarak karıştırılması,
- Karışım suyunun % 70'inin betona katılması ve karışımın 2 dakika süreyle karıştırılması (bkz. Şekil 3.2.)
- Karışım suyunun kalan miktarı ve katkının ilave edilmesi,
- Çelik ve sentetik liflerin ilave edilmesi,
- Betonun kalıplara alınması ve vibrasyonun yapılması.

Numuneler üretildikten bir gün sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler deney gününe kadar açık havada bekletilmiştir.



Şekil 3.2. Çimento esaslı lifli kompozit harcının karıştırılması

3.3. Mekanik ve Fiziksel Özellik Deneyleri

3.3.1. Birim ağırlık deneyi

Sertleşmiş betonun birim ağırlıklarını bulmak, küp numunelerde oldukça kolaydır, bununla birlikte numunenin hacmini bulurken, numuneyi küp değil, prizma şeklinde düşünmek gerekir. Yangın deneyi sonucunda beton yüzeyinde yaşanan kabuk atmalar, hacimde de düşmeye neden olmaktadır. Yapılan birim ağırlık deneyinde, betonun numunesinin 3 kenarı da ayrı ayrı ölçülmüştür. Yüzeylerdeki küçük çaplı kesik ve oyuklar

ise ihmal edilmiştir. Hacmi bulunan numuneler, hassas tartılarda tartılarak birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

Birim Ağırlıklarına göre betonlar literatürde 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; Hafif Beton: Birim hacim ağırlığı $0.70-2,00 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen betonlara denilmektedir. Genellikle bu betonlar yapı elemanından ses, ısı ve hafiflik özelliklerinin arandığı durumlarda veya atık maddeleri değerlendirmek amacıyla yapılan betonlardır. Normal Beton: Normal doğal taneli agrega ile üretilen ve birim ağırlığı $1,80 - 2,80 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen betonlardır. Bu betonlar önemli bir ayrıcalık özelliği istenmeyen bina inşaatlarında kullanılmaktadır. Ağır Beton: Ağır betonlar birim ağırlıkları $2,80 - 5,00 \text{ kg/dm}^3$ arasında olan betonlara denmektedir. Kullanım yerleri arasında nükleer reaktörler yani atom santralleri, hastanelerin ışın tedavisi yapılan bölümleri gösterilebilir (Gülşah, 2010).

Yapılan birim ağırlık deneyi sonucunda, çimento esaslı lifli kompozit numunelerinin hangi sınıfa girdiği tayin edilmiş, yangın etkisinin hacimdeki düşüş oranları incelenmiştir.

3.3.2. Ultrases geçiş süresi deneyi

Beton kalitesinin denetlenmesi ve değerlendirilmesi için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de ultrasonik test cihazı ile değerlendirme yöntemidir. Ultrasonik test cihazı, alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanır (bkz. Şekil 3.3).

Ultrases dalgalarının betonda yayılma hızları ölçülerek; betonun homojenliği, betonda kusur, çatlak vb. elastisite modülü, Beton dayanımı hakkında veriler elde edilebilmektedir

Yapılan çalışmalarda; betondaki agrega granülometrisinin, s/ç oranının ve kür süresinin ultrasonik ses hızı (UPV) üzerindeki etkilerini incelemiş ve kür süresi arttıkça UPV değerlerinin arttığı, s/ç oranı arttığında UPV değerinin azaldığı, büyük agrega boyutu kullanıldığı zaman UPV değerlerinin yüksek çıktığı sonucuna varılmıştır (Turan ve Tanrıku, 2013).



Şekil 3.3. Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deney düzenekleri

3.3.3. Basınç dayanım deneyi

Betonun basınç dayanımı, betonun mekanik özelliklerinin en yüksek değeri olup tüm olumlu özelliklerde paralellik gösterir ve betonun sınıfını belirler. RPB numuneleri üzerinde Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Laboratuvarında yapılan basınç deneylerinde standart hidrolik pres makinesi kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Basınç dayanım deney düzeneği (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)

Pres makinesinde yükleme çerçevesine, yüksekliği ayarlanabilir bir üst tabla ile oynar ve hareketli alt tabla arasına deney numunesi yerleştirilmiştir. Alt tablanın altındaki pistonun silindirine bir pompa yardımıyla yağ basmasıyla; yağın basıncı alt tablayı yukarı yönde iterek örneğin kırılmasına yol açmaktadır. Bu arada haznedeki basınç kuvveti bir dinamometre ile N/mm^2 cinsinden ölçülmektedir. Küp numunelerinin kırıldığı değerler not edilerek küp basınç dayanımları $\sigma=P/A$ eşitliğiyle MPa cinsine dönüştürülmüştür. Örneğe uygulanan gerilmenin üniform dağılmasının sağlanması için, örnek yüzeylerinin pürüzlü olmamasına dikkat edilmiştir.

TS EN 206-1'e göre normal betonun basınç dayanım sınıfları Çizelge 3.8'de verilmiştir, yapılan deneyler sonucunda RPB numunelerinin hangi beton sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.8. TS EN 206-1'e göre normal betonun basınç dayanım sınıfları

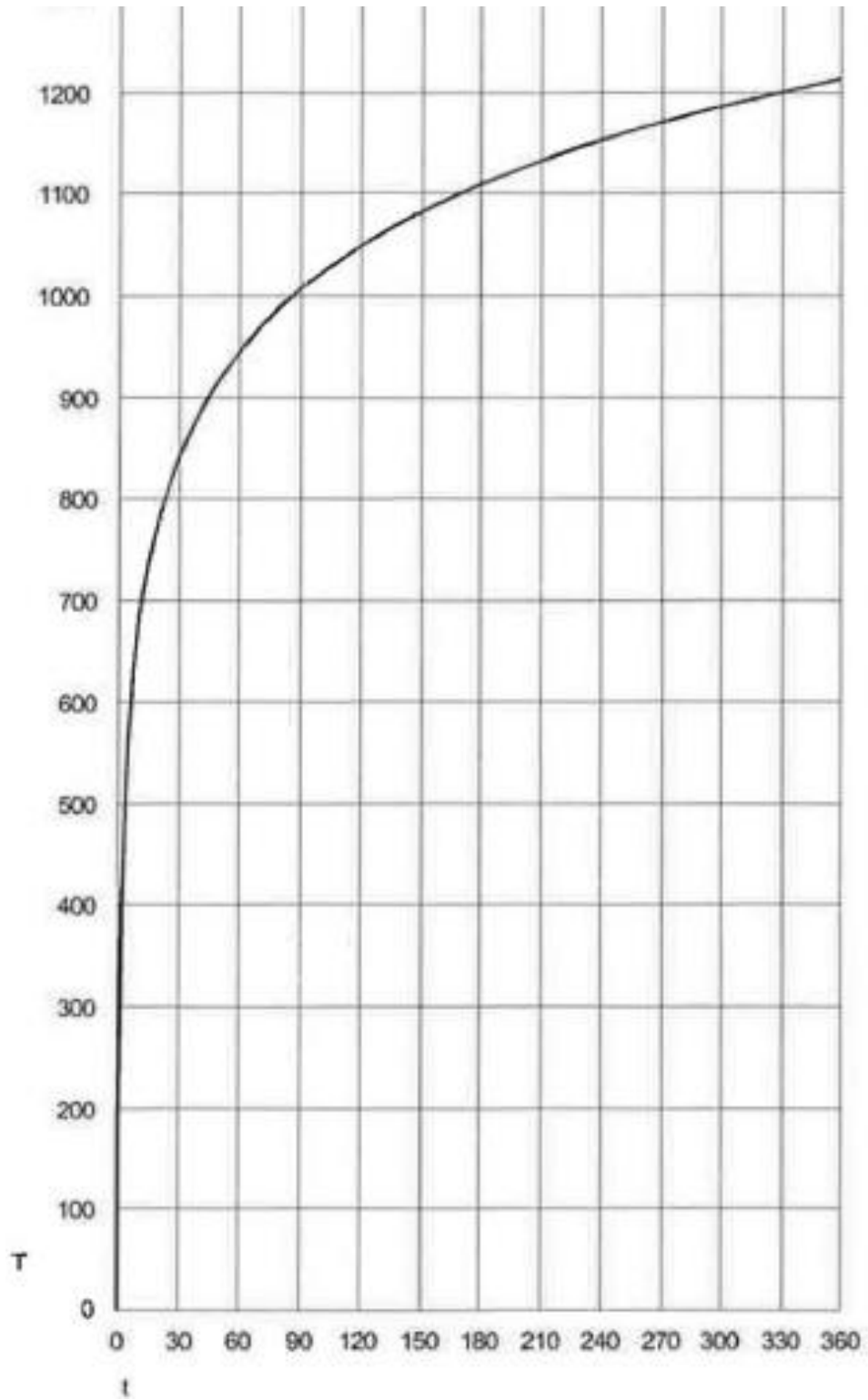
Basınç Dayanım Sınıfı	Silindir Dayanımı f_{ck} , silindir N/mm^2	Küp Dayanımı, f_{ck} , küp Mpa
C 8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/90	80	95
C90/105	90	105

3.3.4. Yangın ve yüksek sıcaklık deneyi

İstanbul İSTON Laboratuvarlarında üretilen RPB numunelerinden farklı plastik lif oranlarında 30 numune seçilmiştir. Bu 30 numune “ERA Efectis Group” Laboratuvarlarındaki özel fırınlara arkalı önlü iki grup halinde yerleştirilmiştir:

1. Grup kapalı ortamda brülörden çıkan alevlere direkt olarak maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin yangın performansları gözlemlenmiştir. Grafik ve tablolarda Y gurubu olarak harflendirilmiştir.
2. Grup numuneler ise; ilk gurubun arkasında; aleve direk maruz kalmayan numunelerdir. Bu grup numuneler için RPB’lerdeki yüksek sıcaklık etkisi incelenmiştir. Grafik ve tablolarda S gurubu olarak harflendirilmiştir.

Şekil 3.5’te verilen sıcaklık eğrisine göre her iki grup da 2 saat boyunca fırında kalmış ve sıcaklık 1049 °C 'ye kadar çıkmıştır. Şekil 3.6 a, b ve c’de yangın deneyi ve yangın etkisine maruz kalmış numuneler görülmektedir.



Şekil 3.5. Yangın ve yüksek sıcaklık deneyi sıcaklık zaman eğrisi.



a.



b.



c.

Şekil 3.6 a. Efectis ERA Yangın ve yüksek sıcaklık deney düzeneği. **b.** Brülörlerden çıkan alevler ile patlamış beton numuneleri **c.** Yangın ve yüksek sıcaklık deneyine maruz kalmış referans numuneleri

Kontrol numuneleri (D), yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler (S) ve yangına maruz bırakılan numuneler (Y) ile yapılan birim ağırlık, ultrases geçiş süresi ve basınç dayanımı sonuçları EK-1'de verilmiştir. Aynı numuneler için her bir deney 3 kere yapılmış olup, incelemelerde kullanılmak üzere ortalamaları kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yangın ve yüksek sıcaklık etkisinde % 0.75 ve % 1 plastik lif içeren bütün numuneler dağıldığı için bu numunelerin sonuçları değerlendirilememiştir. Dolayısıyla ilk gözlem sonuçlarına göre kabaca % 0.75 ve daha yüksek miktarda plastik lif içeren reaktif pudra betonlarının yangına karşı dayanıklı olmadıkları söylenebilir.

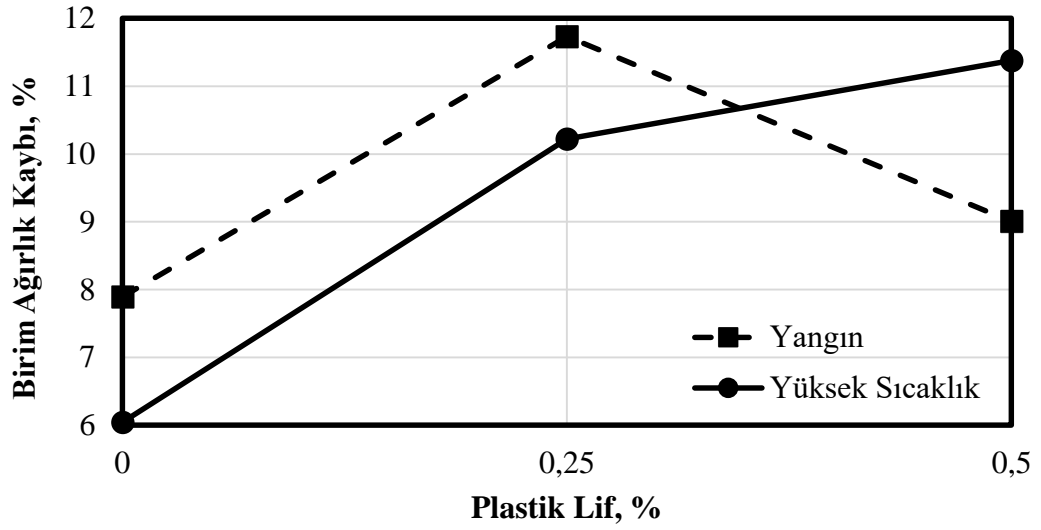
Bu numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda; Şekil 4.1’de yangın ve yüksek sıcaklık etkisinde kalmış numunelerin birim ağırlık kayıpları; Şekil 4.2.’de ultases geçiş hızı artışları ve Şekil 4.3’de basınç dayanım kayıpları gösterilmiştir.

Bununla birlikte karşılaştırma yapılabilmesi için; yangın deneyine girmeyen kontrol karışım numuneleri üzerinde de birim ağırlık, ultases geçiş süresi ve basınç dayanım deneyleri yapılmış olup; deney sonuçları aşağıda görülmektedir:

Çizelge 4.1. Kontrol karışımlarının özellikleri.

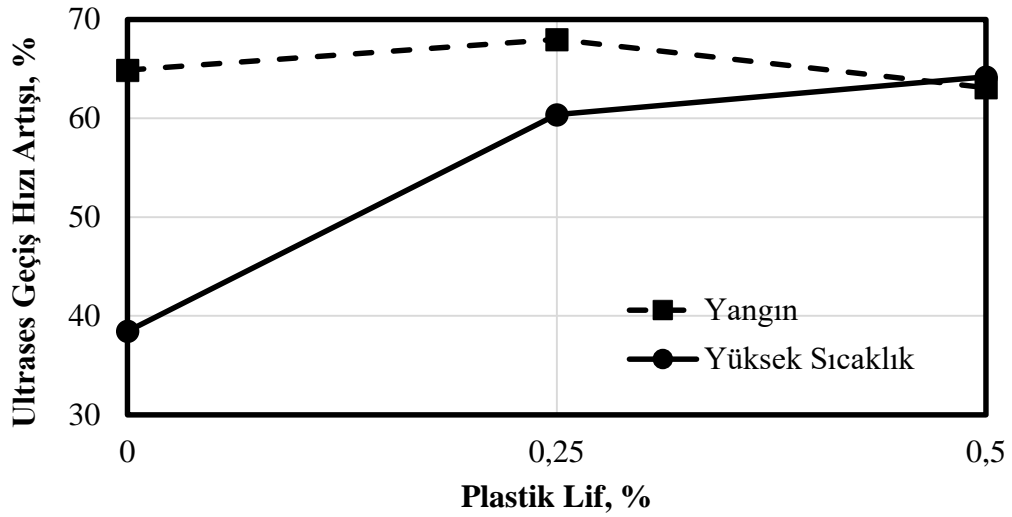
Plastik lif oranı. %	0	0.25	0.50	0.75	1
Birim ağırlık. Kg/dm ³	2.045	2.089	2.079	2.108	2.152
Ultrases geçiş hızı. km/sn	4.114	4.073	4.016	4.016	3.958
Basınç dayanımı. MPa	91.730	86.333	85.518	94.292	104.778

Yapılan birim ağırlık deneylerinde (bkz. Çizelge 4.1). üretilen reaktif pudra betonu Numunelerinin birim ağırlıklarının 2.0 – 2.2 kg/dm³ olduğu ve normal beton sınıfına girdiği ayrıca yüksek ısı ve yangında bu birim ağırlıklarda % 12’ye varan kayıpların yaşandığı görülmektedir (bkz. Şekil 4.1).



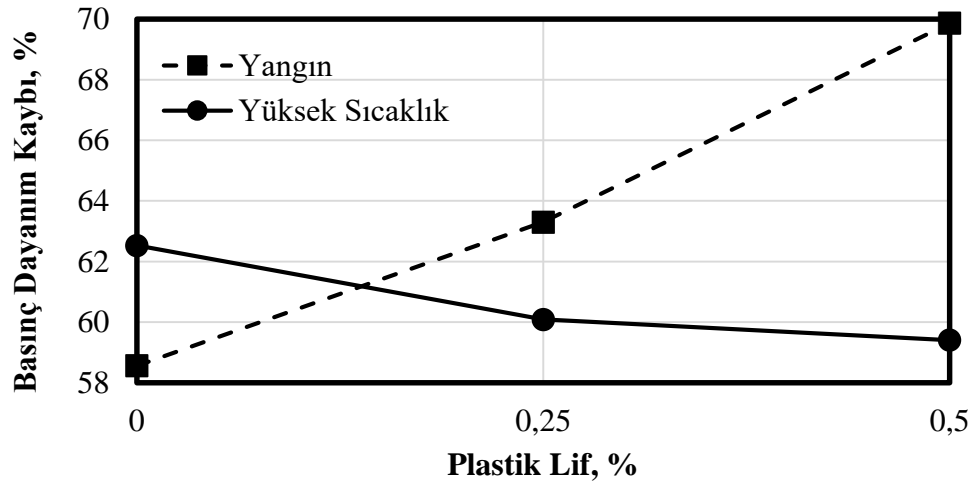
Şekil 4.1. Birim ağırlık deneyi sonuçları

Yapılan ultrases geçiş süresi deneyinde; kontrol reaktif pudra betonu numunelerinde kullanılan plastik lif oranı arttıkça; UPV değerlerinin düştüğü görülmektedir (bkz. Çizelge 5.1). Bununla birlikte; Sıcaklık ve yangın etkisi RPB'lerde UPV değerlerini arttırmaktadır (bkz Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Ultrases geçiş süresi deneyi sonuçları

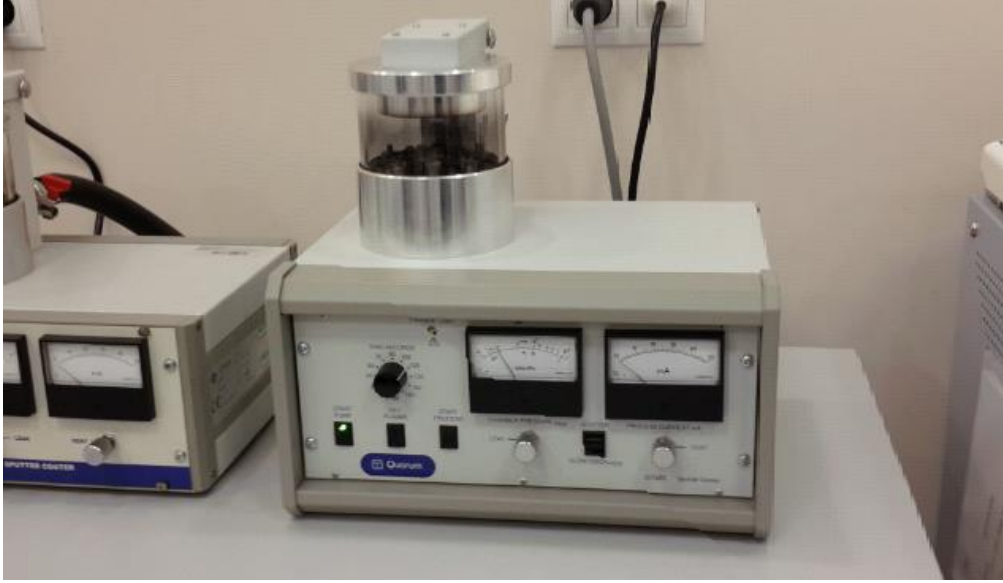
Reaktif pudra betonunda; lif oranı, yüksek sıcaklık ve yangın etkilerinin Basınç Dayanımlarındaki düşüşleri incelenmesi amacıyla Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Laboratuvarlarında yapılan bir dizi basınç dayanım deneyi sonuçları incelenmiştir. Kontrol karışımlarında; kullanılan plastik liflerin basınç dayanımı arttırdığı görülmüştür (bkz Çizelge 5.1). Bununla birlikte; yüksek sıcaklık ve yangın etkisi RPB numunelerinde % 70'lere varan kayıplara neden olmaktadır (bkz. Şekil 4.3). Bu kayıplara nelerin yol açmış olabileceği yapılan SEM taraması ve EDX analizlerinde incelenmiştir.



Şekil 4.3. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

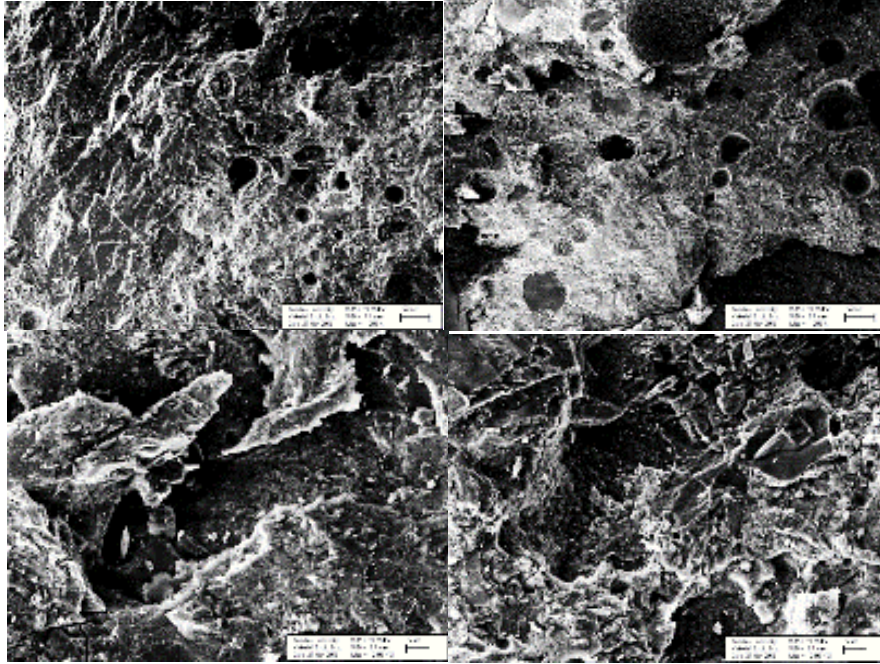
4.2. Mikro yapı Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Yangın ve yüksek sıcaklık etkisinde dağılan % 0.75 ve % 1 plastik lif içeren numunelerin sonuçları değerlendirilemediği için mikro yapı analizi de yapılamamıştır. Mikro yapı analizi olarak alınan numuneler altınla kaplanmıştır. Altınla kaplanan numuneler santrifüjde 45 dakika bekletilmiştir (Şekil 4.4).



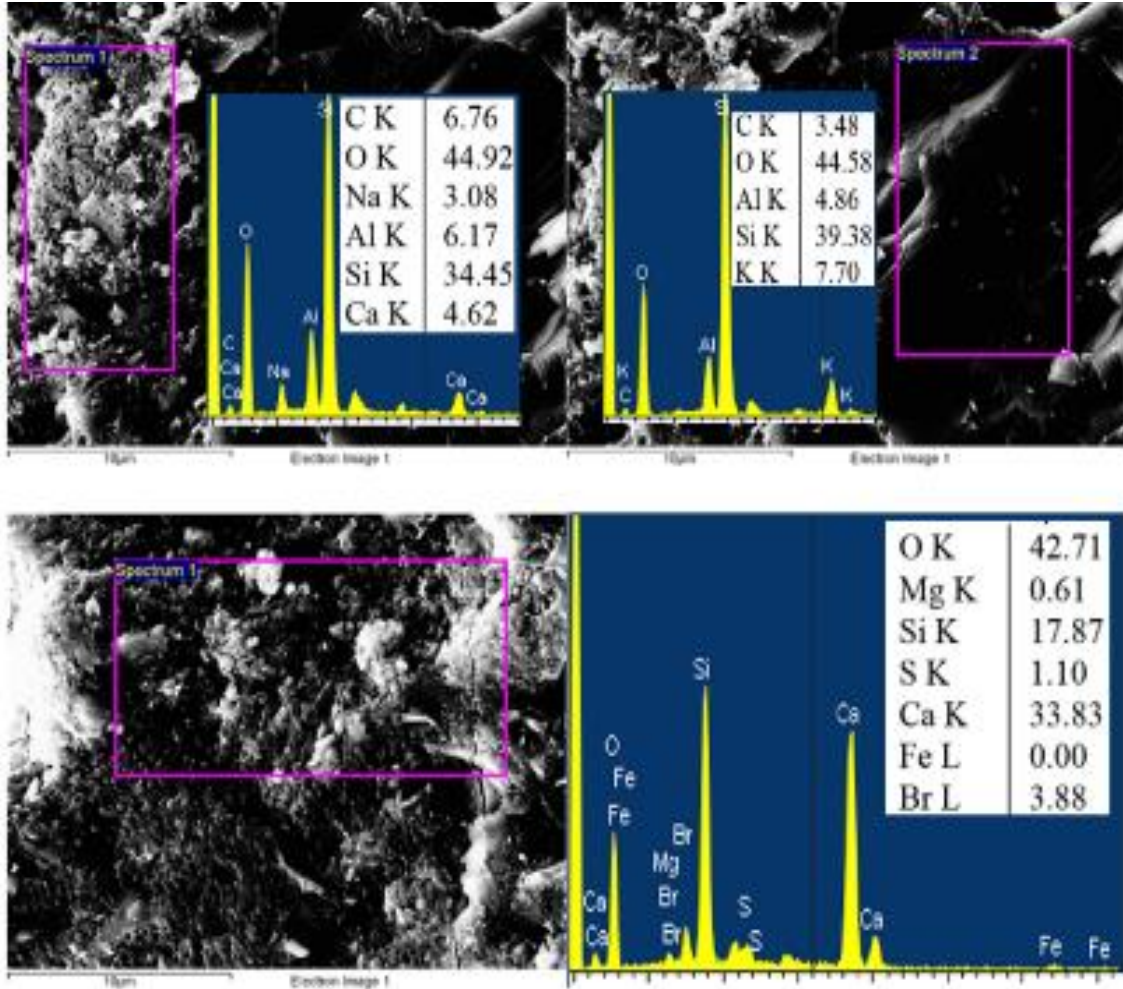
Şekil 4.4. Altın kaplama yapılan deney numunelerinin santrifüjde bekletilmesi

Her numune için 250 ve 2000 büyütmede SEM çekimleri yapılmıştır. Ayrıca her numune için 15000 büyütmede EDX analizi ile kimyasal yapısı belirlenmiştir. Bu deneyler Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği SEM Laboratuvarındaki Zeiss EVO50 EP marka Taramalı Elektron Mikroskopi ile yapılmıştır.

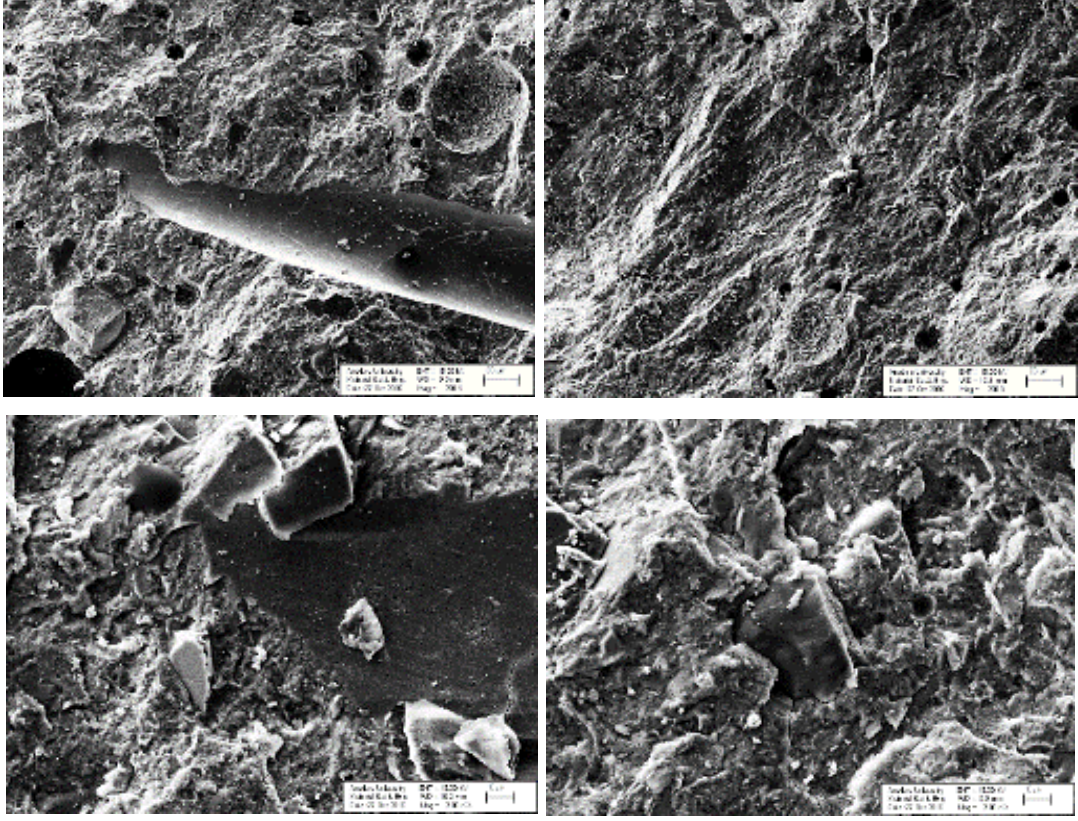


Şekil 4.5. Referans numunesinin mikro yapısı

Şekil 4.5'te referans numunesinin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde üretimde iri taneler kullanılmadığından ve etkili bir yerleştirme sonucu makro boşlukların bulunmadığı, mikro yapı yönünden daha dolu bir yapı elde edildiği görülmektedir. Kullanılan akışkanlaştırıcıların hava sürüklenme etkileri nedeni ile azda olsa hapsolmuş hava boşluk oluşumları görülmüştür. Şekil 4.6'da ise bu numunenin EDX ile belirlenen kimyasal yapısı görülmektedir. Burada çimento, kuvars kumu, silis dumanı gibi bileşenler, silis miktarının yüksek değerler almasına neden olmuştur.

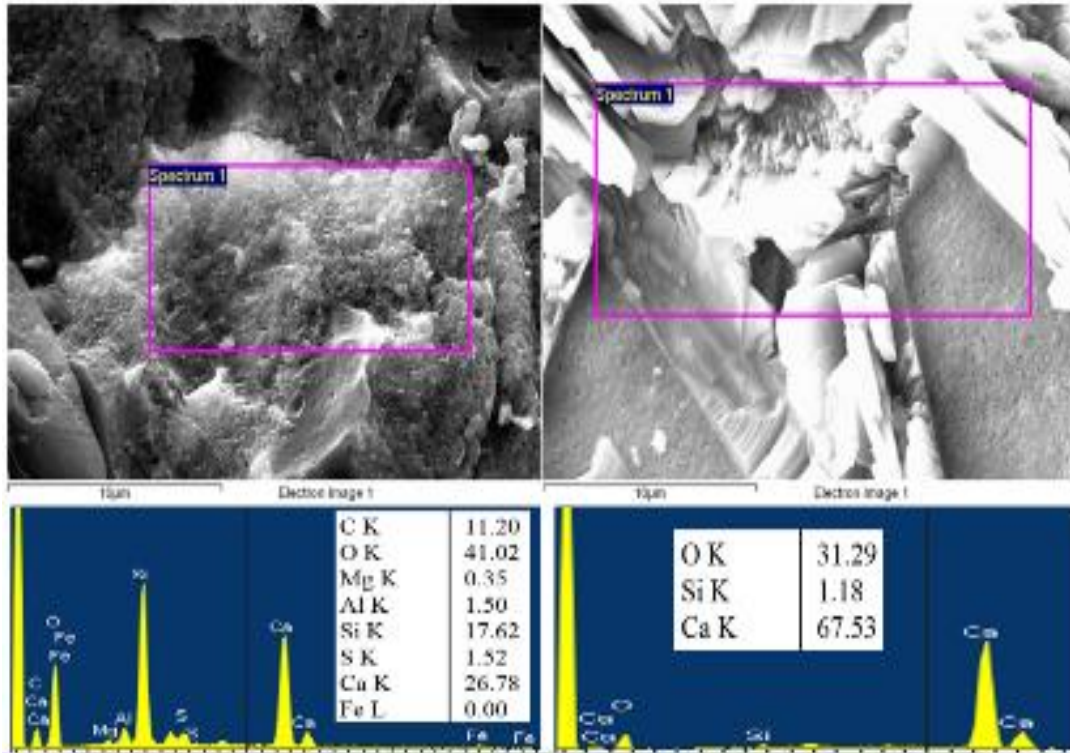


Şekil 4.6. Referans numunesinin EDX analizi

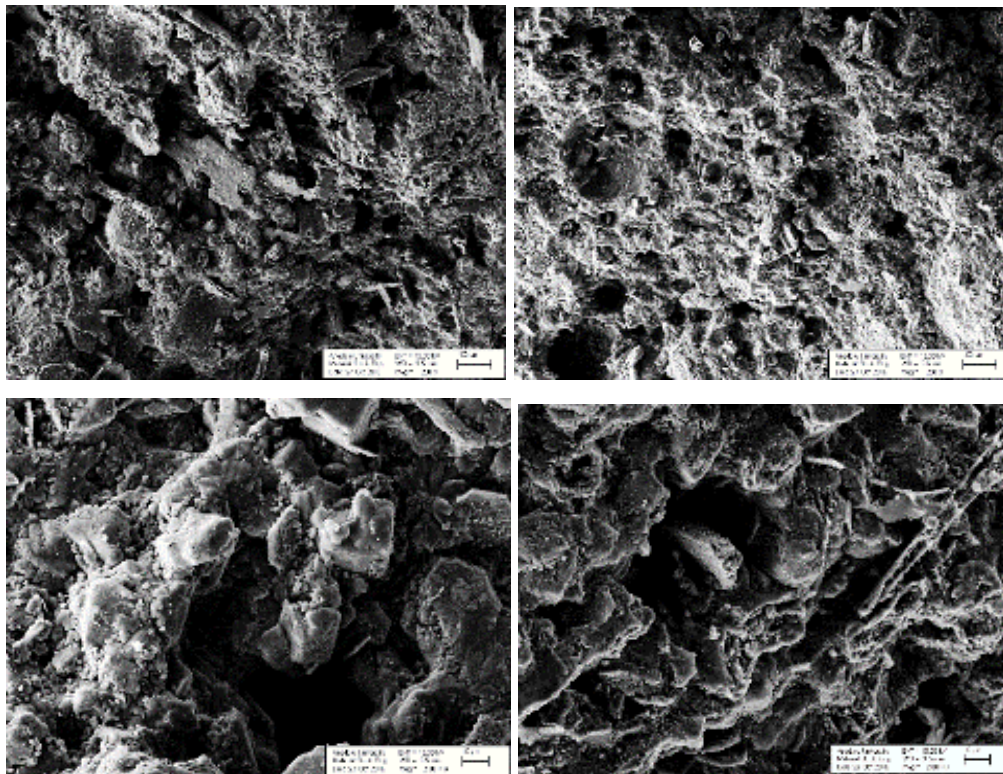


Şekil 4.7. % 0.25 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.7'de % 0.25 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde ara yüzeylerin doluluğu, kullanılan liflerin harç fazı ile aderansı arttırdığı, bağlayıcı hamurun kum tanelerini iyi bir şekilde sardığı ve yapıştığı dolayısı ile adreansın arttığı görülmektedir. Şekil 4.8'de ise bağlayıcıların hidrasyon reaksiyonları sonucunda oluşan Portlandit (CH) ve kalsiyum silikat hidrat jellerinin (CSH) EDX ile belirlenen kimyasal yapısı görülmektedir.

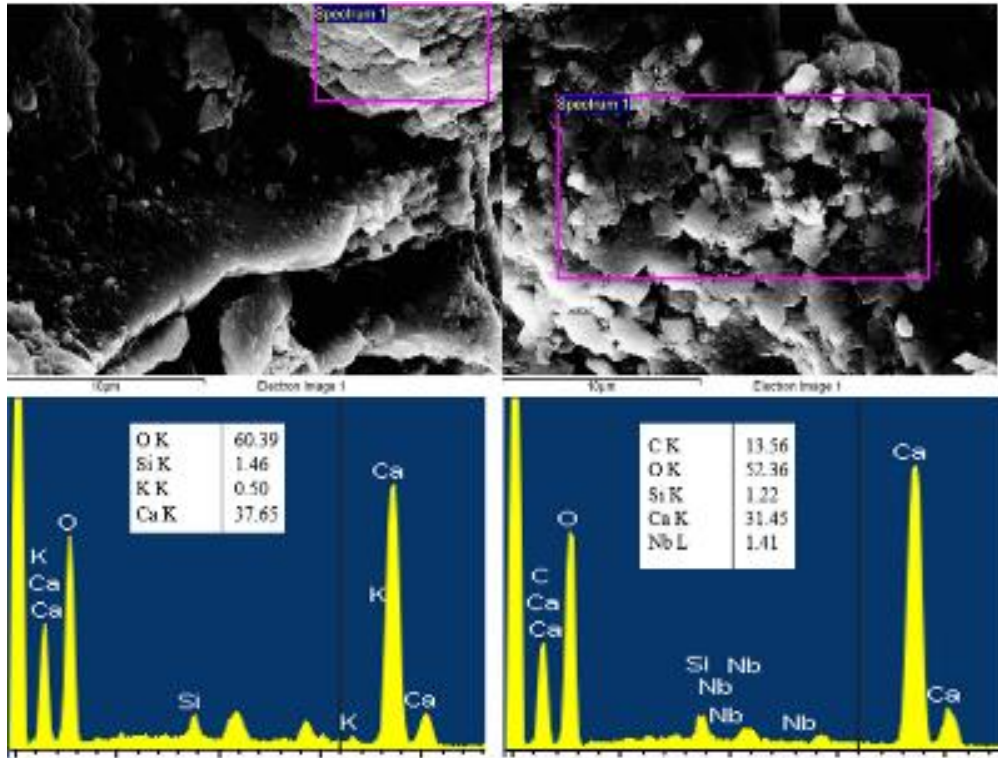


Şekil 4.8. % 0.25 Plastik lif İçeren numunelerin EDX analizi

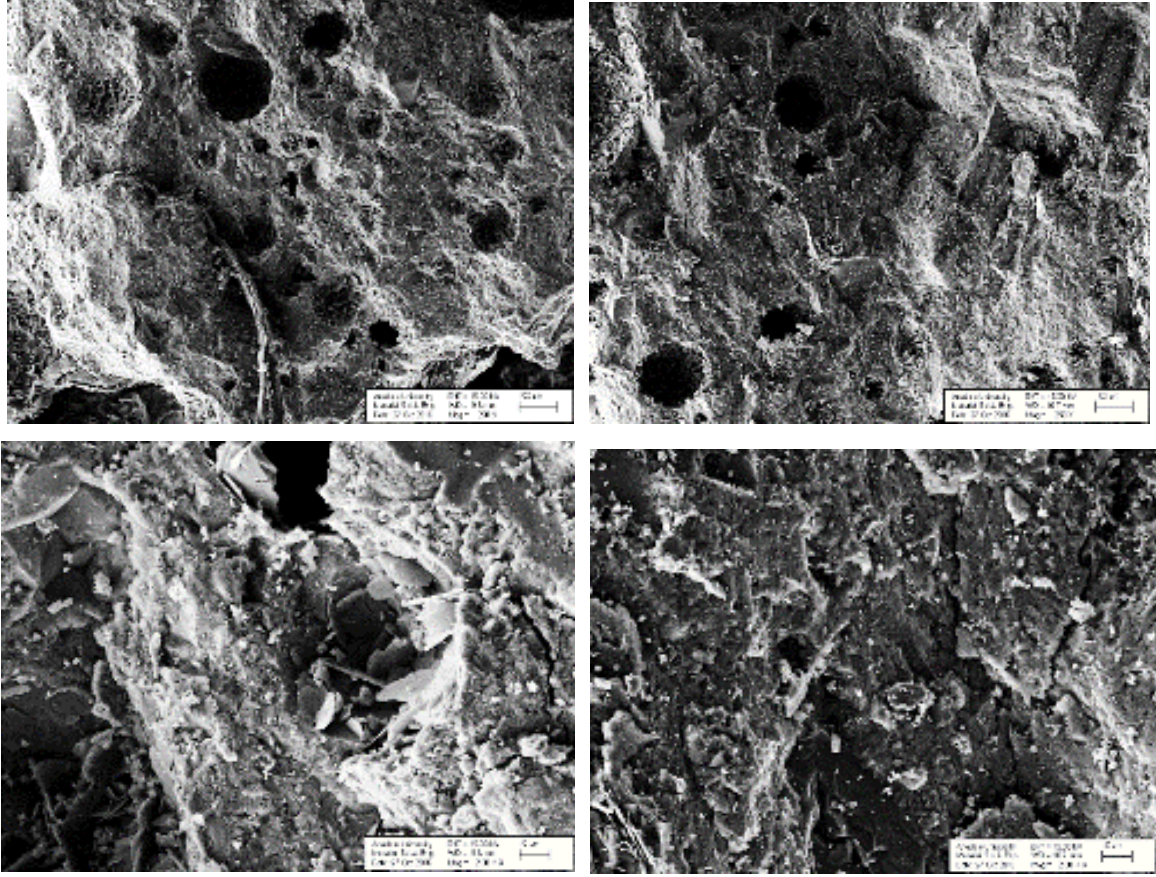


Şekil 4.9. % 0.5 Plastik lif İçeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.9.'da % 0.5 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde artan lif oranı yerleşmeyi güçleştirdiğinden daha boşluklu yapı oluşmasına yol açmıştır. Şekil 5.10.'da ise % 0.5 plastik lif içeren numunenin EDX ile belirlenen kimyasal yapısı görülmektedir. Kullanılan bileşenlerin kimyasal yapısından gelen farklı elementlerde belirlenmiştir. Burada karbon oranının dikkate değer oranda fazlalığı saptanmıştır.

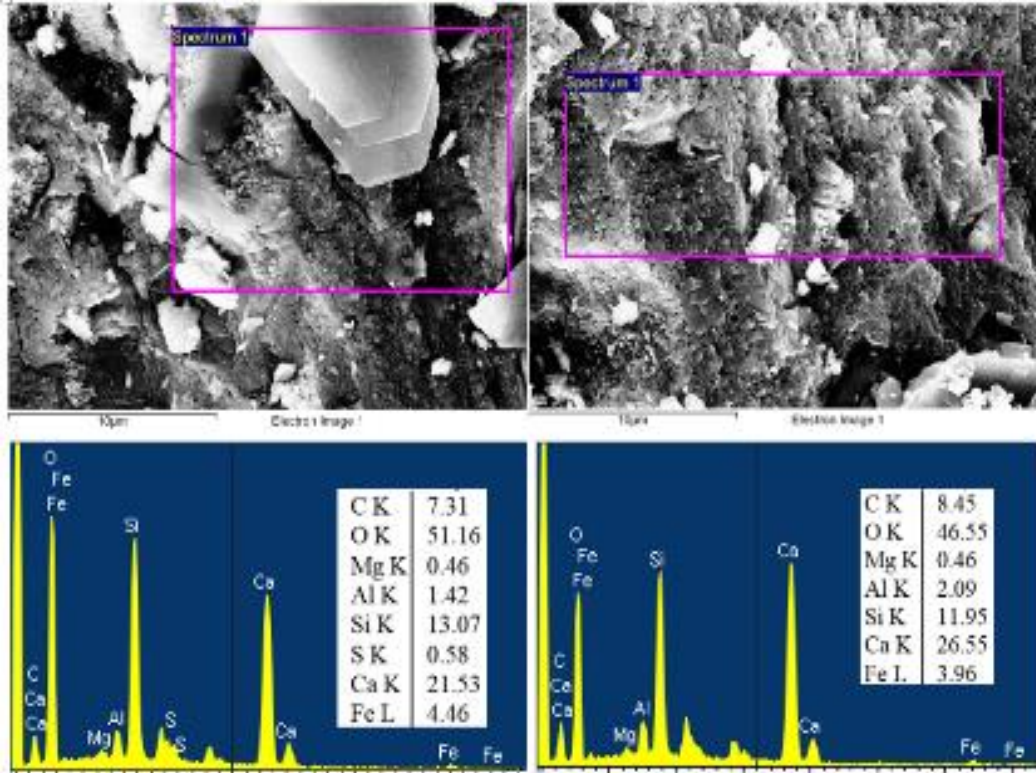


Şekil 4.10. % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi

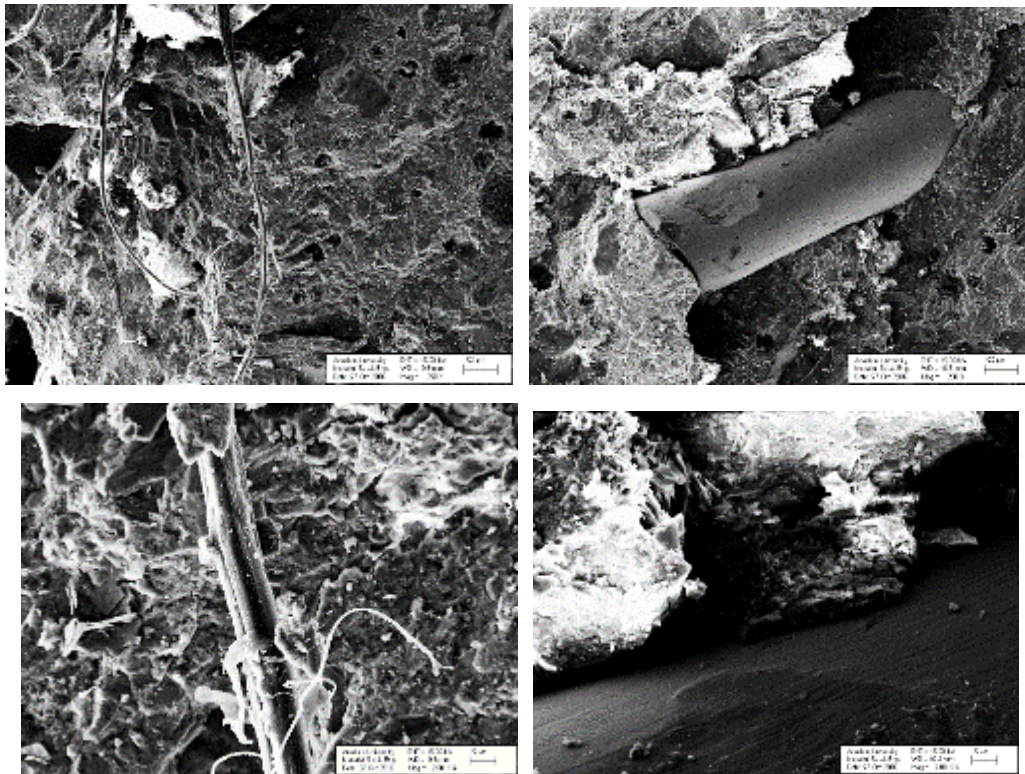


Şekil 4.11. % 0.75 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.11’de % 0.75 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde sürüklenmiş boşlukların yanı sıra kapiller boşluklarda belirlenmiştir. Şekil 4.12’de ise % 0.75 plastik lif içeren numunenin kimyasal yapısı görülmektedir. Oluşan CSH jellerinin yanı sıra çelik liflerin etkisiyle demir ve karbonun belirgin oranlarda mikro yapıda varlığı belirlenmiştir.

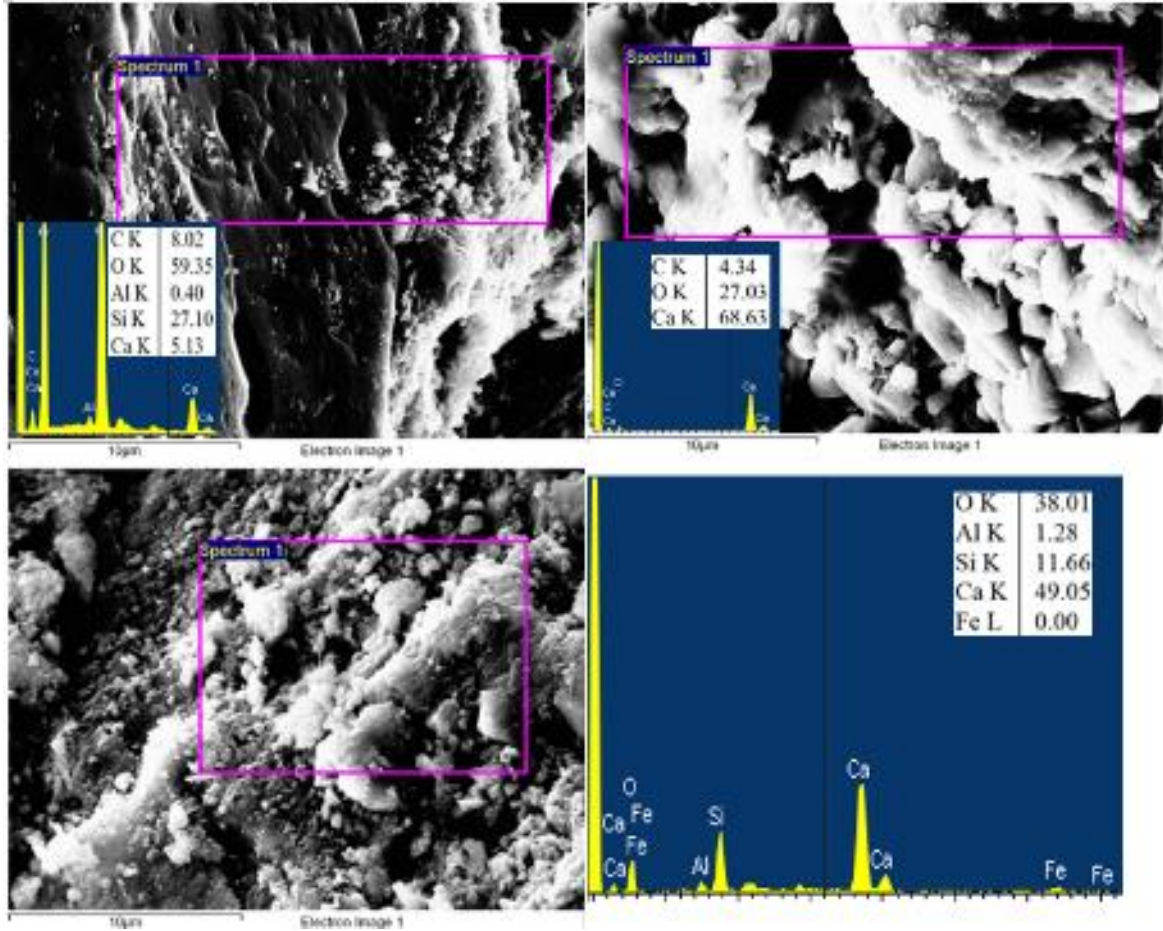


Şekil 4.12. % 0.75 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi

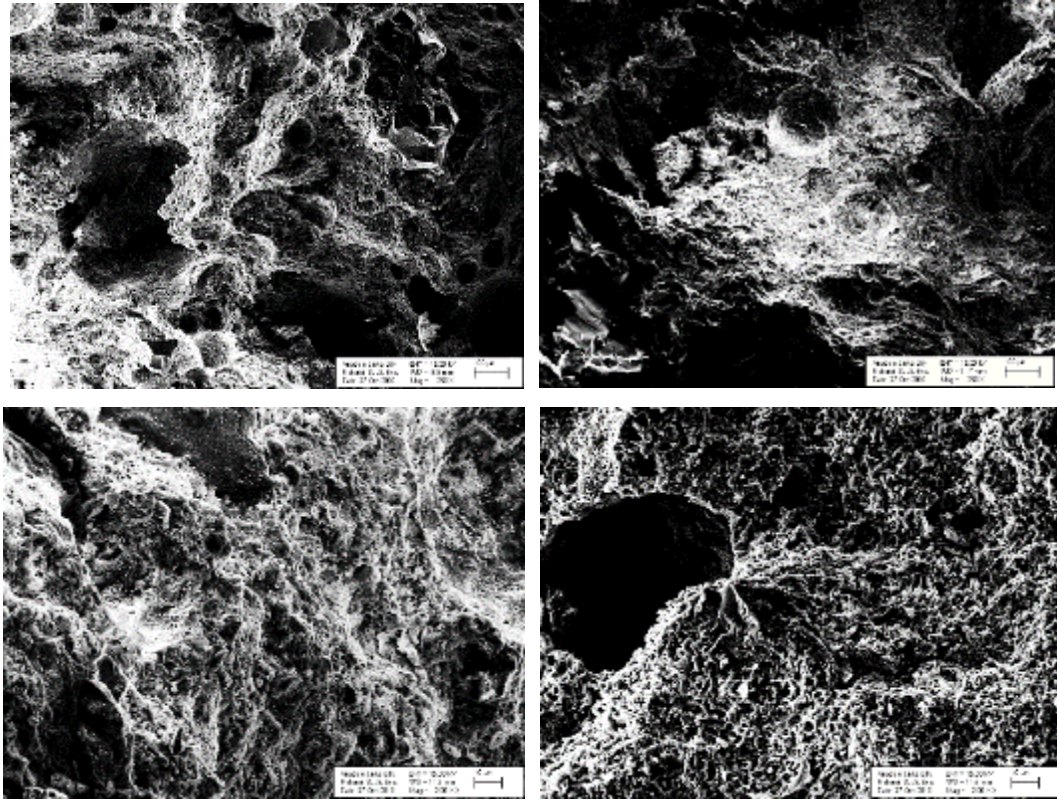


Şekil 4.13. % 1 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.13’de % 1 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde plastik ve çelik liflerin mikro yapıda düzgün bir dağılıma gösterdiği ve bağlayıcı hamur ile ara yüzeyinde oluşan yapılara bağlı olarak iyi bir yapışmanın sağlandığı söylenebilir. Şekil 4.14’de ise % 1 plastik lif içeren numunede CH ve CSH oluşumları ile birlikte kuvars kumunun üzerindeki kalsiyumlu bileşenler görülmektedir.

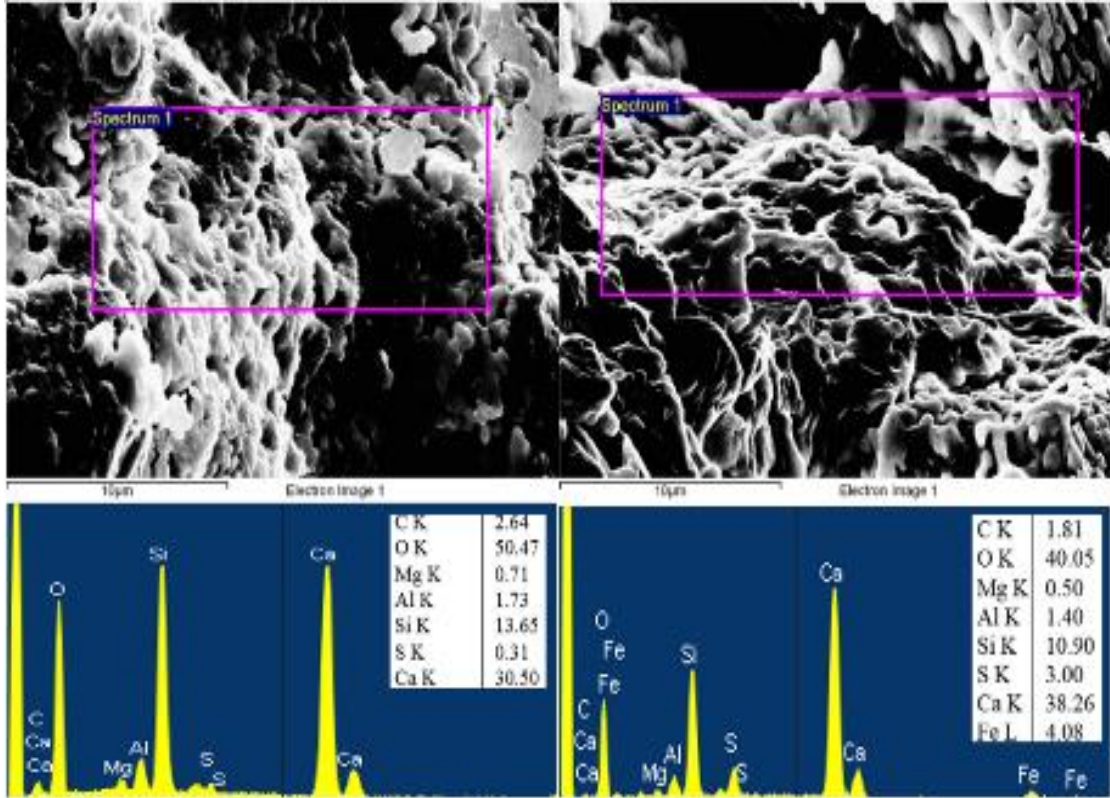


Şekil 4.14. % 1 Plastik lif içeren numunelerin EDX analizi

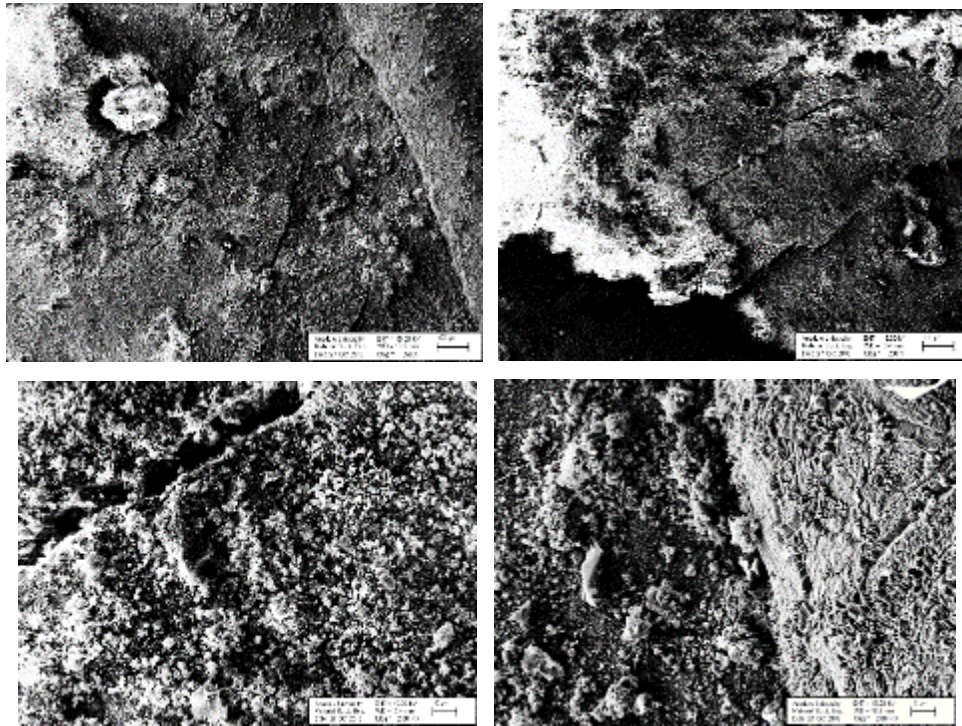


Şekil 4.15. Yangın etkisinde kalmış referans numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.15’de yangın etkisinde kalmış referans numunesinin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde yangın etkisi ile bağlayıcı hamur yapısı bozulmuş, makro ve mikro boşluklar oluşmuştur. Şekil 4.16’de ise yangın etkisinde kalmış referans numunesinin kimyasal yapısı görülmektedir. CSH yapısının bozulduğu, ayrıca oluşan gazların etkisi ile farklı elementlerde belirlenmiştir.

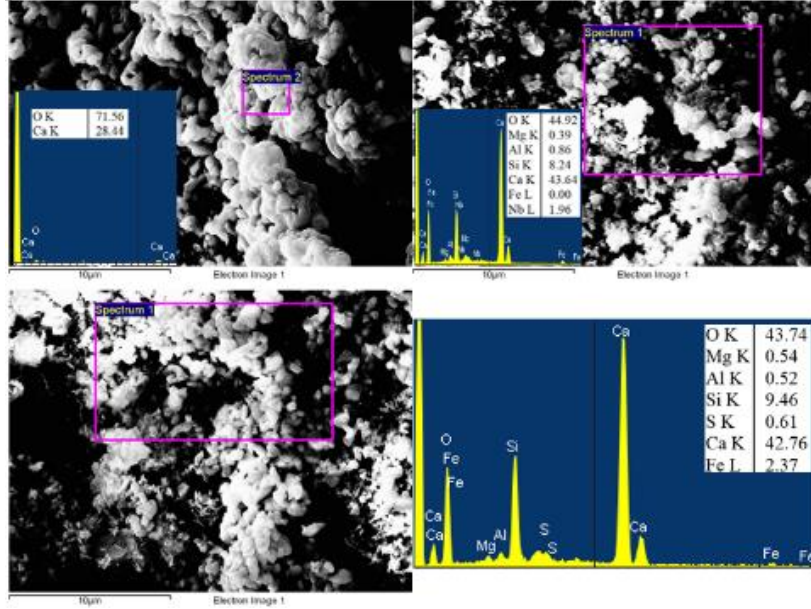


Şekil 4.16. Yangın etkisinde kalmış referans numunelerin EDX analizi

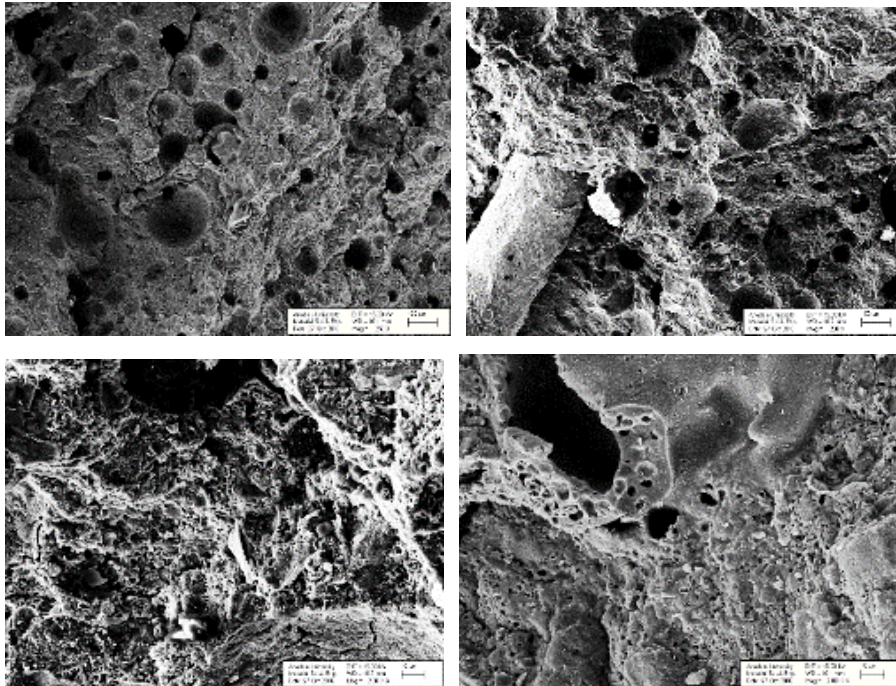


Şekil 4.17. Yangın etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.17’de yangın etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde alevlerin etkisi ile plastik liflerin yandığı ve boşluklar oluşturduğu belirlenmiştir. Şekil 5.18’de ise bu numunelerin kimyasal yapısı görülmektedir. Yangın etkisi ile bozulan CH, kalsiyum oksitleri oluşturmuştur.

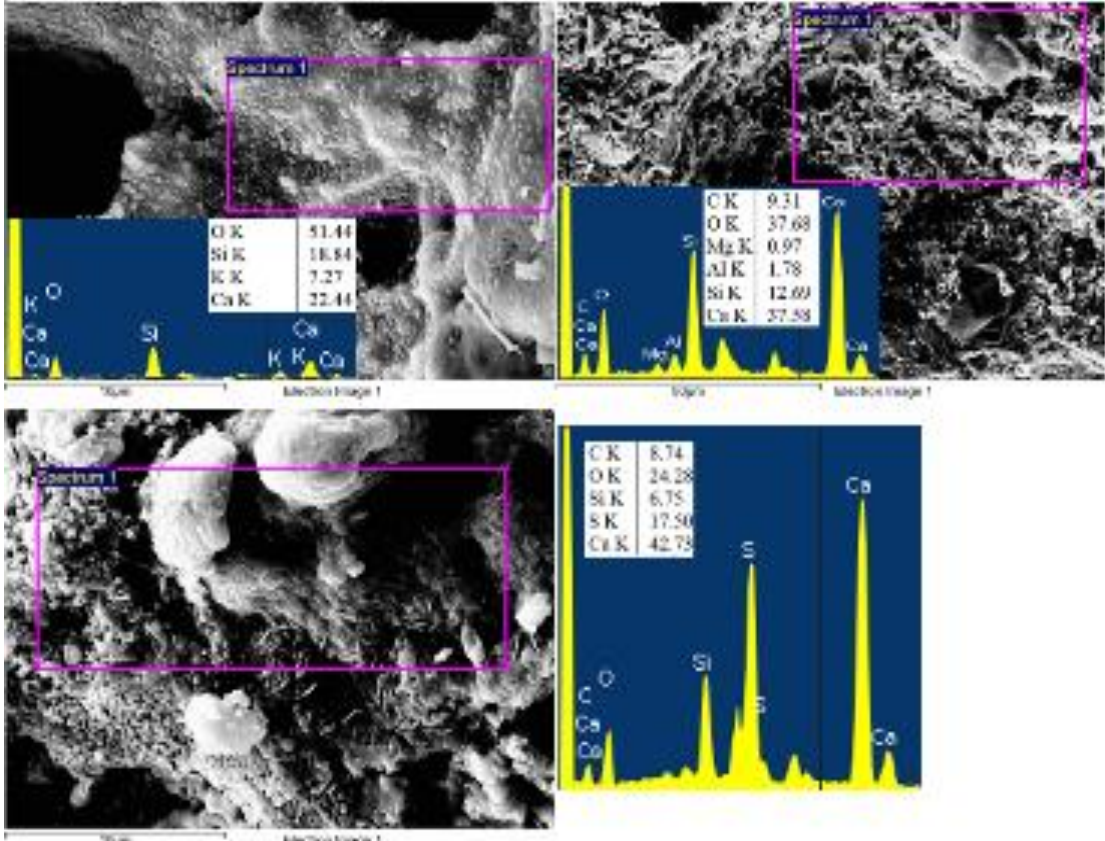


Şekil 4.18. Yangın etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunelerin EDX analizi

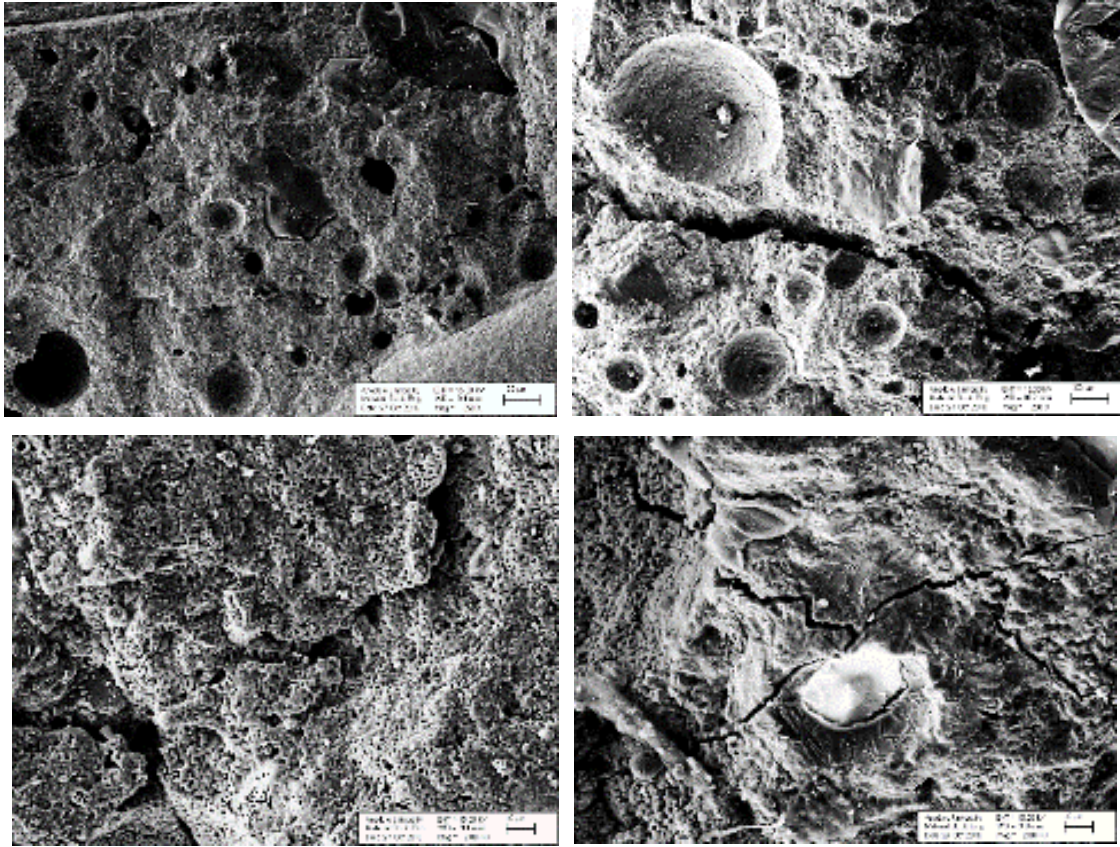


Şekil 4.19. Yangın etkisinde kalmış % 0.5 Plastik lif içeren numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.19’da yangın etkisinde % 0.5 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde yangın etkisi ile oluşan çatlakların hapsolmuş hava boşluklarının çevresinden ilerlediği ve mikro yapının daha çok süngerimsi bir hal aldığı belirlenmiştir. Şekil 4.20’de ise yangın etkisinde % 0.5 plastik lif içeren numunenin kimyasal yapısı görülmektedir. Burada yanma sonucu oluşan gazların bir kısmının numunenin bünyesine alındığı saptanmıştır.

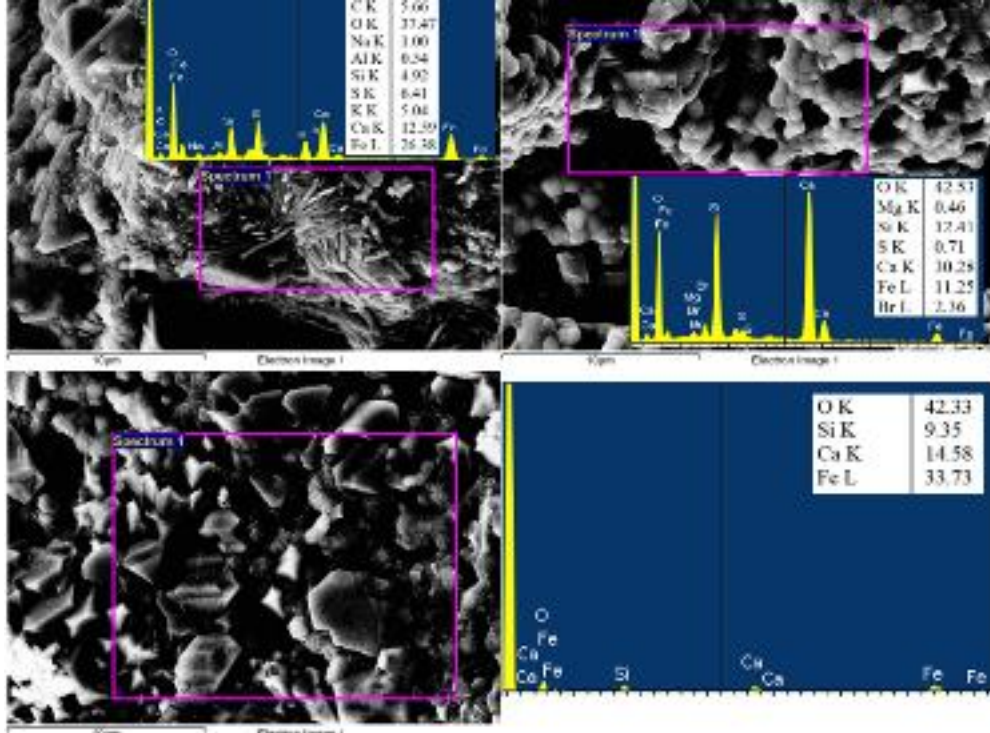


Şekil 4.20. Yangın etkisinde kalmış % 0.5 plastik lif içeren numunelerin EDX analizi

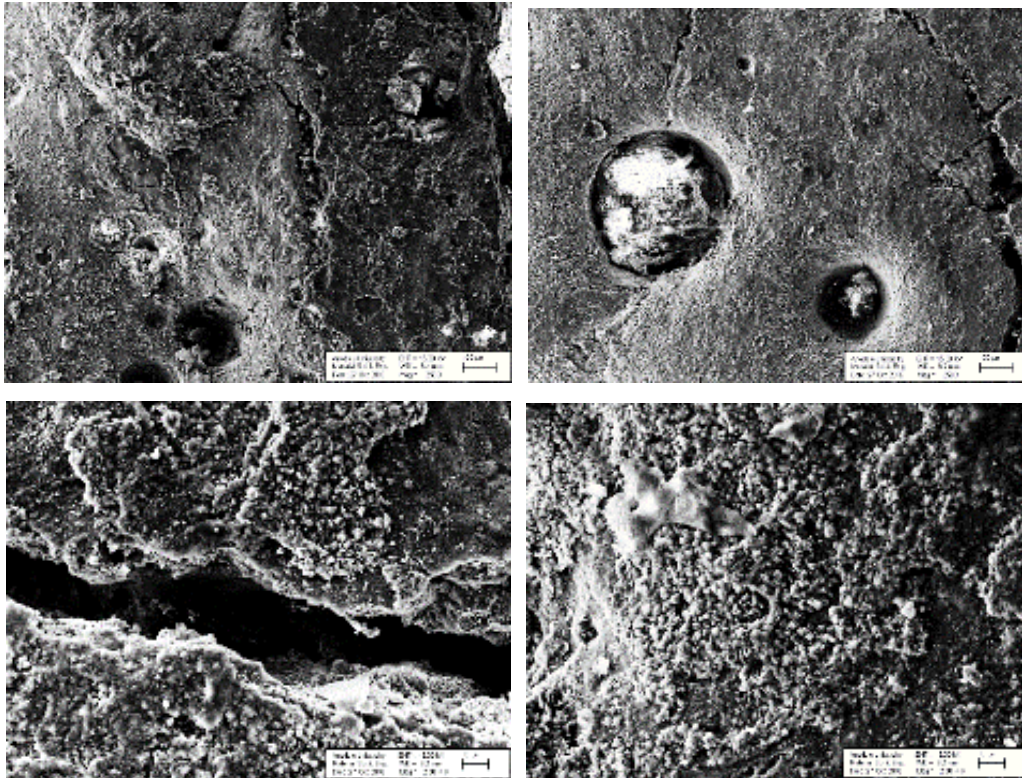


Şekil 4.21. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış referans numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.21’de yüksek sıcaklık etkisindeki referans numunenin mikro yapısı görülmektedir. Oluşan 1000 °C’nin üzerindeki yüksek sıcaklık ile çatlaklar meydana gelmiş, bu çatlakların dallanarak ve büyüyerek yayılması sonucunda dayanım kayıpları yaşanmıştır. Şekil 4.22’de ise referans numunelerin yüksek sıcaklık etkisindeki kimyasal yapısı verilmiştir. Burada bozulan etrenjit oluşumları içeren, silikatlı ve kireçli yapılar belirlenmiştir.

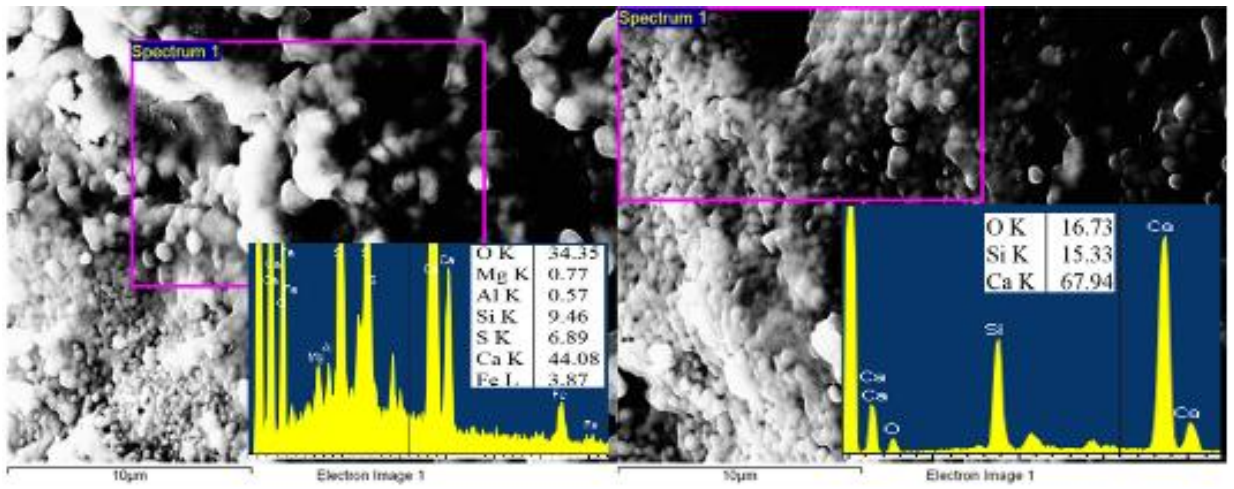


Şekil 4.22. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış referans numunelerin EDX analizi

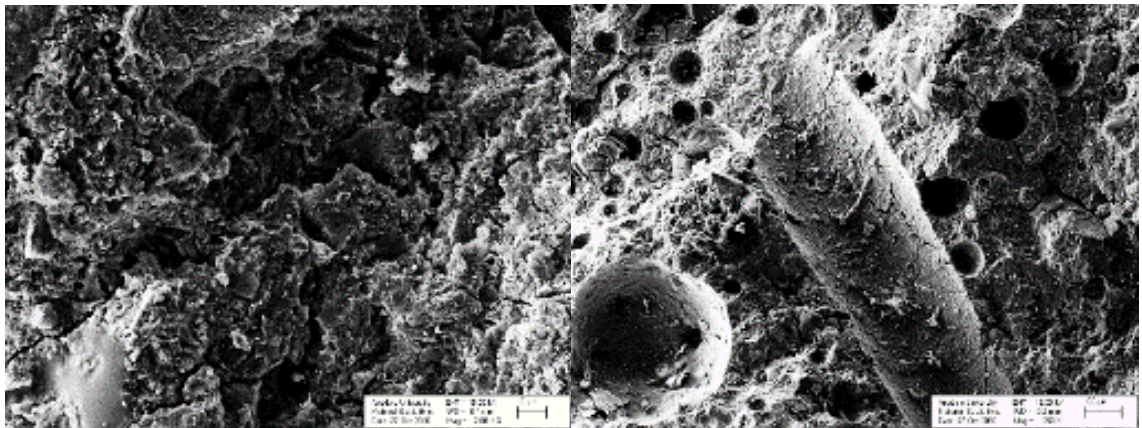


Şekil 4.23. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.25 plastik lifli numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.23’de % 0.25 plastik lif içeren numunenin yüksek sıcaklık etkisindeki mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde yüksek sıcaklık etkisi ile eriyen lifler bağlayıcı ara yüzde de bozulmalara neden olmuştur. Yüksek sıcaklık mikro yapıda doluluğu büyük oranda etkilememiş, liflerin erimesi ile oluşan boşluklar ve hapsolmuş hava boşlukları çatlakların yayılmasına ve büyümesine engel olmuştur. Şekil 4.24’de ise yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.25 plastik lif içeren numunelerin kimyasal yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde hidratasyon ürünlerinin yapılarının bozulduğu yuvarlak taneli bir hal aldığı gözlenmiştir.

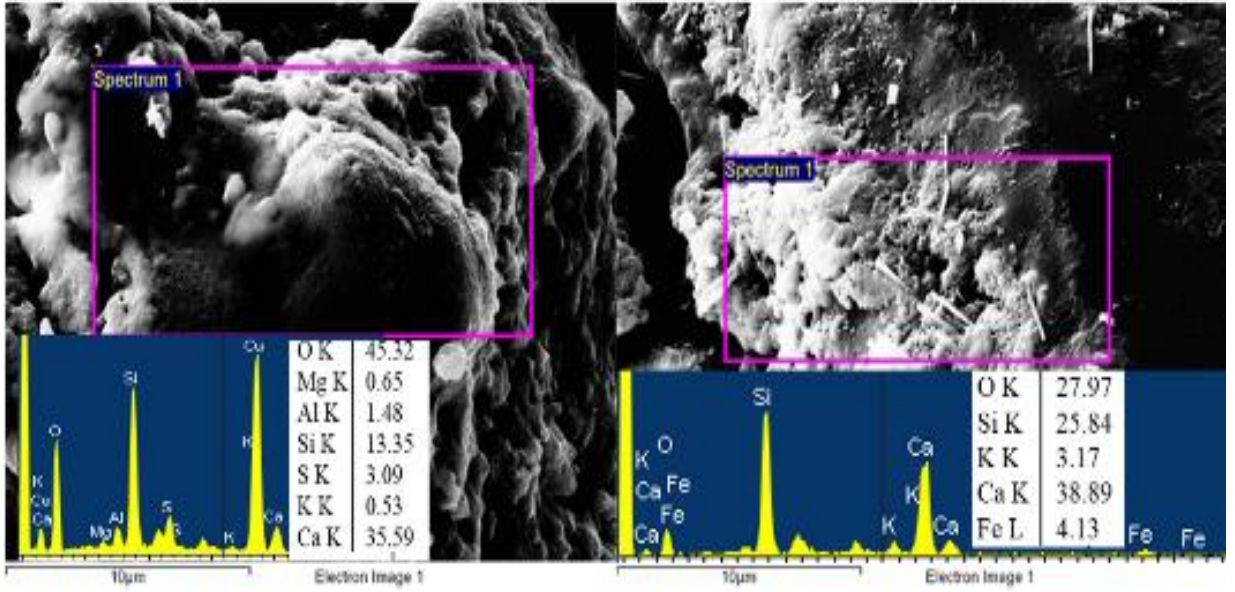


Şekil 4.24. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.25 plastik lifli numunelerin EDX analizi



Şekil 4.25. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.5 plastik lifli numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.25’de yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.5 plastik lif içeren numunenin mikro yapısı görülmektedir. Şekil incelendiğinde plastik lifin bıraktığı iz tespit edilmiştir. Bu yapıda oluşan mikro boşlukların fazlalığı çatlakların büyümesine engel olmasına karşın dayanımda düşüslere yol açmıştır. Şekil 4.26’de ise % 0.5 plastik lif içeren numunenin kimyasal yapısı görülmektedir. Kireçli yapılardaki suyun uçması sonucu meydana gelen büzülme, kuvars kumunda ve çelik liflerdeki polimorfik dönüşüm sonucu hacim artışı da yapının bozulmasına neden olmuştur.



Şekil 4.26. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış % 0.5 plastikli numunelerin EDX analizi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar ve mikro yapı analizleri sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kontrol reaktif pudra betonu numunelerinde kullanılan plastik lif oranı arttıkça birim ağırlıkların da arttığı görülmüştür. Bununla birlikte yüksek sıcaklıkta ve yangın ortamında %12'lere varan birim ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Bu ortamlarda da lif oranı arttıkça birim ağırlık kayıpları yükselmektedir. Bunun nedeni; RPB numuneleri içindeki plastik liflerin yüksek sıcaklıkta ve yangında erimeye başlamasıyla birlikte betondaki hava boşluklarının artması olarak gösterilebilir.
- Aynı şekilde yangın ve yüksek sıcaklıkta plastik liflerdeki deformasyon ile oluşan boşluklar ultrases geçiş süresini arttırmaktadır.
- Basınç dayanımdaki kayıplar ise yangın ve yüksek sıcaklık ortamlarında farklı bir eğilim göstermiştir. Yangına maruz numunelerde plastik lif oranı arttıkça doğrusal bir şekilde basınç dayanım kayıpları da artmaktadır. Plastik lif oranı %0.5 iken bu kayıplar % 70'leri bulmaktadır. Lif oranı daha da arttırıldığında ise betonlar dağılmıştır. Bunun nedeni; agrega ve çimento arasındaki ara yüzeylerin yangın ile oluşan boşluklar nedeniyle açılarak rijitliği büyük ölçüde azaltmasıdır.
- Yüksek sıcaklık ortamında % 60'lardaki basınç dayanım kayıplarının lif oranıyla anlamlı bir şekilde değişmediği gözlemlenmiştir.
- SEM ile çekilen mikrograflar üzerinde yapılan incelemeler sonucunda liflerin ve hapsolmuş hava boşluklarının, yüksek sıcaklık ve yangın etkisiyle oluşan mikro çatlakları büyümeden durdurulmasında etkili olduğu, ancak plastik lif oranı % 0.5'in üzerine çıktığında bu liflerin erimesi ile oluşan boşlukların artması dayanım kaybına yol açarak numunelerin dağılmasına neden olduğu belirlenmiştir.

- EDX analizi ile belirlenen kimyasal yapılar üzerinde yapılan incelemeler sonucunda kuvars kumunun ve çelik liflerin yüksek sıcaklık etkisi ile polimorfik dönüşüme uğradığı, kalsiyum silikat hidrat jellerinin bozulduğu, kalsiyum hidroksitin su kaybederek kalsiyum okside dönüştüğü görülmektedir. Yanma sırasında oluşan karbon içerikli gazların numunelerinin bünyesine girdiği, mikro boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu meydana gelen buhar basıncının çatlaklara neden olduğu belirlenmiştir. Farklı bileşenlerin kimyasal yapısındaki dönüşümler sırasında meydana gelen ani büzülme ve genleşmeler sonucu yapıda mikro çatlaklar meydana gelmiş, bu da dayanım kayıplarına yol açmıştır.
- 1000 °C gibi yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek yapılarda % 0.5 üzerindeki oranlarda plastik lif kullanılmaması önerilir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisine göre yangın etkisinde plastik lif kullanılması durumunda dayanım kaybının oldukça artması nedeni ile plastik lifin kullanılmaması önerilir. Yangın söndürme ve soğutmada kullanılan yöntemlerin etkisinin araştırılması sonraki çalışmalar için önerilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Açıkgenç, M., Arazsu, U., Alyamaç, K., 2012, Farklı karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri, *SDU International Technologic Science*, 4, 3, 41-54
- Armentrout, D, L, 2009, An investigation of nano silica in the cement hydration process, Figure 13. SEM of CH and CSH, Mix 508
- Altıntaş Şahinoğlu, S., 2010, Reaktif pudra betonlar, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 64 s.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, P.C., 1997, Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes, *ACI Materials Journal*, 94, 286-290
- Canbaz, M., 2014, The effect of high temperature on reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 70, 508–513
- Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L., 1995, Microstructural analysis of RPC, *Cement and Concrete Research*, 25, 1491-1500
- Demirkollu, 2015, Beton Çeşitleri ve Temel Özellikleri <https://www.sanalsantiye.com/beton-cesitleri-ve-temel-ozellikleri/>, erişim tarihi: 11.03.2017
- Dugat, J., Roux, N., Bernier, G., 1996, Mechanical properties of reactive powder concretes, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 29, 233-240
- Erdoğan, S., Gök, D., Aşçı, F., 2011, Marmaray projesi tünellerinde pasif yangın koruma çalışmaları, 8. Ulusal Beton Kongresi
- Gülşah, A., 2010, Beton çeşitleri ve özellikleri, <http://www.muhendisevi.com/forum/MsgDetay.asp?Konu=277>, erişim tarihi: 18.03.2017
- Harmanthy, T.Z., 1986, Evaluation and repair of fire damage to concrete, P.O. Box 1950 American Concrete Institute, Detroit
- İpek, M., 2009, Reaktif pudra betonlarının mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkılaştırma basıncının etkileri, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 232 s.
- İpek, M., 2011, Bazalt agregası kullanılarak üretilmiş reaktif pudra betonuna farklı boyutlardaki çelik lifin ve sıkılaştırma basıncının etkisi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6, 4, 1306-3111

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karabulut, A. Ş., 2006, Reaktif pudra betonunun (RPB). özelliklerinin mineral katkılarla geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 161 p.
- Karahan, O., 2006, Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 256 s.
- Liu, C., Huang, J., 2009, Fire performance of highly flowable reactive powder concrete, *Construction and Building Materials* 23, 2072-2079
- Maroliya, M. K, 2012, An investigation on reactive powder concrete containing steel fibers and fly-ash, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2, 9, 2250-2459
- Morita, T., Nishida, A., Yamazaki, N., Schneider, U., Diederichs, U., 1998, An experimental study on spalling of high strength concrete elements under fire attack, *Fire Safety Science – Proceedings of the sixth international symposium*, pp. 885-886
- Özalp, F., 2006, Ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışı, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 p.
- Peng, G., Kang, Y., Huang, Y., Liu, X., Chen, Q., 2012, Experimental research on fire resistance of reactive powder concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 10, 1155
- Phan, L., 2007, Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature, *Concrete under Severe Conditions : Environment & Loading F. Toutlemonde et al (eds)*, 1595-1608
- Richard, P., Cherezy, M., 1995, Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511
- Topçu, İ. B., Karakurt, C., 2005, Reaktif Pudra Betonları, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437, 2005/3
- Turan, M., Tanrikulu, M. A., 2013, Hasarsız deney yöntemleri ile beton kalitesinin belirlenmesi, *Dumpupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 32, 1302-3055
- Uçar, S., 2015, TSEN 206-1 ve TS 13515 2014 Yeni beton standartları, Türkiye Hazır beton Birliği KGS İktisadi İşletmesi Direktörü, İMO Antalya Şubesi

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Uysal, A., 2004, Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 65 s.

Yaprak, H., Karacı, A., 2009, Polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarının yapay sinir ağları ile tahmini, Int.J.Eng.Resaarch & Development, 1, 2, 23-26

EK AÇIKLAMALAR-A

Reaktif pudra betonu numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları:

	NO	Polipropilen Oranı (%)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
15 x 15 x 15 lik küp numuneler	Y1ort	0.00	1.876	41.13	6.429
	Y2ort	0.25	1.844	31.68	6.842
	Y3ort	0.50	1.892	25.77	6.549
	Y4ort	0.75	Yangın deneyi sonrası %0.75 ve %1.00 oranında polipropilen içeren Y4 ve Y5 numuneleri dağılmıştır.		
	Y5ort	1.00			
	S1ort	0.00	1.947	53.119	5.718
	S2ort	0.25	1.875	34.455	6.532
	S3ort	0.50	1.877	29.692	6.770
	S4ort	0.75	Yangın deneyi sonrası %0.75 ve %1.00 oranında polipropilen içeren S4 ve S5 numuneleri dağılmıştır.		
	S5ort	1.00			
	D1ort	0.00	2.045	91.730	4.114
	D2ort	0.25	2.089	86.333	4.073
	D3ort	0.50	2.079	85.518	4.016
	D4ort	0.75	2.108	94.292	4.016
	D5ort	1.00	2.152	104.778	3.958
10 x 10 x 10 luk küp numuneler	D1ort	0.00	2.151	74.651	3.990
	D2ort	0.25	2.250	85.447	4.054
	D3ort	0.50	2.225	88.078	3.913
	D4ort	0.75	2.250	79.846	3.868
	D5ort	1.00	2.320	104.016	3.839