



T. C.

ORDU ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALTERNATİF PUZOLAN KALSİNE MARN KATKILI
ÇİMENTOLAR İÇEREN MİKRO BETONLARIN YANGIN
DAYANIMI**

MAHMUT ESAT AYYILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

ORDU 2022

TEZ BİLDİRİMİ

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kullanılan intihal tespit programının sonuçlarına göre; bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdığı yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Mahmut Esat AYYILDIZ

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

ALTERNATİF PUZOLAN KALSİNE MARN KATKILI ÇİMENTOLAR İÇEREN MİKRO BETONLARIN YANGIN DAYANIMI

MAHMUT ESAT AYYILDIZ

ORDU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ, 46 SAYFA

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ YASEMİN AKGÜN)

Portland çimentosunun artan küresel üretimi ve CO₂ emisyonlarını azaltma gerekliliği katkılı çimentoların üretimini artırma ihtiyacını oluşturmaktadır. Son zamanlarda, kalsine killeri, bu ihtiyaca yönelik olarak oldukça umut vericidir. Bu çalışmada, kalsine marn katkılı mikro betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları incelenmiştir. %0, %10, %20 ve %30 yer değiştirme yüzdelerinde kalsine marn içeren katkılı çimentolarla üretilen mikro betonlar için 4 farklı karışım kullanılmıştır. Çalışmada, mikro betonların doygun kuru yüzeyli ve kuru birim ağırlıkları ile su emme oranları, utras geçiş hızları, ağırlık kayıpları, eğilme-basınç dayanımları belirlenmiştir. Mikro betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışların belirlenmesi amacıyla, 300°C, 600°C ve 800 °C sıcaklıklar kullanılmıştır. Alternatif puzolan kalsine marn katkılı çimentolar içeren mikro betonların eğilme-basınç dayanımları %20 yer değiştirme miktarına kadar artmıştır. Kalsine marn katkısı yüksek sıcaklık etkisi altında mikro betonların yangın dayanımına olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalsine Marn, Katkılı Çimento, Mikro Beton, Puzolan, Yangın Dayanımı

ABSTRACT

FIRE RESISTANCE OF MICRO-CONCRETES CONTAINING ALTERNATIVE POZZOLAN CALCINED MARL BLENDED CEMENTS

MAHMUT ESAT AYYILDIZ

**ORDU UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES**

RENEWABLE ENERGY

MSC. THESIS, 46 PAGES

SUPERVISOR: ASST. PROF. YASEMİN AKGÜN

Increasing global production of Portland cement and the need to reduce CO₂ emissions create the need to increase the production of blended cement. Recently, calcined clays are very promising for this need. In this study, the behavior of micro concrete under high temperature produced with blended cement containing calcined marl was investigated. It was used 4 different mixtures for micro concretes produced with blended cements containing calcined marl at 0%, 10%, 20% and 30% replacement ratios. In the study, saturated and dry density, water absorption ratios, ultra pulse velocities, weight losses, flexural-compressive strengths of micro concretes were determined. Temperatures of 300°C, 600°C and 800°C were used to determine the behavior of micro-concrete under high temperature. The flexural-compressive strengths of micro-concrete containing alternative pozzolan calcined marl blended cements are improved up to 20% replacement. It has been determined that calcined marl additive has positive effects on the fire resistance of micro concretes under the effect of high temperature.

Keywords: Calsined Marl, Blended Cement, Micro Concrete, Pozzolan, Fire Resistance

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince desteęini esirgemeden yardımcı olan, sabır ve űzveriyle beni yűnlendiren, deneyimlerini aktaran deęerli hocam Dr. Őęr. Ŭyesi Yasemin AKGÜN'e teőekkűr ederim.

Tez yazım aőamasında manevi desteklerini esirgemeyen Őęr. Gűr. Arif Emre ŐZDEMİR' e, tűm hayatım boyunca hiębir zaman desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen ve her an yanımda olan eőim ve aileme sonsuz teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Puzolanlar	3
2.2 Puzolanik Aktivite	3
2.3 Puzolanların Gruplandırılması	3
2.3.1 Yapay Puzolanlar.....	3
2.3.1.1 Yüksek Fırın Cürufu	3
2.3.1.2 Uçucu Kül	4
2.3.1.3 Silis Dumanı.....	4
2.3.1.4 Pirinç Kabuğu Külü	4
2.3.2 Doğal Puzolanlar.....	4
2.3.2.1 Volkanik Orijinli Puzolanlar.....	4
2.3.2.2 Diyatomit	4
2.3.2.3 Tras	5
2.3.2.4 Pişirilmiş Kil ve Şeyl	5
2.4 Puzolanların Betonun Yangın Dayanımına Etkisi	5
2.5 Doğal Marn	5
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
4. MATERYAL ve YÖNTEM	12
4.1 Materyal	12
4.1.1 Portland Çimentosu	12
4.1.2 Marn.....	12
4.1.3 Agregası.....	13
4.1.4 Karışım Suyu	14
4.1.5 Katkı	14
4.2 Yöntem.....	15
4.2.1 Doğal Marnın Kalsinasyon İşlemi	17
4.2.2 Mikro-Betonların Bileşimi, Üretimi ve Saklama Koşulları.....	17
4.2.3 Mini Slump (Çökme) Deneyi	21
4.2.4 Özgül Ağırlık Deneyi	21
4.2.5 Su Emme Deneyi	21
4.2.6 Mikro-Betonların Yangın Deneyleri.....	21
4.2.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Deneyi.....	23
4.2.8 Eğilme – Basınç Dayanımı Deneyi.....	24
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	25
5.1 Katkılı Çimento Özellikleri.....	25
5.2 Kalsine Marnın Puzolanik Aktivitesi.....	25
5.3 Mini Slump (Çökme) Deneyi Bulguları	26

5.4 Özgül Ağırlık Bulguları	26
5.5 Su Emme Bulguları.....	28
5.6 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Bulguları (yangın deneyleri öncesi).....	29
5.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Bulguları (yangın deneyleri sonrası).....	30
5.8 Yangın Sonrası Ağırlık Kayıpları	33
5.9 Eğilme - Basınç Dayanımları Bulguları.....	35
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	41
7. KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	46

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yangın Sonrası Hasar Gören Yapılara Ait Görünümler.....	1
Şekil 4. 1 Kalsine Marna Ait Bir Görünüm	12
Şekil 4.2 Agregaların Sınıflandırılmış Hallerine İlişkin Bir Görünüm.....	14
Şekil 4.3 Mikro Betonların Üretiminde Kullanılan Hiperakışkanlaştırıcı	15
Şekil 4.4 Numunelerin Bileşenlerinin Tartıldığı Hassas Terazî	18
Şekil 4.5 Numunelerin Üretiminde Kullanılan Mikser.....	19
Şekil 4.6 Kalıplara Yerleştirilmiş Mikro Beton Numuneleri.....	19
Şekil 4.7 Kür Tankındaki Numuneler	20
Şekil 4.8 Kalıplarından Çıkarılan Numuneler	20
Şekil 4.9 Özgül Ağırlık Sehpaşî	21
Şekil 4.10 Yangın Deneylerinde Kullanılan Yüksek Sıcaklık Fırını.....	22
Şekil 4.11a Yangın Etkisinde Kalmış Mikro Beton Numuneler	23
Şekil 4.11b Yangın Etkisinde Kalmış Mikro Beton Numuneler	23
Şekil 4.12 Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm Cihazı.....	24
Şekil 5.1 Mikro Betonların Dky Özgül Ağırlıkları Değişimleri.....	27
Şekil 5.2 Mikro Betonların Kuru Özgül Ağırlıkları Değişimleri.....	27
Şekil 5.3 Mikro Betonların Su Emme Yüzdelerinin Değişimleri.....	28
Şekil 5.4 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Öncesi Upv.....	29
Şekil 5.5 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV	32
Değişimleri (Havada Soğutma İçin)	32
Şekil 5.6 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV	32
Değişimleri (Suda Soğutma İçin).....	32
Şekil 5.7 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık	34
Kayıpları (Havada Soğutma İçin)	34
Şekil 5.8 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık	34
Kayıpları (Suda Soğutma İçin).....	34
Şekil 5.9 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme	39
Dayanımları (Havada Soğutma İçin)	39
Şekil 5.10 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme	39
Dayanımları (Suda Soğutma İçin).....	39
Şekil 5.11 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç	40
Dayanımları (Havada Soğutma İçin)	40
Şekil 5.12 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç	40
Dayanımları (Suda Soğutma İçin).....	40

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Kullanılan Çimentoya İlişkin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikler	12
Çizelge 4.2 Doğal Marnın Kimyasal İçeriği ve Fiziksel Özellikleri	13
Çizelge 4.3 Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Oranı.....	13
Çizelge 4.4 Aktivite Deneylerinde Kullanılan Malzemeler.....	17
Çizelge 4.5 Numune Etiketleri.....	17
Çizelge 4.6 Mikro Betonlara Ait Bileşen Miktarları	18
Çizelge 5.1 Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri	25
Çizelge 5.2 Mikro Betonların Dky, Kuru Özgül Ağırlıkları.....	26
Çizelge 5.3 Mikro Betonların Su Emme Değerleri.....	28
Çizelge 5.4 Mikro Betonların Yangına Maruz Bırakılmayan Referans Numunelerin Upv Değerleri	29
Çizelge 5.5 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değerleri (Havada Soğutma İçin).....	30
Çizelge 5.6 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değerleri (Suda Soğutma İçin).....	31
Çizelge 5.7 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Havada Soğutma İçin).....	33
Çizelge 5.8 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Suda Soğutma İçin).....	33
Çizelge 5.9 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Havada Soğutma İçin).....	35
Çizelge 5.10 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Suda Soğutma İçin).....	36
Çizelge 5.11 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Havada Soğutma İçin)	37
Çizelge 5.12 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Suda Soğutma İçin).....	37

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

CM10	:	%10 Kalsine Marn içeren Mikro Betonlar
CM20	:	%20 Kalsine Marn içeren Mikro Betonlar
CM30	:	%30 Kalsine Marn içeren Mikro Betonlar
MPa	:	Megapascal
PC	:	Portland Çimentosu içeren Mikro Betonlar
SiO₂	:	Silisyum Dioksit
TS	:	Türk Standartları Enstitüsü
UPV	:	Ultra Pulse Velocity

1. GİRİŞ

Dünyada enerji güvenliği ile ilgili endişelere karşı uygulanan en kolay çözüm, enerji tüketiminde tasarruf edilmesidir. Özellikle kalkınmakta olan ülkeler, enerji dış alımlarını mümkün olduğunca azaltıp, yerel ve doğal kaynak kullanımlarına yönelerek, dünya enerji tüketim tasarruf politikalarını yoğun enerji kullanımlı iş kollarından başlayarak çok yönlü olarak desteklemektedirler. Söz konusu iş kollarından birisi olan inşaat sektörüne bu anlamda önemli bir pay düşmektedir. İnşaat sektöründe betonun dolayısıyla çimentonun hakimiyeti tartışılmaz bir husustur. Fakat çimento, üretim teknikleri gereği, pahalı ve çevreci olmayan bir yapı malzemesidir. Bu nedenle doğal puzolan kullanımları gittikçe yaygınlaşmaktadır. Puzolan kullanımları, çimento ve nihai ürün beton üretimlerini ekonomik ve çevreci hale dönüştürür. Aynı zamanda, çimento ve betonun nihai dayanım ve dayanıklılıkları da iyileşmektedir.

Ülkemiz, literatür tanımlamaları ile uyumlu, kullanılabilir, yerel ve doğal puzolan malzeme rezervleri ile onların çeşitliliği açısından oldukça zengindir. Dolayısıyla çevreci, enerji dostu, sürdürülebilir aynı zamanda da ekonomik çimento ve beton üretimlerine imkân sağlayabilecek oldukça yüksek potansiyele sahiptir.

Diğer taraftan, bilindiği gibi, beton ve betonarme yapılar yangınlara maruz kalır, hasar görür ve hatta kullanım dışı kalabilirler (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Yangın Sonrası Hasar Gören Yapılara Ait Görünümler

Bu çalışmanın amacı, yerel ve doğal puzolan kaynaklarının aktif hale geçirilip, özellikleri tanımlanmış, alternatif doğal puzolan çeşitliliğinin artırılması ve böylelikle çimento ve beton üretimlerinde doğal puzolan kullanımını yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktır. Bu amaç doğrultusunda, optimum sıcaklıkta kalsine edilmiş marn içeren katkılı çimentolar elde edildikten sonra mikro betonlar üretilmiştir. Ardından, mikro beton numuneler üzerinde yangın dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kalsine marn içeren mikro betonlar ile ilgili literatürde var olmayan yangın dayanımları incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Puzolanlar

Puzolanlar en genel anlamda bağlayıcılık özelliği olmayan ancak çimento inceliğinin altında öğütüldüklerinde veya kireç-su ile birleştiğinde oluşan reaksiyon sonucunda bağlayıcılık özelliği elde edilen ürünlere verilen isimdir. Silisoksit-alüminoksit ihtiva eden puzolanlar, su ortamında Ca (OH)₂ ile bir araya geldiğinde bağlayıcılık karakteristiği oluşturur. Bilindiği gibi, killer 600 °C – 900 °C kalsine edildiklerinde puzolanik özellik gösterirler. Volkanik küller ve tüfler, fırın cürüfları, uçucu kül, silis dumanı, pişirilmiş killer gibi malzemeler çimento-beton mineral katkıları olarak kullanılabilen başlıca puzolanlardır.

2.2 Puzolanik Aktivite

Puzolanik aktivite, maddenin yeteneği olarak tanımlanabilir. Puzolanik aktivite, puzolanların içerdiği aktif silisin çimentonun su ile birleştiğindeki hidrasyon çıktısı olan kalsiyumhidroksit ve suyun reaksiyona girme yeteneği şeklinde tanımlanabilir. Meydana gelen bu reaksiyon ile puzolan sayesinde ilave kalsiyumhidrat jelleri oluşmaktadır. Söz konusu bu oluşum ile dayanım artışı ortaya çıkmaktadır. Farklı bir ifade ile, meydana gelen reaksiyon sonunda portlandit miktarı azalmakta ve kalsiyumhidrat miktarı artmaktadır.

2.3 Puzolanların Gruplandırılması

Puzolanlar, yapay ve doğal olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

2.3.1 Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, puzolanik aktivite özelliği taşıyan atık malzemelerdir. Bu gruptaki en yaygın kullanılan puzolanlardan olan yüksek fırın cürüfları, uçucu küller ve silis dumanı gibi puzolan özellikli mineral katkıları bir takım endüstriyel üretimler sonucu elde edilmektedir. Diğer taraftan, buğday sapı külü ile pirinç kabuğu külü de hasatı yapılan buğday ve pirincin atık kabuklarından elde edilmektedirler.

2.3.1.1 Yüksek Fırın Cürufu

Demirin üretimi sırasında ortaya çıkan bir atık malzeme olan yüksek fırın cürufu, demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanması sonucu oluşmaktadır. Ham demir üretimi yüksek fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Oluşan yüksek fırın cürufu, söz konusu fırınlarda, hafifliğinden dolayı ham demirin üzerinde yer almaktadır.

2.3.1.2 Uçucu Kül

Termik santrallerin kullandığı linyit kömürünün %20-50'si taşkömürünün %10-15'i kül şeklinde meydana çıkmaktadır. Uçucu kül, yanma sonucunda bacadan çıkan gazlar ile atıklara verilen isimdir. (Mehta, 1986).

2.3.1.3 Silis Dumanı

Yüksek saflıktaki kuvarsın, 2000°C'ye yakın sıcaklıklarda gerçekleşen indirgenme tepkimesi sırasında SiO gazı açığa çıkmaktadır. SiO gazının havayla teması neticesinde hızlı bir şekilde yoğunlaşması, SiO₂ oluşumuna neden olmaktadır. Meydana gelen SiO₂ amorf yapıdadır ve içeriğinde çok yüksek oranda silika bulunmaktadır. Silis dumanı adı verilen bu malzeme, silikon veya silikon metali alaşımların elde edilme reaksiyonu sırasında açığa çıkan atık bir üründür.

2.3.1.4 Pirinç Kabuğu Külü

Ülkemizde de tarımı yapılan bir bakliyat olan pirincin üretim sonu atığı olan pirinç kabuklarının yakılması sonucu elde edilen pirinç kabuğu külü, soğutulma hızına göre iki farklı yapıya sahip olur. Yavaş soğutma sonucu kristal, hızlı soğutma sonucunda amorf yapılu pirinç kabuğu külü meydana gelmektedir. Yüksek özgül yüzey alanı değeri ve yüksek puzolanik aktivitesi ile çimento ve beton sektöründe kullanılan pirinç kabuğu külü amorf yapılu puzolanlar arasındadır.

2.3.2 Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar genellikle öğütme, kırma ve eleme yollarıyla elde edilmektedirler. Volkanik tüfler, volkanik camlar, traslar, diatomlu topraklar ve bazı killere doğal puzolan olarak adlandırılmaktadır. (Leckebush, 1984).

2.3.2.1 Volkanik Orijinli Puzolanlar

Bu puzolanlar sıklıkla yanardağdan çıkan alüminli silikadan oluşan erimiş lavlardan oluşmaktadır. Lavların yüksek ısıları camsı malzemelerin oluşumlarını sağlamakta ve bu durum yüksek puzolanik aktivite meydana getirmektedir.

2.3.2.2 Diatomit

Volkanik aktivitelerin yüksek görüldüğü bölgelerde bulunan tuzlu ve tatlı su haznelerinde fotosentezin sık olarak yapıldığı sığ derinliklerde görülen tek hücreli alg türü olan diatome iskeletlerinin yanı sıra volkanik kül, kum, kil ve diğer organik kalıntılardan oluşan bir kayaç türüdür. Diatomit hem öğütüldükten sonra hem de

öğütülmeden puzolanik özellik taşımaktadır. Kizelgur veya diyatomit toprağı olarak da anılmaktadır. (Leckebush, 1984; Aruntaş ve Tokyay, 1996).

2.3.2.3 Tras

Tek başlarına hidrolik bağlayıcılığı olmayan ancak ince öğütüldüklerinde çimento veya kireç gibi ürünlerle sulu ortamda karıştığı zaman bağlayıcılık kazanan ve aynı zamanda eklendiğı çimentoya kimyasal dayanıklılık da kazandıran volkanik bir kayaç türüdür.

2.3.2.4 Pişirilmiş Kil ve Şeyl

Kristal yapıya sahip kil mineralleri, ham durumda iken puzolanik aktivite göstermezler. Puzolanik aktivite gösterebilmeleri için 700-900°C' de ısıtılma işlem görmesi gerekmektedir. Isıtılma işlemi, kristal yapıyı bozarak minerali amorf silis-alüminli yapıya dönüştürmektedir.

2.4 Puzolanların Betonun Yangın Dayanımına Etkisi

Yapılan çalışmalarda da görülmüştür ki; beton, yüksek sıcaklık altında kaldığında mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişimlere uğramaktadır.

Bilindiğı üzere, puzolan kullanımları ile betonların dayanım ve dayanıklılıklarındaki artış sonucunda performansı yüksek betonlar üretilmektedir. Puzolanların yerdeğiştirme oranlarına ve çeşitlerine göre çimento ve nihai ürün olan betonların yangın dayanımlarının iyileştiğı görülmektedir (Karaca ve ark., 1997; Lawson ve ark., 2000).

2.5 Doğal Marn

Marn doğamızda bulunan kil ve kalkerin %30-50 oranında kil %50-70 oranında kalker karışımından oluşan kayaçlara denir. Kalkerin sertliğinden çok daha düşük sertliğe sahiptir. Kil miktarına göre sertliği değişir. Tabakaları düzgün haldedir. Genellikle %30 kil ve %70 kalker içeren marnlar çimento yapımında kullanılır. Kolay sökülebilir nitelikte yumuşak olması, öğütme, pişirme ve işletmede ekonomi sağlaması nedeniyle sıklıkla kalkerli marn kullanılır.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Gustafarro ve ark., (1971) yaptıkları çalışmada, 500-1600 kg/m³'lük birim hacim ağırlıklı hafif betonların yangın dayanımlarını incelemişlerdir. Hafif betonların nem içerikleri ile bağıl nemleri arasındaki ilişkileri tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, hafif betonların yangın dayanımları ile döşeme kalınlıkları arasında da bir ilişki incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, hafif betonların birim hacim ağırlıklarındaki artışın her bir beton türü için yangın dayanımlarında azalmalara neden olduğunu göstermişlerdir.

Zoldners ve Wilson, (1973) yaptıkları bu deneysel çalışmalarında, cüruf agregaları ve genleşmiş şist kullanarak ürettikleri beton numunelerini yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmışlardır. Üretilen bazı numunelerde, çimento ağırlığı yüzdesinin %25-40 aralığında silis dumanı, uçucu kül, şist külü gibi mikro-dolgu malzeme kullandılar. Kullanılan mikro-dolguların betona etkisini araştırmışlardır. Numuneler fırınlarda 1000⁰C' ye kadar yüksek ısıya maruz bırakıldıktan sonra soğumaya bırakılmışlardır. Çalışmada kullanılan mikro-dolgu malzemeleri hafif betonların birim hacim ağırlıklarına bağlı olarak dayanımlarının değiştiğini ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının yüksek sıcaklık etkilerinde bir sakınca olduğunu bildirmişlerdir.

Rostasy ve ark., (1980) yaptıkları çalışmada farklı yangın sıcaklıklarının betonun gözeneklilik yapısı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan 900⁰C' de betonun toplam gözenek hacminde yükselişe sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Ataman (1991) yüksek sıcaklık altında betonun, mekanik özellikleri, soğutma türleri ve farklı sıcaklıkların basınç ve eğilme mukavemetlerine etkilerini incelemişlerdir. Yangın etkisinin betonun su ve hava yoluyla soğutulmaları sonucunda mukavemetlerdeki azalmaların, su ortamında soğutulanlara göre daha küçük olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum, numunelerin su içinde tekrar hidratasyon yapabilecek ortamı bulması ve bu sebeple mukavemetin bir kısmının geri kazanılması şeklinde yorumlamışlardır.

Kristensen ve Hansen, (1994) yaptıkları çalışmada, ısı şok ve/veya farklı sıcaklık etkilerinde çimento hamuru-beton numunelerinde meydana gelen çatlak mekanizması üzerinde çalışmışlardır. 500-900⁰C aralığındaki sıcaklıklarda

numunelerdeki ultrasonik ses dalga hızı (UPV) değerlerini ölçmüşlerdir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, çimento hamuru numunelerinde 300°C' de çatlamlar görülürken, beton numunelerde 500°C' de çatlakların oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Saad ve ark., (1996) geleneksel portland çimentosu yerine ağırlıkça farklı yüzdelerde silis dumanı ihtiva eden betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine yangının etkilerini incelemişlerdir. Numuneler her bir inceleme için, üçer saat 200-600°C arasındaki sıcaklıklarda incelemişlerdir. Numuneler daha sonra oda sıcaklığında soğutulmuşlardır. %10 silis dumanı ihtiva eden numunelerin tüm sıcaklık değerlerinde daha az boşluk oranı ve yüksek basınç dayanım değerlerinde oldukları, 600°C ye maruz bırakılan betonlarda basınç dayanımlarının referans betonlara kıyasla %64,6 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı şekilde %20-30 aralığındaki silis dumanı ihtiva eden beton numunelerin 600°C' de ısıtıldıklarında geleneksel portland çimentosu ile üretilen beton numunelere kıyasla dayanımlardaki artışın %28 civarında olduğunu gözlemlemişlerdir.

Lin ve ark., (1996) yaptıkları çalışmada, laboratuvar koşullarında yüksek sıcaklıklar altında bırakıldıktan sonra soğutulan ya da doğada yangına maruz kalmış yapılardan alınan örnekler içinde stereo mikroskobu ile ölçümler yaparak ve SEM fotoğrafları kullanarak, yüksek sıcaklıklar altında bırakılmış betonların mikro yapılarını incelemişlerdir. Isıtma boyunca parçalanma ve çatlamlar, soğutma sırasındaki dağılmalar yangın boyunca betonda sık görülebilen davranışlar olduğunu belirtmişlerdir. Bu deneylerde silis agregası ve portland çimentosundan faydalanılarak üretilen standart silindir şeklinde numuneler 200-900°C sıcaklık aralığına maruz bırakılmışlardır. Numunelerde ince çatlaklar dışında, 300°C sıcaklığın etkisinde çatlaklar oluşmadığı, bu sıcaklığın altında ise betonda yerel çatlakların görüldüğünü ifade etmişlerdir. 300°C-500°C arasındaki sıcaklıklarda agregaların ara yüzeylerinde ve aderanslarında çatlakların görüldüğünü, 500°C' nin üstünde ise agrega-çimento hamuru arasında önemli sayılabilecek çatlaklar oluştuğunu vurgulamışlardır.

Karaca ve ark., (1997) yaptıkları çalışmada, hafif betonun yüksek sıcaklık altında dayanım davranışlarını incelemişlerdir. Yüksek sıcaklık altında bırakılan hafif betonların eğilme mukavemetlerinin referans numunelerinkine kıyasla, sıcaklık

arttıkça azaldığı ancak bu azalmanın geleneksel betonlarınkine kıyasla daha az olduğunu vurgulamışlardır. 600⁰C' yi aşan değerlerde havada soğutulan hafif beton numunelerin dayanımlarının önemli bir miktarda azaldığı, suda soğutulan hafif beton numunelerin ise ölçüm alınamayacak şekilde dağıldığı ve 1000⁰C ve daha yüksek sıcaklık altında kalanlarda ise havada ve suda soğutulan hafif beton numunelerin basınç dayanımlarının oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Hafif betonların yangın dayanımlarının, petrografik yapı, agrega ve agregaların mineralojik yapıları ve yangın söndürme teknikleriyle ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Phan ve Carino, (1998) yaptıkları bu çalışmada, yangın etkisinde, yüksek dayanımlı betonların dayanım gelişimlerini incelemişlerdir. Çalışma deney programında, geleneksel, hafif agregalar ile kalkerli ve silisli agregalar ile deney serileri hazırlamışlardır. Üretilen beton numunelerde geleneksel portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı içeren katkılı çimento kullanmışlardır. Yüksek dayanımlı betonlar geleneksel olanlara kıyasla daha hızlı değişen dayanım kayıpları göstermiştir.

Chan ve ark., (1999) çalışmalarında, yüksek ve geleneksel mukavemetli beton numuneleri 1200⁰C' ye kadar farklı sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Numunelerin soğutma işlemini oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Soğutma işlemi sonrasında çekme ve basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Çalışmada ilaveten yüksek ve geleneksel mukavemetli beton numunelerin gözeneklilik durumlarını gözlemlemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, geleneksel dayanımlı betonlara benzer bir şekilde yüksek dayanımlı betonlarda çekme dayanımlarındaki düşüş, beton numunelerin basınç dayanımlarındakine kıyasla gözle görülür orandadır. Yüksek sıcaklık etkisinin deney serilerindeki beton numunelerin gözenek yapılarındaki artışa bağlı olarak dayanıklılık üzerinde de önemli etkiler oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Lawson ve ark., (2000) farklı yüksek sıcaklıklar altında yüksek mukavemetli betonlar üzerinde çalışmışlardır. Yüksek mukavemetli beton elde etmek için silis dumanını katkı olarak kullanmışlardır. Çalışmada beton numuneler üzerinde 100-450⁰C sıcaklık aralığı kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında soğutulmuşlardır. Deney serilerine ait beton numunelerin mekanik özellikleri ve elastisite modüllerini belirlemişlerdir. Numuneler, 240⁰C-280⁰C arasında yüksek mukavemetli betonların

patlayarak parçalandığı, geleneksel mukavemetli beton numunelerde ise patlama olmadığını gözlemlemişlerdir.

Chan ve ark., (2000) 800⁰C-1100⁰C sıcaklık aralığına maruz bırakılan geleneksel ve yüksek dayanımlı betonları kademeli ve ani olarak soğutmuş ve davranışlarını incelemiştir. Numunelerin soğutma işlemleri havada ve suda olmak üzere ani ve yavaş parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek dayanımlı beton numunelerin basınç dayanımlarında geleneksel betona göre gözle görülür düşüşler gözlemlemişlerdir. Beton numuneler üzerindeki ani soğutmaya bağlı ısıl şokun numunelerin bozulmaları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını da belirtmişlerdir.

Bui ve ark., (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada, silis dumanı, uçucu kül, metakaolin ve atık kağıt atığı çamur külü gibi çeşitli mineral katkıları ve geri dönüştürülmüş agregalar içeren betonların mekanik özellikleri üzerinde kullanılan mineral katkıların etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, mineral katkıları geri dönüştürülmüş agregalı betonların yüksek sıcaklık etkisine karşı önemli bir şekilde iyileşmeler sağladığını, Uçucu kül katkınının diğer katkılara göre numunelerin basınç dayanımlarını en iyi şekilde iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Mineral katkıların beton numunelerin yoğunluk ve ultra ses geçiş hızları üzerinde önemsiz etkiler gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, beton numunelere mineral katkıların dahil edilmesi ile yüksek sıcaklıkta numunelerin elastisite modüllerinde, tokluğunda ve kritik gerilme değerlerinde artış meydana getirdiğini açıklamışlardır. Son olarak, çalışma konusu betonların pratik uygulamaları için referanslar sağlayabilen, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış geri dönüştürülmüş agregalı betonların basınç dayanımları ve elastisite modüllerinin tahmin etmek için amprik bağıntılar önermişlerdir.

Esen ve Kurt, (2018) çalışmalarında, mineral katkı türlerinin betondaki yüksek sıcaklığın etkisinin değişimi yönünde deneysel incelemeler yapmışlardır. İncelemelerinde, CEM I 42,5 R çimentosu ile ikameli olarak (hacimce, %10, %20, %30, %40) barit, diatomit, silis dumanı, F sınıfı uçucu kül gibi farklı mineraller kullanılmışlardır. 28 günlük dayanıma sahip mineral katkıları bu beton numunelerinin kuru birim ağırlıkları, su altı ağırlıkları ve suya doygun ağırlıklarını belirlemişlerdir.

Ağırlık itibariyle su emme yüzdeleri belirlenen beton numunelerin Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) ölçümlerini yapmışlardır. Daha sonra 200, 400, 600 ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneleri oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır ve basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. En yüksek su emme oranları diatomit donatılı betonda iken, en yüksek basınç dayanımlarının silis dumanı donatılı betonda olduğunu çalışmanın sonuçlarında belirtmişlerdir.

Shazim ve ark., (2019) yangına maruz kaldıktan sonra beton yapıların güvenliği ve hizmet ömrünün bağlı olduğu dayanım ve durabilite üzerine sentez niteliğinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, çeşitli mineral katkıları içeren betonun yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki dayanıklılığı hakkında kapsamlı ve güncel bir inceleme sunmuşlardır. Yangına maruz kaldıktan sonra betonun dayanıklılığı, klorür iyonu geçirgenliği, su geçirgenliği, emme ve emicilik gibi dolaylı testlerle ölçüldüğünü vurgulamışlardır. Bu ölçüm teknikleri ile ilgili test yöntemleri ve mevcut literatür ayrıntılı bir şekilde bu çalışmada gözden geçirilmiş ve özetlenmiştir. Yangın sonrası koşullarda betonun dayanıklılık performansını iyileştirmek için izlenen son eğilimler de tartışılmıştır ve gelecekteki araştırma ihtiyaçları belirlenmiştir. Ayrıca, sürdürülebilir betonlarla inşa edilen yangına maruz beton yapıların dayanıklılık performansını doğru bir şekilde anlamak için bu alanda çok fazla çalışma yapılması gerekliliğini de belirtmişlerdir.

Semenov ve Bazanov, (2020) çalışmalarında normatif göstergeleri sağlamak için betonarme yapıların yangına dayanıklılığını artırmaya yönelik mevcut çözümleri gözden geçirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmada kullandıkları yöntem, teorik analiz yöntemidir. Çalışmada, bir yangında betonarme yapıların kırılma beton tahribatından korunması konusu ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Yangına maruz kalma sırasında betonarme bir yapının bütünlüğünü korumanın çok etkili bir yolunun, betonda belirli bir gözenek hacmi oluşturmak için beton bileşimini değiştirmek ve yapıyı kontrol etmek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu tür yöntemlerin kullanımına ilişkin mevcut verilerin esas olarak ampirik olduğunu vurgulamışlardır.

Hao Qin ve ark., (2021) çalışmalarında, patlayıcı parçalanmanın yangına maruz kalan ultra yüksek performanslı beton (UHPC) yapılar için ciddi bir risk oluşturduğunu ve ultra yüksek performanslı beton yapıların mühendislik uygulamasını

ile yangın güvenliğini önemli ölçüde engellediğini vurgulamışlardır. Bileşenlerin ve karışım özelliklerinin optimizasyonu üzerine önceki çalışmaların aksine, bu çalışma, UHPC'nin yüksek stres durumunda ve aşırı ısıtma hızı altında patlayıcı parçalanmasını önlemek için iki aşamalı sıcak havayla kürleme (THAC) olan yeni bir kürleme rejimi önermektedir. Kürleme rejimi, elyaf türü ve su-bağlayıcı oranı gibi parametrelerde değişiklik gösteren 228 adet UHPC küp numuneyi, ISO 834 yangın standardı kapsamında test etmişlerdir. Buna göre, THAC'ın numunelerin mekanik özellikleri ve patlayıcı parçalanması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test edilen küplerin mikro yapılarını gözlemek için taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanmışlardır. Ayrıca, çeşitli kür rejimlerine ve yük oranlarına sahip 12 adet tam ölçekli UHPC kiriş elemanı termal-mekanik koşullar altında teste tabi tutmuşlardır. Kirişlerin patlayıcı parçalanma davranışı gözlemlenmiş ve parçalanmanın yangına dayanıklılık üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Test sonuçları, UHPC'nin 50°C kürlemenin ilk aşaması sırasında yoğun bir mikro yapı oluşturduğunu belirlemişlerdir. 150°C'de sıcak havayla kürleme ile, artık çimento ve mineral katkıların daha fazla hidrasyonu ve puzolanik reaksiyonu aktive edilerek, masif kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri üretilebilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Kiran ve ark., (2021) yaptıkları çalışmalarında, metakaolin (MK), silika dumanı (SF) ve uçucu kül (FA) gibi mineral katkıların, yüksek sıcaklığa maruz kalan kendiliğinden yerleşen betonların (SCC) mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. İki farklı SCC karışımını, 20MPa ve 50MPa'ya ulaşmak için tasarlamışlardır. Üretilen numuneler, ISO 834 standart yangın eğrisini takiben yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Basınç dayanımı, su emme, asit direnci ve hızlı klorür penetrasyon testi (RCPT) testleri, yüksek sıcaklığa maruz kalan ısıdan etkilenen SCC numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, M20 ve M50 kalite SCC numuneleri için sırasıyla %48 ve %64'lük bir mukavemet azalması elde edildiğini vurgulamışlardır.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Materyal

4.1.1 Portland Çimentosu

Portland çimentosu kil, kireçtaşı veya şeyl karışımının yakılması ve öğütülmesiyle üretilen, genellikle gri olan, ince öğütülmüş bir toz biçimindeki bağlayıcı malzemedir. İngiltere'den mucit Joseph Aspdin, 1824'te temel işlemin patentini aldı ve onu Portland Adası'ndan bir kireçtaşı olan portland taşına benzerliğinden dolayı adlandırdı. Çalışmada kullanılan çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Çizelge 4.1 de verilmektedir.

Çizelge 4.1 Kullanılan Çimentoya İlişkin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikler

Kimyasal kompozisyon	(Ağırlıkça %)	Fiziksel ve mekanik özellikler			
SiO ₂	19.53	Özgül ağırlık, (g/cm ³)	3.12		
Al ₂ O ₃	5.33	Priz başlangıcı, (saat)	2.50		
Fe ₂ O ₃	3.56	Priz sonu, (saat)	4.15		
CaO	62.26	Hacim genleşmesi, mm	2.00		
MgO	0.99	Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3210		
SO ₃	3.02	Basınç dayanımları (MPa)	2 gün	7 gün	28 gün
Kızdırma kaybı	3.06	Elek üstü (%)	32.30	44.60	53.00
			45µm	90 µm	200 µm
			32.89	12.15	2.73

4.1.2 Marn

Çalışmadaki deney serilerinin üretiminde kullanılan doğal marn Orta Karadeniz Bölgesi Sinop ili, Erfelek ilçesi 'nden temin edilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde ise doğal marn optimum sıcaklıkta kalsine edilerek kullanılmıştır. Kalsinasyon sonrası tez içerisinde kalsine marn olarak anılacak olan numuneden bir görünüm Şekil 4.1 de verilmektedir. Diğer taraftan doğal marna ait kimyasal içerik ve fiziksel özellikler Çizelge 4.2 de verilmektedir.



Şekil 4. 1 Kalsine Marna Ait Bir Görünüm

Çizelge 4.2. Doğal Marnın Kimyasal İçeriği ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal İçerik	(%)	Fiziksel özellikler	
SiO ₂	56.63	Özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.70
Al ₂ O ₃	12.34	Blaine (cm ² /g)	4630
Fe ₂ O ₃	7.46	Elek üstü (%)	
CaO	12.91	45µm	21.36
MgO	2.83	90 µm	7.80
Kızdırma kaybı	7.03	200 µm	1.57

4.1.3 Agregata

Mikro betonların üretiminde kullanılan ince agregata, Gümüşhane ili, Torul ilçesinden temin edilmiştir. TS EN 1097-6 standardında istenilen özelliklere göre agregaların birim hacim ağırlıkları ve su emme oranları belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmektedir.

Çalışmadaki mikro betonların üretiminde kullanılan agregata, 4-2, 2-1, 1-0,5, 0,5-0,25 ve 0,25-0 mm’lik sınıflandırma aralıklarında sırasıyla %40, %20, %15, %15 ve %10 yüzdelerle kullanılmıştır. Agregaların sınıflandırılmış hallerine ilişkin bir görünüm Şekil 4.2 de verilmektedir.

Çizelge 4.3 Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Oranı

Agregata	Kuru Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Doygun Kuru Yüzey Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Görünür Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Su Emme Oranı (%)
Kaba Agregata	2.69	2.70	2.71	0.33
İnce Agregata	2.63	2.67	2.72	1.18



Şekil 4.2 Agregaların Sınıflandırılmış Hallerine İlişkin Bir Görünüm

4.1.4 Karışım Suyu

Çalışmadaki karışım suyu bileşeni içme suyu kalitesinde Ordu ili Altınordu ilçesine ait şebeke suyu kullanılmıştır. Bilindiği gibi, beton üretimlerinde kullanılan su bileşeninin asidik özelliği olmamalı ve sülfat içermemelidir. Ayrıca, su içeriğindeki tuz oranı betona ve donatıya zararlı olmayacak miktarlarda olmalıdır.

4.1.5 Katkı

Kalsinasyon işlemi görmüş doğal marn içeren katkıli çimentolar ile hazırlanan numunelerde TS EN 934-2 standartlarına göre polikarboksilat eter (LEXP1172) ticari kod adıyla anılan hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Mikro betonların bileşimine, söz konusu hiperakışkanlaştırıcı karışım suyuna ilave edilerek katılmıştır. Akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı 1.05 gr/cm^3 tür. Bilindiği gibi akışkanlaştırıcı katkı kullanımlarının amacı daha az su ile daha fazla işlenebilirlik sağlamaktır. Daha homojen çimento taneleri elde etmektir ve ağırlıkça çimentodan tasarruf edilmektedir. Diğer taraftan, betonda çimento topaklanması azaltılmış, işlenebilirlik ve dayanım-dayanıklılık (başarım) artırılmış olacaktır. Mikro betonların üretiminde kullanılan hiperakışkanlaştırıcıya ait bir görünüm Şekil 4.3 de verilmektedir.



Şekil 4.3 Mikro Betonların Üretiminde Kullanılan Hiperakışkanlaştırıcı

4.2 Yöntem

Çalışmadaki deney serilerinin üretiminde kullanılan doğal marn Sinop ili, Erfelek ilçesi 'nden temin edilmiştir. Çimento ağırlığının değişken yüzdelere (%0, %10, %20 ve %30) karşılık gelecek şekilde yerdeğiştirilen kalsine marn içeren katkıli çimentolar elde edildikten sonra mikro beton numuneleri üretilmiştir.

Mikro beton teriminin tanımlamasına göre, beton tasarımlarındaki iri agregaya bileşenin kullanılmadığı, böylelikle de beton bileşiminin harç bileşimini bire bir temsil eden karışımlarla üretilen malzemelerdir (Hüsem, 2006).

Diğer taraftan, bilindiği gibi beton tasarımındaki agregaya bileşenin yangına dayanıklılıkları daha yüksektir. Ayrıca, agreganın homojen olmayan yüksek sıcaklıkları soğuma sürecinde de homojen olmayan iç basınçlara neden olmaktadır (Hüsem, 2006).

Yukarıda verilen tanımlama ve agregaların yangın performanslarındaki değişken olabilecek davranışlar sergilemeleri şeklindeki yapılan açıklamalar dikkate alındığında; gerçekleştirilen bu tez çalışmasında kullanılan mineral katkının etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından yalnızca ince agrega kullanarak agreganın etkisini minimize etmek amacıyla mikro beton tasarımları kullanılmıştır.

Mikro beton numunelerin fiziksel özellikleri, üretim sonrası yangın deneyleri ve mekanik özellikleri tespiti gibi standart deneyler yapılmıştır. Standart deneyler sonunda elde edilen bulgular, öncelikle kendi içlerinde daha sonra birbirleriyle olmak üzere karşılaştırma yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmalar, Ordu Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır.

Doğal Marnın Puzolonik Aktivitesi

Ekonomik, çevreci ve enerji tasarrufu yüksek çimento üretimleri için puzolan kullanımını yaygınlaştırmak gereği açıktır. Kullanılan puzolanların aktivitelerine bağlı olarak katkılı çimentoların mukavemet, priz süreleri ve hidrasyon ısısı gibi özelliklerinde de olumlu değişimler görülmektedir. Performansı iyileşen çimento bu sebeple akıllı çimento etiketini almaktadır.

Bilindiği gibi, puzolanların içindeki silisin su ile reaksiyona girebilme yeteneğine puzolanik aktivite denilmektedir. Puzolanik aktivitenin sayısal büyüklüklerini belirlemek için bir takım mekanik ve kimyasal standart deneyler yapılmaktadır. Söz konusu deneylere ait standartlar TS 25 (2008), ASTM C311 (2005)'dir.

Bu çalışmada, doğal marnın puzolanik aktivitesini belirlemek için TS 25' in önerdiği mekanik deney yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu mekanik deneylerde gerekli numuneleri hazırlamak için kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.4' de verilmektedir. Üretilen numuneler, TS EN 196-1 (TSE, 2016)'e uygun tek eksenli basınç deneyine maruz bırakılmışlardır.

Çizelge 4.4 Aktivite DeneYlerinde Kullanılan Malzemeler

Malzemeler	TS 25	Miktarlar
Sönmüş kireç (CaOH ₂)	150g	150g
Puzolan	2x150x(puzolanın öz. ağı. /CaOH ₂)'in öz. ağı. (g)	2x150x(2.7/2.15) = 376.74g
Standard kum	1350g	1350g
Su	0.5x (150+puzolan) (g)	0.5x(150+376.74) = 263.372g

4.2.1 Doğal Marnın Kalsinasyon İşlemi

Genellikle puzolanik özellik beklentisi olan killerin 500-800°C sıcaklık aralığında pişirilmesi gerekmektedir. Çalışmada kullanılan marn bilindiği gibi çeşitli oranlarda kil ve kalker içermektedir. Marna ait kil bileşenini aktifleştirmek amacı ile 800 °C' de kalsine edilme zorunlulukları vardır (Usta, 2019). Literatürde verilen bilgiler doğrultusunda çalışmada kullanılan doğal marn optimum sıcaklığı olan 800°C' de kalsine edilerek üretime dahil edilmiştir.

4.2.2 Mikro-Betonların Bileşimi, Üretimi ve Saklama Koşulları

Deney numuneleri çimento ağırlığının %0, %10, %20 ve %30 yüzdelerinde doğal marn içerecek şekilde hazırlanmışlardır. Deney programı numunelerin yangın deneyleri sonucunda özgül ağırlıkları, su emme oranları, eğilme-basınç dayanımları ve ağırlık kayıplarının belirlenmesi amaçlı yürütülmüştür. Deney programında 28 adet deney serisi (her bir deney serisinde 3 adet numune) toplam 84 adet numune üretilmiştir. Mikro beton numunelerin etiketlenmesi Çizelge 4.5' de verilmektedir.

Çizelge 4.5 Numune Etiketleri

Numune Etiketleri	Açıklama ve İçerik
PC	Portland çimentosu içeren
CM10	%10 kalsine marn içeren
CM20	%20 kalsine marn içeren
CM30	%30 kalsine marn içeren

Mikro beton numunelerin üretiminde kullanılan malzemelerin bileşim hesabı TS 802'e uygun olarak mutlak hacim yöntemi ile yapılmıştır. Mikro betonlara ait bileşen miktarları Çizelge 4.6' de verilmektedir.

Çizelge 4.6 Mikro Betonlara Ait Bileşen Miktarları

Bileşenler (kg/m ³)	PC	CM10	CM20	CM30
Portland Çimentosu	450	405	360	315
Kalsine Marn	-	45	90	135
Su	225	225	225	225
Toplam Agrega	1350	1350	1350	1350
Akışkanlaştırıcı	3.60	4.50	4.73	4.95

Öncelikle, mikro beton üretimlerinde 0-4 mm aralığındaki agregalar sınıflandırılmıştır. Laboratuvardaki mevcut hassas terazi ile (Şekil 4.4) karışıma girecek olan bileşenler bileşim hesabına göre tartılarak nemlendirilen mikserde (Şekil 4.5) sırasıyla çimento-kalsine marn, sınıflandırılmış agrega, akışkanlaştırıcı ve su ilave edilerek yerleştirilmiş ve eşit sürelerde karıştırılmıştır. Karışımlar taze haldeyken standart slump deneyi yapılmıştır. Ardından 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Mikro betonlara ait fotoğraf Şekil 4.6 verilmektedir. 24 saat sonunda kalıplarından çıkarılan numuneler etiketlenerek kür tankına yerleştirilmiştir (Şekil 4.7 ve 4.8).



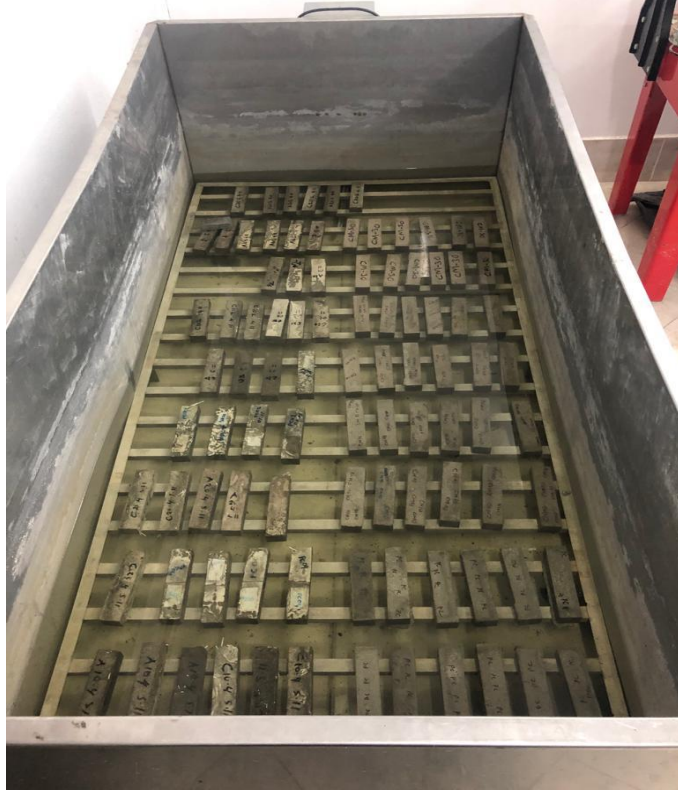
Şekil 4.4 Numunelerin Bileşenlerinin Tartıldığı Hassas Terazi



Şekil 4.5 Numunelerin Üretiminde Kullanılan Mikser



Şekil 4.6 Kalıplara Yerleştirilmiş Mikro Beton Numuneleri



Şekil 4.7 Kür Tankındaki Numuneler



Şekil 4.8 Kalıplarından Çıkartılan Numuneler

4.2.3 Mini Slump (Çökme) Deneyi

Bu deney yöntemi her bir karışımın kıvamlarının belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. Deney TS EN12350-2 'e göre yapılmıştır. Deney konisine karışım 3 tabaka olarak yerleştirilmiştir.

4.2.4 Özgül Ağırlık Deneyi

Kür süreleri sonunda mikro beton numunelerin doymun kuru yüzeyli (DKY) ve kuru özgül ağırlıkları Şekil 4.9'deki özgül ağırlık sehpası ile belirlenmiştir.



Şekil 4.9 Özgül Ağırlık Sehpası

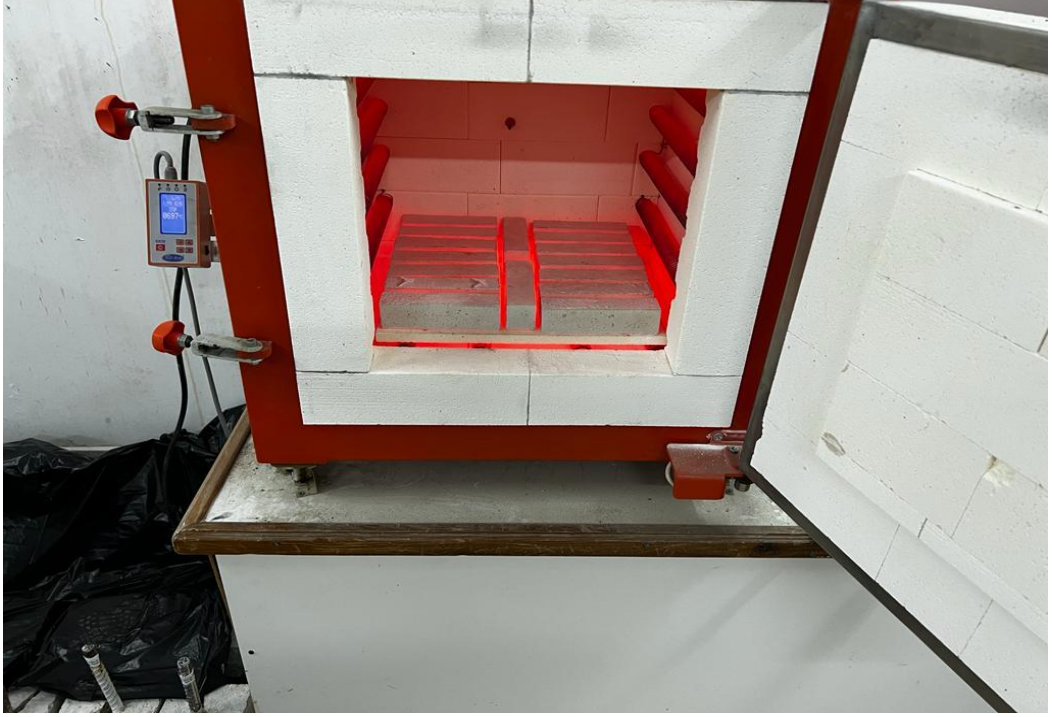
4.2.5 Su Emme Deneyi

Mikro beton numunelerin su emme değerleri DKY ve etüv kurusu ağırlıkları dikkate alınarak belirlenmiştir.

4.2.6 Mikro-Betonların Yangın Deneyleri

Deney numunelerine yangın etkisini belirlemek amacı ile yangın deneyleri başlamadan önce 40x40x160 mm'lik prizmatik numuneler önce 24 saat süresince 70 °C' de etüvde bırakılarak sabit numune ağırlıkları elde edilmiştir. Ardından ultrases geçiş hızı (UPV) tespit deneyleri yapılmıştır. Daha sonra numuneler fırın sıcaklık artış hızı 5-10°C/dk olan yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmişlerdir. Deney programındaki sıcaklıklar (300°C - 600°C - 800°C) elde edildikten sonra numuneler fırında 1 saat

süresince bırakılmışlardır. Her sıcaklık değişimleri için 3' er mikro beton numune kullanılmıştır. Yangın deneyleri Şekil 4.10'daki Ref-San marka yüksek sıcaklık fırınında yapılmıştır.



Şekil 4.10 Yangın Deneylerinde Kullanılan Yüksek Sıcaklık Fırını

Yangın deneyleri tamamlandıktan sonra yüksek sıcaklık fırınından çıkarılan mikro beton numuneler havada ve suda soğutma koşulları ile soğutulmuşlardır. Her iki koşul altındaki tüm numuneler oda sıcaklığına getirilmişlerdir. Oda sıcaklığına gelen numuneler üzerinde yeniden UPV tespitleri yapılmıştır. Sonrasında deney programına göre mikro beton numunelerin eğilme-basınç dayanım deneyleri ile ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, yangın etkisinde bırakılmayan geleneksel numunelerin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Yangın etkisinde kalmış mikro beton numunelerinin genel görünümleri Şekil 4.11a ve 4.11b' de verilmektedir.



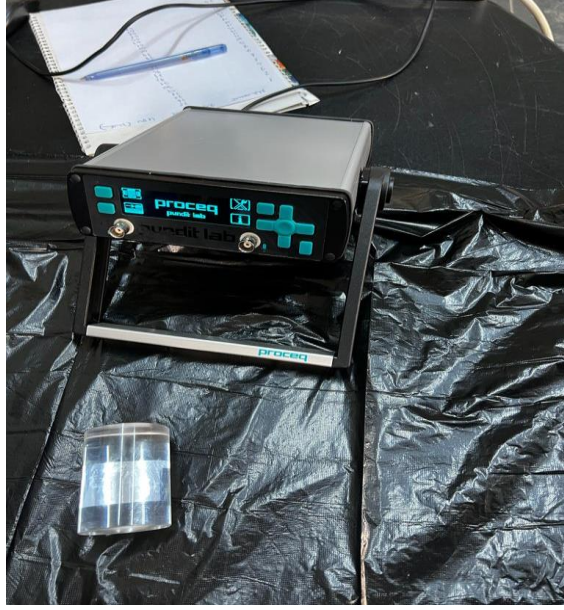
Şekil 4.11a Yangın Etkisinde Kalmış Mikro Beton Numuneler



Şekil 4.11b Yangın Etkisinde Kalmış Mikro Beton Numuneler

4.2.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Deneyi

Ultrases geçiş hızı (Ultrasonic Pulse Velocity) deneyi, prizmatik mikro beton numunelerin 40x40 mm'lik kesitlerine karşılıklı olarak (direkt okuma) yerleştirilmiş ve ölçme problemleri yardımıyla ultrases dalgasının ses geçiş süresi mikro saniye cinsinden tespit edilmiştir. Şekil 4.12' de ASTM C 597'ye göre ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4.12 Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm Cihazı

4.2.8 Eğilme – Basınç Dayanımı Deneyi

Mikro beton numunelerin eğilme-basınç dayanımları TS EN 12390-5'e göre belirlenmiştir. Deneyler için 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde prizmatik mikro beton numuneler kullanılmıştır. Numunelerin konulduğu mesnet açıklıklarının orta bölgesinden olmak üzere yükleme yapılmıştır. Deneyler kuvvet adımlı ve sabit yükleme hızında uygulanmıştır. Eğilme dayanım deneyleri sonrasında kırılan numuneler üzerinde basınç dayanım deneyleri yapılmıştır.

5. BULGULAR veTARTIŞMA

Kalsine marn katkı içeren katkılı çimentolar kullanılarak üretilen mikro beton numuneler üzerinde yukarıda açıklanan yöntemlere göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular ve bu bulgular ışığındaki tartışmalar aşağıda verilmektedir.

5.1 Katkılı Çimento Özellikleri

Çalışmada kullanılan kalsine marn içeren katkılı çimentolar ve Portland çimentosunun fiziksel özellikleri Çizelge 5.1 de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri

Fiziksel özellikler	PC	CM10	CM20	CM30
Blaine inceliği (cm ² /g)	3210	3305	3540	3610
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.12	2.95	2.84	2.82

Katkılı çimentoların (CM10, CM20, CM30) Blaine incelikleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %2,96, %10,28, %12,46 artmıştır. Diğer bir deyişle, katkılı çimentoların incelikleri marnın inceliğine bağlı olarak azalmıştır (bkz. Çizelge 4.2).

Katkılı çimentoların (CM10, CM20, CM30) özgül ağırlıkları, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %5,8, %9,9, %10,6 azalmıştır. Katkılı çimentoların özgül ağırlıklarındaki azalma marnın özgül ağırlığındaki azalmaya bağlıdır (bkz. Çizelge 4.2).

5.2 Kalsine Marnın Puzolanik Aktivitesi

Optimum kalsinasyon sıcaklığında (800⁰C) kalsine edilen marnın puzolonik aktivite değeri, yöntemle ilişkin bölümdeki açıklamalarda da belirtildiği gibi, mekanik deney yöntemi olan kireç-doğal puzolan karışımı numunelerin 7 günlük basınç dayanımları ile belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda kalsine marnın puzolanik aktivite değeri 8.10 MPa olarak tespit edilmiştir (Akgün, 2019).

5.3 Mini Slump (Çökme) Deneyi Bulguları

TS EN 12350-2'e uygun mikro beton karışım deney serilerinin karışım taze durumdayken mini slump deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mini slump deneyi sonucunda her bir karışımın çökme değerleri yaklaşık olarak 20-30 mm civarında tespit edilmiştir.

5.4 Özgül Ağırlık Bulguları

Çalışmada üretilen mikro betonların doygun kuru yüzeyli, kuru özgül ağırlıklarının sayısal değerleri Çizelge 5.2 de ve değişim grafikleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ' de verilmektedir.

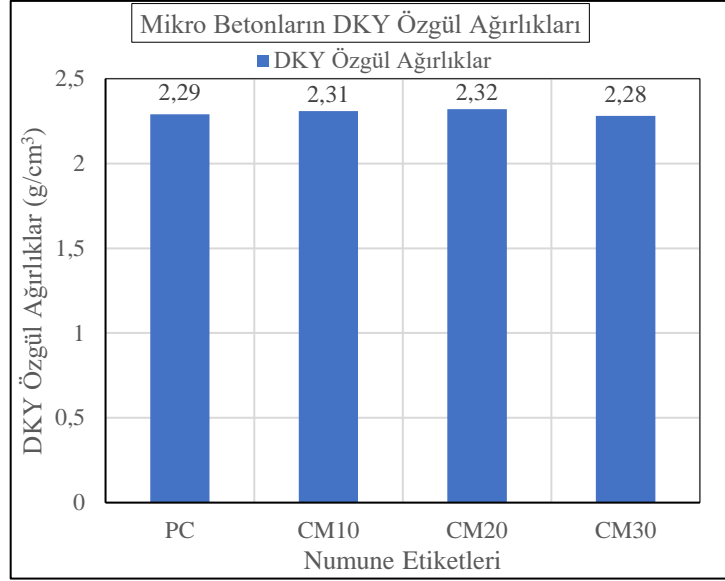
Çizelge 5.2 Mikro Betonların Dky, Kuru Özgül Ağırlıkları

Numune etiketleri	DKY Özgül Ağırlıklar (g/cm ³)	Kuru Özgül Ağırlıklar (g/cm ³)
PC	2.29	2.17
CM10	2.31	2.20
CM20	2.32	2.21
CM30	2.28	2.13

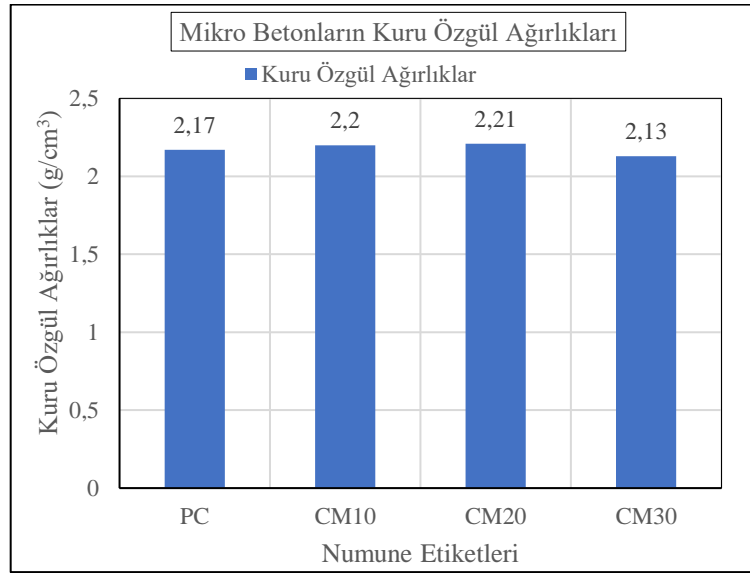
Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) DKY özgül ağırlıkları, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %0,9, %1,3 artmış, CM30 etiketli numune %0,4 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.2).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) kuru özgül ağırlıkları, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %1,4, %1,8 artmış, CM30 etiketli numune %1,9 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.2).

Yukarıda verilen DKY ve kuru özgül ağırlıklardaki değişimler, mikro betonları oluşturan bileşenlerin özgül ağırlıklarına bağlı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 5.1 Mikro Betonların Dky Özgöl Ağırlıkları Değişimleri



Şekil 5.2 Mikro Betonların Kuru Özgöl Ağırlıkları Değişimleri

5.5 Su Emme Bulguları

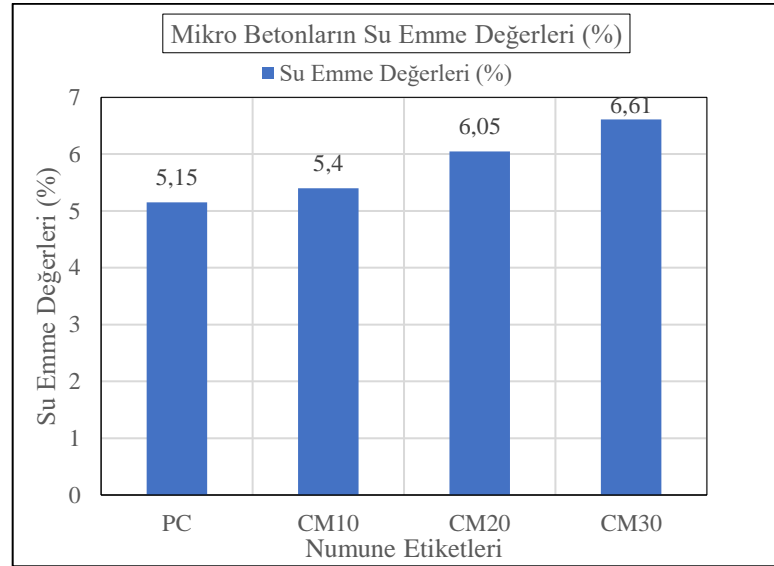
Çalışmada üretilen mikro betonların su emme oranlarının sayısal değerleri Çizelge 5.3 de ve değişim grafikleri Şekil 5.3' de verilmektedir.

Çizelge 5.3 Mikro Betonların Su Emme Değerleri

Numune etiketleri	Su emme değerleri (%)
PC	5.15
CM10	5.40
CM20	6.05
CM30	6.61

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) su emme değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %4,9, %17,5, %28,3 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.3).

Kalsine marn içeren katkıli çimentolarla üretilen mikro betonların yer değiştirme yüzdeleri artıkça birim hacim ağırlıkları azalmaktadır. Bu durum kalsine marnın birim hacim ağırlığının Portland çimentosununkine göre daha düşük olması ile ilişkilidir. Diğer taraftan, kalsine marn içeren katkıli çimentolarla üretilen mikro betonların yer değiştirme yüzdeleri artıkça su emme oranları da artmaktadır. Bu durum kalsine marnın inceliğinin Portland çimentosununkine göre daha yüksek olması ile ilişkilidir (bkz. Çizelge 5.1).



Şekil 5.3 Mikro Betonların Su Emme Yüzdelerinin Değişimleri

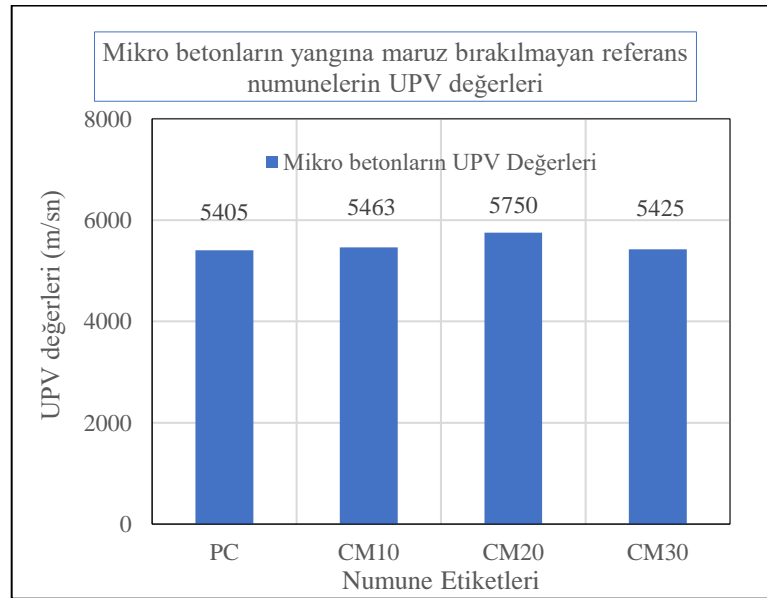
5.6 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Bulguları (yangın deneyleri öncesi)

Çalışmada üretilen mikro betonların yangına maruz bırakılmayan referans numunelerin UPV değerleri Çizelge 5.4 de ve değişim grafikleri Şekil 5.4' de verilmektedir.

Çizelge 5.4 Mikro Betonların Yangına Maruz Bırakılmayan Referans Numunelerin Upv Değerleri

Numune etiketleri	UPV değerleri (m/sn)
	0°C-300°C-600°C-800°C
PC	5405
CM10	5463
CM20	5750
CM30	5425

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangına maruz bırakılmayan referans numunelerin UPV değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %1,1, %6,4, %0,4 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.4). Ultrases geçiş hızındaki söz konusu değişimler kalsine marnın yer değiştirme oranlarına bağlı olarak meydana gelmiştir.



Şekil 5.4 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Öncesi Upv Değişimleri

5.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Bulguları (yangın deneyleri sonrası)

Çalışmada üretilen mikro betonların yangın deneyleri sonrası UPV değerleri havada ve suda soğutma koşullarına göre sırasıyla Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6' da, değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5.5 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değerleri (Havada Soğutma İçin)

Numune etiketleri	UPV değerleri (m/sn) (havada soğutma için)		
	300 ⁰ C	600 ⁰ C	800 ⁰ C
PC	5063	3370	2516
CM10	5405	4140	3410
CM20	5525	4255	3520
CM30	5467	3846	3101

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 ⁰C' de yangına maruz bırakılan ve havada soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland imentosununkine göre sırasıyla %6,8, %9,1, %8 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.5).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 ⁰C' de yangına maruz bırakılan ve havada soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland imentosununkine göre sırasıyla %22,8, %26,3, %14,1 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.5).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 ⁰C' de yangına maruz bırakılan ve havada soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland imentosununkine göre sırasıyla %35,5, %39,9, %23,3 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.5).

Çizelge 5.6 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değerleri (Suda Soğutma İçin)

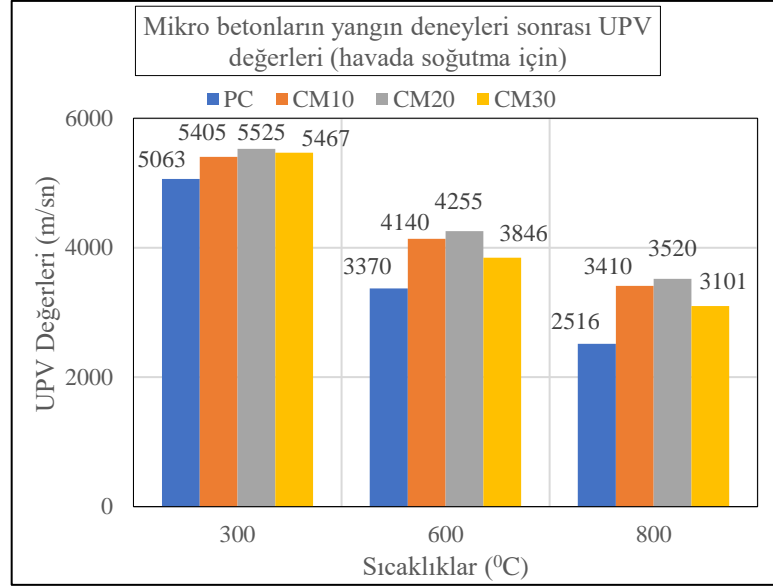
Numune etiketleri	UPV değerleri (m/sn) (suda soğutma için)		
	300 ⁰ C	600 ⁰ C	800 ⁰ C
PC	4820	2600	2439
CM10	5200	3226	2467
CM20	5405	3361	2516
CM30	5063	3205	2235

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %7,9, %12,1, %5 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.6).

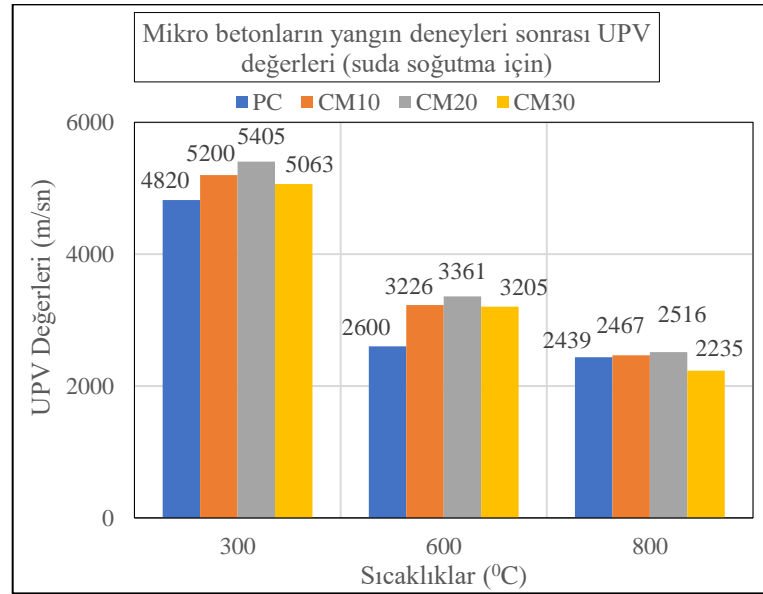
Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %24,1, %29,3, %23,3 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.6).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin UPV değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %1,1, %3,2, artmış CM30 %9,1 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.6).

Sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızındaki söz konusu bu değişimler, sıcaklık artışına bağlı olarak mikro betonların iç yapılarındaki hasarları arttırmış ve çimento hamur yapısı bozulmuştur. Dolayısıyla numuneler referans numunelere göre daha boşluklu hale dönüşmüşlerdir. Bilindiği gibi, boşlukta ses daha zor iletildiğinden ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır.



Şekil 5.5 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değişimleri (Havada Soğutma İçin)



Şekil 5.6 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası UPV Değişimleri (Suda Soğutma İçin)

5.8 Yangın Sonrası Ağırlık Kayıpları

Çalışmada üretilen mikro betonların yangın deneyleri sonrası ağırlık kayıpları havada ve suda soğutma koşullarına göre sırasıyla Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’ da, değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’da verilmektedir.

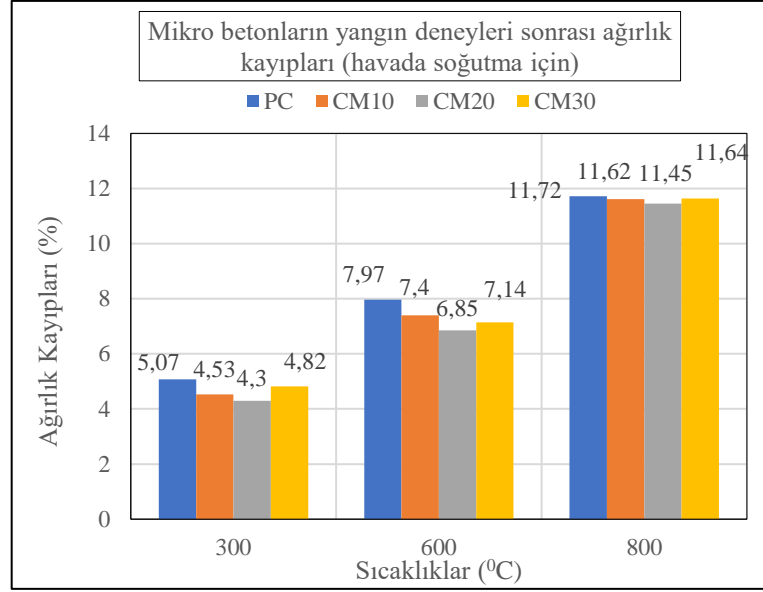
Çizelge 5.7 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Havada Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Ağırlık kayıpları (%)		
	300°C	600°C	800°C
PC	5.07	7.97	11.72
CM10	4.53	7.40	11.62
CM20	4.30	6.85	11.45
CM30	4.82	7.14	11.64

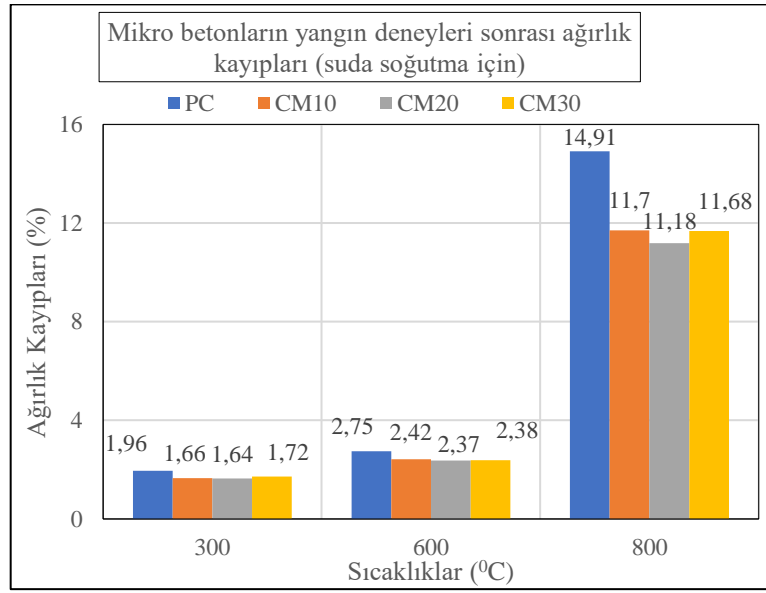
Çizelge 5.8 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Suda Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Ağırlık kayıpları (%)		
	300°C	600°C	800°C
PC	1.96	2.75	14.91
CM10	1.66	2.42	11.70
CM20	1.64	2.37	11.18
CM30	1.72	2.38	11.68

Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’ den görüldüğü gibi, mikro betonların kalsine marn yerdeğiştirme oranlarına bağlı olarak gelişen Portland çimentosuna göre dayanım artışları ağırlık kayıplarını azaltmıştır. CM30 numunelerindeki dayanımdaki düşüşe bağlı olarak ise ağırlık kaybı bir miktar artmıştır. Diğer taraftan sıcaklık artışlarına bağlı olarak ağırlık kayıpları artmıştır. Son olarak, aynı sıcaklık değerlerinde ağırlık kayıpları benzer değişimler göstermiştir.



Şekil 5.7 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Havada Soğutma İçin)



Şekil 5.8 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Ağırlık Kayıpları (Suda Soğutma İçin)

5.9 Eğilme - Basınç Dayanımları Bulguları

Çalışmada üretilen mikro betonların yangın deneyleri sonrası eğilme-basınç dayanımları havada ve suda soğutma koşullarına göre sırasıyla Çizelge 5.9-5.12' de, değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.9-5.12'de verilmektedir.

Çizelge 5.9 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Havada Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Eğilme dayanımları (MPa) (havada soğutma için)			
	0°C	300°C	600°C	800°C
PC	9.00	7.31	5.49	3.38
CM10	9.56	7.59	5.82	3.54
CM20	9.84	7.65	5.86	3.66
CM30	8.44	6.75	4.23	3.38

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneylerine maruz bırakılmayan numunelerin 0°C' de eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %6 , %9 artmış, CM30' da %7 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.9).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 °C' de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %4, %5 artmış CM30' da %8 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.9).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 °C' de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %6, %7 artmış CM30' da %30 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.9).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 °C' de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %5, %8, artmış, CM30'da değişmemiştir. (bkz. Çizelge 5.9).

Çizelge 5.10 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Suda Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Eğilme dayanımları (MPa) (suda soğutma için)			
	0 ⁰ C	300 ⁰ C	600 ⁰ C	800 ⁰ C
PC	9.00	4.78	4.02	2.10
CM10	9.56	5.06	4.38	2.83
CM20	9.84	5.32	4.65	3.37
CM30	8.44	4.50	4.24	2.89

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneylerine maruz bırakılmayan numunelerin 0⁰C’ de eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %6, %9 artmış, CM30’ da %7 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.10).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %6, %11 artmış CM30’ da %6 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.10).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %9, %16, %5 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.10).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin eğilme dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %35, %60, %38 artmıştır. (bkz. Çizelge 5.10).

Çizelge 5.11 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Havada Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Basınç dayanımları (MPa) (havada soğutma için)			
	0 ⁰ C	300 ⁰ C	600 ⁰ C	800 ⁰ C
PC	49.31	43.94	18.56	2.01
CM10	50.81	46.00	21.20	2.32
CM20	52.40	46.69	25.38	2.17
CM30	43.25	35.94	15.94	0

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneylerine maruz bırakılmayan numunelerin 0⁰C’ de basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %3, %6 artmış, CM30’ da %14 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.11).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %5, %6 artmış CM30’ da %22 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.11).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %14, %37 artmış CM30’ da %16 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.11).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 ⁰C’ de yangına maruz bırakılan havada soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %15, %8, artmış, CM30’da numune parçalanarak dayanım sıfırlanmıştır. (bkz. Çizelge 5.11).

Çizelge 5.12 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Suda Soğutma İçin)

Numune etiketleri	Basınç dayanımları (MPa) (suda soğutma için)			
	0 ⁰ C	300 ⁰ C	600 ⁰ C	800 ⁰ C
PC	49.31	29.25	12.51	1.27
CM10	50.81	29.56	12.81	1.38
CM20	52.40	30.56	15.25	0
CM30	43.25	28.50	10.50	0

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneylerine maruz bırakılmayan numunelerin 0°C’ de basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %3, %6 artmış, CM30’ da %14 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.12).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 300 °C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %1, %4 artmış CM30’ da %3 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.12).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 600 °C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %2, %22 artmış, CM30 %19 azalmıştır. (bkz. Çizelge 5.12).

Mikro betonların (CM10, CM20, CM30) yangın deneyleri sonrası 800 °C’ de yangına maruz bırakılan suda soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri, Portland çimentosununkine göre sırasıyla %9 artmış diğer numuneler parçalanarak dayanım sıfırlanmıştır. (bkz. Çizelge 5.12).

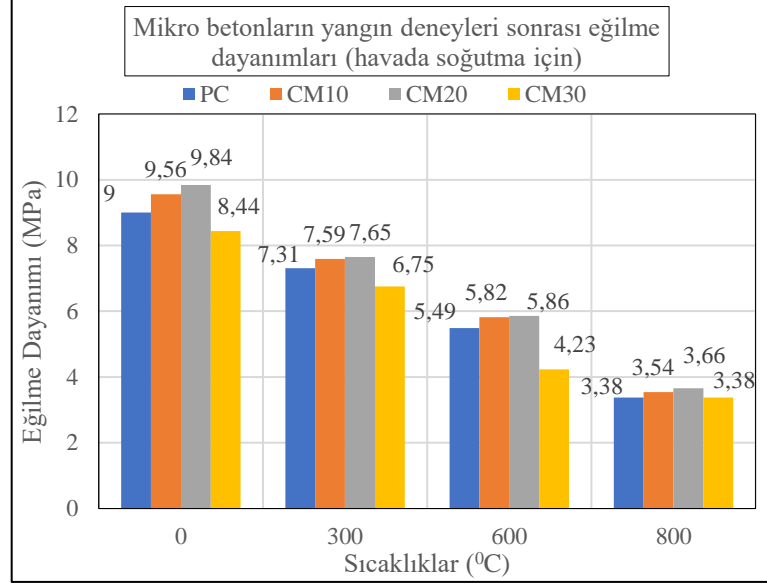
Mikro betonların eğilme ve basınç dayanımlarındaki değişimler, çalışmada kullanılan sıcaklık aralıklarındaki artışlara bağlı olarak azalmıştır.

Eğilme ve basınç dayanımı sonuç değerlerinin görüldüğü çizelgeler irdelendiğinde, mikro betonların yangın deneylerinde kullanılan sıcaklıklardaki artış ile numunelerin gözeneklilik değerlerinde de artışlar meydana geldiği literatür çalışmalarından bilinmektedir (Kaya ve ark., 2014; Demirel ve ark., 2008). Bu çalışmadaki mikro betonların gözeneklilik durumunda da artışlar olduğu varsayılarak eğilme ve basınç dayanımlarında kayıplar meydana geldiği düşünülmektedir.

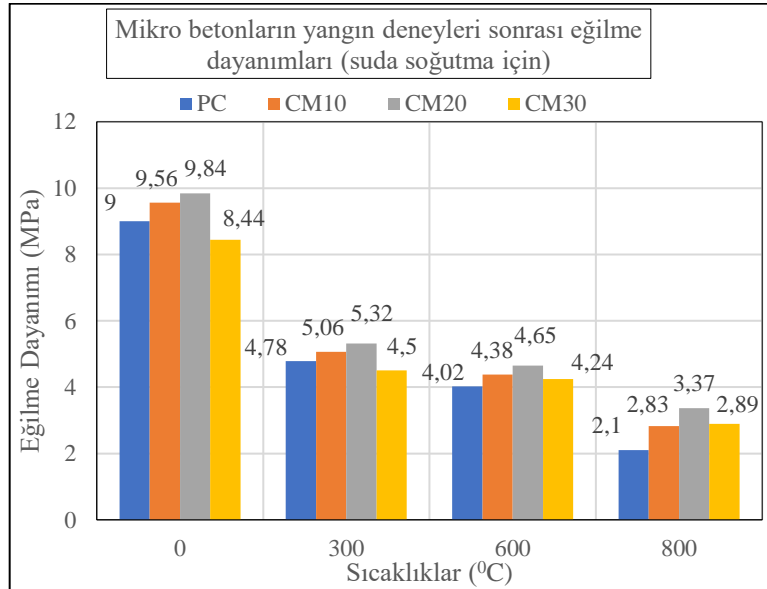
Aynı sıcaklıklar arasında karşılaştırmalar yapıldığında görülmektedir ki; kalsine marnın yer değiştirme oranlarındaki artışa bağlı olarak PC serilerine göre; CM10 ve CM20 serilerinde artış, CM30 serisinde ise bir miktar azalma belirlenmiştir.

Mikro betonlara uygulanan yangın deneylerinden sonra suda soğutmanın zararlı etkisi tüm deney serilerinde havada soğutmaya kıyasla daha fazla olduğu tespit

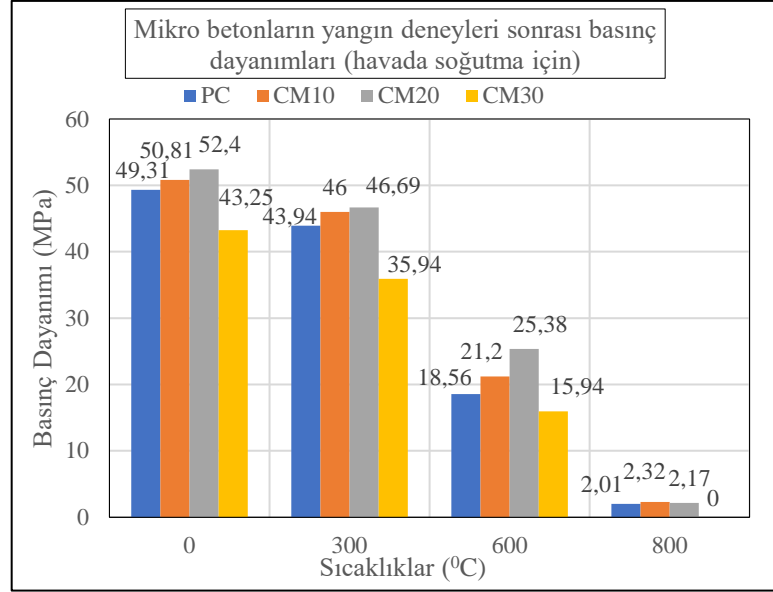
edilmiştir. Burada, yangın olaylarındaki diğer soğutma türlerinin etkisinin ayrıca incelenmesi gerekliliği vurgulanmalıdır.



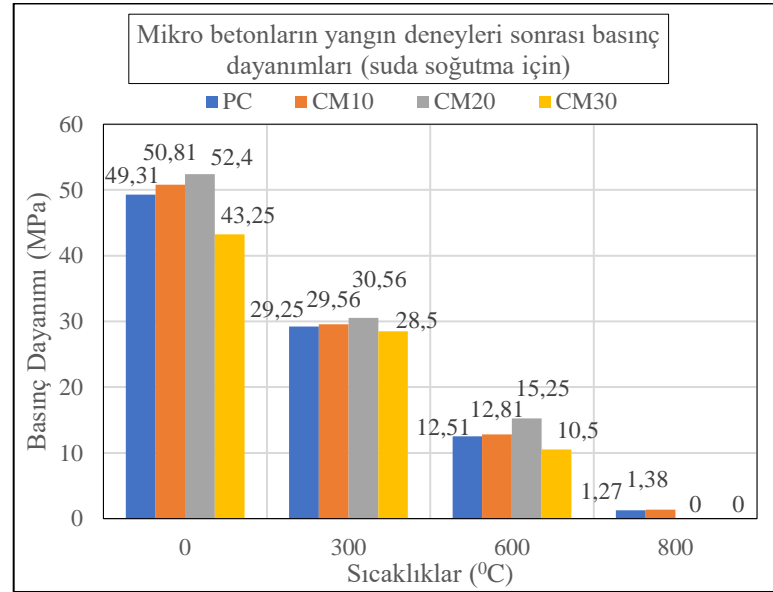
Şekil 5.9 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Havada Soğutma İçin)



Şekil 5.10 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Eğilme Dayanımları (Suda Soğutma İçin)



Şekil 5.11 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Havada Soğutma İçin)



Şekil 5.12 Mikro Betonların Yangın Deneyleri Sonrası Basınç Dayanımları (Suda Soğutma İçin)

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

1. Kalsine marn içeren katkılı çimentolarla üretilen mikro betonların puzolan yer değiştirme yüzdeleri artıkça kalsine marnın birim hacim ağırlığının Portland çimentosununkine göre daha düşük, inceliğinin ise daha yüksek olması nedeniyle mikro betonların birim hacim ağırlıkları azalmakta, su emme oranları ise artmaktadır.

2. Yüksek sıcaklık etkisi ile mikro beton numunelerdeki artan boşlukların dolayısı, ultrases geçiş hızları tüm deney serilerinde sıcaklık değeri yükseldikçe azalmıştır.

3. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı gelişen boşluklar eğilme ve basınç dayanımlarını da azaltmıştır.

4. Tüm sıcaklık değerlerinde en yüksek eğilme-basınç dayanım değerleri CM20 serilerinde belirlenmiştir.

5. Kalsine marn içeren katkılı çimentolarla üretilen mikro betonların eğilme-basınç dayanımlarındaki değişimler, sıcaklık değerlerinin artışı ile azalma eğilimi göstermişlerdir. Ultrases geçiş hızlarındaki değişimler, eğilme ve basınç dayanımlarının değişimleri ile benzer davranışlar göstermişlerdir.

6. Kalsine marn içeren katkılı çimentolarla üretilen mikro beton numunelerin kalsine marn yer değiştirme yüzdelerine bağlı olarak Portland çimentosu ile üretilenlerinkine göre iyileşen dayanım artışları katkılı mikro betonların ağırlık kayıplarını azaltmıştır. Buna karşılık, CM30 deney serisindeki numunelerin dayanımlarındaki azalmaya bağlı olarak ağırlık kayıpları bir miktar artmıştır. Diğer taraftan, sıcaklık değerlerindeki artışa bağlı olarak mikro beton numunelerde ağırlık kayıpları artmıştır. Son olarak, aynı sıcaklık değerlerinde ağırlık kayıpları benzer sayısal büyüklüklerde değişimler göstermiştir.

7. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra suda soğutma işleminin zararlı etkisi, tüm deney serilerinde havada soğutma işlemine göre daha fazla olmuştur. Diğer soğutma işlemlerinin numuneler üzerindeki etkisi ayrıca incelenmelidir.

8. Yüksek sıcaklık etkisinden bağımsız olarak, yangın deneylerine maruz bırakılmayan 28 günlük kalsine marn katkılı mikro betonların eğilme-basınç

dayanımları, kalsine marn katkısının yer değiştirme miktarındaki artış ile, 28 günlük referans (PC) numunelerinkine göre sırasıyla %9.33 ve %6.26 artmıştır. Katkılı mikro betonların dayanımlarındaki bu artışlar doğal marnın optimum sıcaklıkta kalsine edilmiş olması, mineralojik yapısı ile yüksek silika-alümina içeriği, inceliği ve bunlara bağlı olarak kalsine marnın puzolanik aktivitesinin etkisidir (Akgün, 2019; 2020; 2021). Kalsine marn katkılı numunelerin kürlenme sürelerinin artmasıyla kalsine marnın puzolanik aktivitesi ile gelişen ilave bağlayıcılar sayesinde onların geç yaş dayanımlarında da artışlar olacağı beklentisi daha önceki literatür çalışmalarından (Danner ve ark., 2018) ngrlmektedir. Buna göre, bu çalışmada kullanılan numunelerin geç yaş yangın dayanımlarının geliştiğinin gösterilmesi bir sonraki çalışma konusudur.

9. Burada yukarıda belirlenen sonuçların çalışmada kullanılan doğal marn ve bu deneysel çalışma şartlarında geçerli olduğunu belirtmekte fayda vardır.

Özetle, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlardan grldği gibi, optimum sıcaklıkta kalsine edilen marn %20 yer değiştirme miktarına kadar kullanılması ile betonun yangın dayanımını iyileştirmektedir. Diğer taraftan bu tez çalışmasındaki parametreler dikkate alınarak tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, kalsine marnın, yangın dayanımı iyileştirme amaçlı kullanılan piyasada mevcut olan puzolan özellikli diğer mineral katkılara alternatif olabilecek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Akgün Y. (2019). Alternatif puzolan kalsine marn içeren sürdürülebilir katkılı çimentolar. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10, (2), 779-789.
- Akgün Y. (2020). Behavior of concrete containing alternative pozzolan calcined marl blended cement. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64, (4), 1087-1099
- Akgün Y. (2021). Thermal performance of mortars/concretes containing calcined marl as alternative pozzolan. *Emerging Materials Research*, 10, (3), 246-256.
- Aruntas, HY. ve Tokyay, M. (1996). Katkılı çimento üretiminde diatomitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, çimento ve beton dünyası, Ankara, 1(4):33-41.
- ASTM C 311. (2005). Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 597. (1998). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, USA.
- Ataman, R. (1991). Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Chan, YN., Peng, GF. & Anson, M. (1999). Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 21, p: 23-27.
- Chan, SYN., Luo, X. & Sun, W. (2000). Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 14, p: 261- 266.
- Danner, T., Norden, G. & Justnes, H. (2018). Characterisation of calcined raw clays suitable as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science* 162(15): 391–402.
- Demirel, B & Gönen, T. (2008). Yüksek sıcaklığın karbon lif takviyeli hafif betonda basınç dayanımı ve poroziteye etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C.14 (2): 223-228.
- Esen, Y. & Kurt, A. (2018). Effect of high temperature in concrete for different mineral additives and rates. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (22), p: 1288-1294.
- Gustaferrero, AH., Abrams, MS. & Litvin, A. (1971). Fire resistance of lightweight insulating concrete. *Lightweight Concrete, ACI Publication SP29*, p: 161-180.
- Hüsem, M. (2006). The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*, (41) 2, p: 155-163.
- Karaca, Z., Durmuş, A. & Hüsem, M. (1997). "Hafif Betonun Yangın Dayanımının İncelenmesi." İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 3. Teknik Kongre, Ankara.
- Kaya, T., Karakurt, C. & Dumangöz, M. (2014). Mineral katkılı kendiliğinden yerleşen betonların porozite ve basınç dayanımlarına yüksek sıcaklığın etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (1): 39-44.

- KienBui, N., Satomi, T. & Takahashi, H. (2018). Effect of mineral admixtures on properties of recycled aggregate concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*, (184), p: 361-373.
- Kiran, T., Mathews, ME., Alengaram, UJ. & Andrushia, A. D. (2021). Influence of mineral admixtures on the residual mechanical properties and durability characteristics of self-compacting concrete subjected to high temperature. *Australian Journal of Civil Engineering*, p: 1-17.
- Kristensen, L. & Hansen, TC. (1994). Cracks in concrete core due to fire on thermal heating shock. *ACI Materials Journal*, 91 (5), p: 453-459.
- Lawson, JR., Phan, LT. & Davis, F. (2000). Mechanical properties of highperformance concrete after exposure to elevated temperatures, *Department of Commerce Technology Administration*. NIST, USA.
- Leckebush, R. (1984). Türkiye'deki doğal puzolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı, Çimento Araştırma ve Gelistirme Merkezi, Ankara, 1-10.
- Lin, WM., Lin, TD. & Powers-Couche, LJ. (1996). Microstructures of fire damaged concrete. *ACI Materials Journal*, 93 (3), p: 199-205.
- Mehta, PK. (1986). *Concrete Structure Properties and Materials*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 35-94.
- Memon, SA., Shah, SFA., Khushnood, RA. & Baloch, WL. (2019). Durability of sustainable. *Concrete subjected to elevated temperature—a review*, (199), p: 435–455.
- Phan, LT. & Carino, NJ. (1998). Review of mechanical properties of HSC at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.10, p: 58-64.
- Rostasy, F.S., Weiss, R. and Wiedemann, G. (1980). Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. *Cement & Concrete Research*, 10, p: 157-164.
- Saad, M., El-Enein, A., Hanna, GB. & Kotkata, MF. (1996). Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 26, p: 669-675.
- Semenov, V. & Bazanov, S. (2020). Methods of increasing the resistance of concrete to catastrophic failure in a fire. *Materials Science and Engineering*, (869) 3, p: 032053.
- TS 25. (2008). Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-1. (2009). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12350-2. (2010). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12390-5. (2019). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini.

- Usta, M. (2019). Kalsine Marn Katkili Çimentoya Uygun Kimyasal Katkilarin Belirlenmesi. Yüksek Lisans, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu.
- Zoldners, NG. & Wilson, HS. (1973). Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete, Behavior of concrete under temperature extremes. *ACI Publication*, (39) 9, p: 149-178.
- Qin, H., Yang, J., Yan, K., Doh, JH., Wang, K. & Zhang, X. (2021). Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high-performance concrete under fire conditions. *Construction and Building Materials*, (303), p: 124464.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mahmut Esat AYYILDIZ
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Atatürk Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	10.07.2014