

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TİP HARÇLARLA KAPLAMA YAPILMIŞ BETONLARDA
YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Şamil GÜRKAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

MAYIS 2021

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TİP HARÇLARLA KAPLAMA YAPILMIŞ BETONLARDA
YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammed Şamil GÜRKAN
(36183621004)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

MAYIS 2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e,

Bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan başta Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih KANTARCI ve Sayın Arş. Grv. Enes EKİNCİ olmak üzere İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Çalışmalarında yardımcı olan laboratuvar sorumlusu Sayın İlhami Baysal'a,

Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Mersin) firması tarafından kalsiyum alüminatlı çimento temininde yardımlarını gördüğüm Sayın Ayten Çaputçu'ya,

Tezin uygulama aşamasında FYL-2020-2073 proje numarası ile vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine,

Çalışmalarımın en başından en sonuna kadar yardımlarını esirgemeyen başta canım ablam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hacer GÜRKAN, arkadaşım Sayın Buse ÖZGEL ve arkadaşım Sayın Arş. Grv. Zehva YALÇINÖZ'e,

Maddi ve manevi her konuda bana destek olarak her zaman yanımda olan sevgili aileme en içten duygularıyla

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Farklı Tip Harçlarla Kaplama Yapılmış Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Muhammed Şamil Gürkan



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1 Yangın Etkisi	4
2.2 Yangın Gelişim Aşamaları	4
2.3 Standart Yangın Davranış Modeli	5
2.4 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi	6
2.5 Yapılarda Sıva Harçları ve Etkileri.....	15
2.5.1 Çimento	18
2.5.2 Kireç	22
2.5.3 Kalsiyum alüminatlı çimento	25
2.5.4 Geopolimer	33
2.5.4.1 Yüksek fırın cürufu.....	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM	46
3.1 Materyal.....	46
3.1.1 Bağlayıcı malzemeler	46
3.1.1.1 CEM çimentosu	47
3.1.1.2 Söndürülmüş toz kalker kireç	47
3.1.1.3 Kalsiyum alüminatlı çimento	47
3.1.1.4 Yüksek fırın cürufu.....	47
3.1.2 Aktivatörler.....	47
3.1.3 Agregas	48
3.1.4 Aletler	48
3.1.4.1 Elek.....	48
3.1.4.2 Ahşap aparat	49
3.1.4.3 Kalıplar	51
3.1.4.4 Mikser.....	51
3.1.4.5 Etüv.....	52
3.1.4.6 Yüksek sıcaklık fırını	53
3.1.4.7 Basınç dayanım cihazı	53
3.1.4.8 Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçüm cihazı.....	54
3.1.4.9 Beton kesimi	55
3.2 Yöntem	55
3.2.1 Agregas deneylerinde uygulanan yöntemler.....	55
3.2.2 Üretilen numunelerin karışım oranlarının belirlenmesi	56
3.2.2.1 Kontrol beton numunelerinin karışım oranları	56
3.2.2.2 Sıva harçlarının karışım oranları	57
3.2.3 Kontrol beton ve sıva harçlarının üretimi ve kür edilmesi	57
3.2.4 Taze beton deneyi.....	58
3.2.4.1 Çökme deneyi.....	58
3.2.5 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler	59
3.2.5.1 Basınç dayanımı tayini	59

3.2.5.2 Su emme oranı tayini.....	60
3.2.5.3 Ultrases geçiş hızının (UPV) belirlenmesi	61
3.2.5.4 Ağırlık kaybı oranı tayini	62
3.2.5.5 Birim hacim ağırlık (BHA) tayini	62
3.2.5.6 Yangın dayanımı deneyi.....	62
3.2.5.7 SEM analizi	63
3.2.5.8 XRD analizi.....	64
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	65
4.1 Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	65
4.2 Taze Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	65
4.2.1 Sıva harçlarının çökme değerleri.....	65
4.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	66
4.3.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı	67
4.3.2 Kontrol numunelerinin UPV değerleri.....	69
4.3.3 Kontrol numunelerinin su emme oranları	70
4.3.4 Kontrol numunelerinin ağırlık kaybı oranları	72
4.3.5 Kontrol numunelerinin BHA değerleri	73
4.3.6 Sıva harç numunelerinin basınç dayanımı	74
4.3.7 Sıva harç numunelerinin UPV değerleri	78
4.3.8 Sıva harç numunelerinin basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişkisi	81
4.3.9 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası su emme oranları.....	83
4.3.10 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı oranları.....	84
4.3.11 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası BHA değerleri.....	87
4.3.12 Sıvası kesilen iç betonların basınç dayanımı.....	88
4.3.13 Sıvası kesilen iç betonların UPV değerleri	92
4.3.14 Sıvası kesilen iç betonların su emme oranları.....	93
4.3.15 Sıvası kesilen iç betonların ağırlık kaybı oranları.....	94
4.3.16 Sıvası kesilen iç betonların BHA değerleri	95
4.3.17 Numunelerde görsel incelemeler.....	97
4.3.17.1 Sıvalı numunelerin üretim aşamalarının görsel incelenmesi.....	97
4.3.17.2 Sıvalı numunelerde farklı sıcaklıklardaki görsel incelemeler	100
4.3.17.3 Beton numunelerde farklı sıcaklıklardaki görsel incelemeler.....	103
4.4 Mikroyapı Analizi	104
4.4.1 SEM analizi	104
4.4.2 XRD analizi.....	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	129

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Sönmüş ve sönmemiş kirecin özellikleri.	24
Çizelge 2.2 : KAÇ'ın sınıflarına göre kimyasal bileşim aralıkları.....	27
Çizelge 2.3 : Ana fazların KAÇ için bileşim aralığı.	28
Çizelge 2.4 : Kalsiyum alüminat hidratlar için yoğunluk ve bağlı su yüzdeleri.	31
Çizelge 3.1 : Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri.	46
Çizelge 3.2 : Aktivatör özellikleri.....	47
Çizelge 3.3 : Kontrol beton numunelerinin karışım oranları	56
Çizelge 3.4 : Sıva harçlarının karışım oranları.....	57
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri..	65
Çizelge 4.2 : Sıva harcı karışım gruplarında çökme değerleri.	66
Çizelge 4.3 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.	67
Çizelge 4.4 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.....	69
Çizelge 4.5 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük su emme oranları.	70
Çizelge 4.6 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranı.	72
Çizelge 4.7 : Kontrol grubunun 28 günlük BHA değerleri.....	73
Çizelge 4.8 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	75
Çizelge 4.9 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.	79
Çizelge 4.10 : Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki.	82
Çizelge 4.11 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük su emme oranları.	83
Çizelge 4.12 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranları.	85
Çizelge 4.13 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük BHA değerleri.	87
Çizelge 4.14 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin basınç dayanımları.	89
Çizelge 4.15 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük UPV değerleri.	92
Çizelge 4.16 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük su emme oranları.	93
Çizelge 4.17 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük ağırlık kaybı oranları.	94
Çizelge 4.18 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük BHA değerleri.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Sıcaklık-zaman eğrisinde yangın gelişim aşamaları.....	4
Şekil 2.2 : Standart sıcaklık-zaman eğrisi.....	5
Şekil 2.3 : Yangın ve deneysel sıcaklık artışı zaman ilişkisi.....	6
Şekil 2.4 : Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri.....	10
Şekil 2.5 : Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi.....	12
Şekil 2.6 : Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi.....	13
Şekil 2.7 : Betonun sıcaklık ile renk değişimi ilişkisi.....	15
Şekil 2.8 : Kireç döngüsü.....	23
Şekil 2.9 : KAÇ üretimi için üst yüklemeli fırın.....	25
Şekil 2.10 : PÇ, KAÇ ve cürufkların bileşim aralığı.....	27
Şekil 2.11 : KAÇ reaksiyonlarının hacimsel ilişki şeması.....	30
Şekil 2.12 : Yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimerlerin faz dönüşümü.....	35
Şekil 2.13 : Geopolimerizasyon için kavramsal modelleme.....	37
Şekil 2.14 : YFC üretim şeması.....	42
Şekil 3.1 : Çalışmada kullanılan agregalar.....	48
Şekil 3.2 : Ahşap aparat ve ölçüleri.....	49
Şekil 3.3 : Kontrol betonun kalıplarda ortalanma aşamaları.....	50
Şekil 3.4 : Kontrol betonun ahşap aparatlar ile ortalanması.....	50
Şekil 3.5 : Çalışmada kullanılan kalıplar.....	51
Şekil 3.6 : Çalışmada kullanılan mikser.....	52
Şekil 3.7 : Etüv.....	52
Şekil 3.8 : Yüksek sıcaklık fırını.....	53
Şekil 3.9 : Basınç dayanım cihazı.....	54
Şekil 3.10 : UPV cihazı.....	54
Şekil 3.11 : Sıvalı numunenin kesimi.....	55
Şekil 3.12 : Çökme deneyi aletleri.....	59
Şekil 3.13 : Yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilen sıvalı numuneler.....	63
Şekil 3.14 : SEM cihazı.....	63
Şekil 3.15 : XRD cihazı.....	64
Şekil 4.1 : Sıva harcı karışım gruplarında çökme değerleri.....	66
Şekil 4.2 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	67
Şekil 4.3 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.....	69
Şekil 4.4 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük su emme oranları.....	71
Şekil 4.5 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranı.....	72
Şekil 4.6 : Kontrol grubunun 28 günlük BHA değerleri.....	74
Şekil 4.7 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	76
Şekil 4.8 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.....	80
Şekil 4.9 : Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki.....	82
Şekil 4.10 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük su emme oranları.....	84
Şekil 4.11 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranları.....	86
Şekil 4.12 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük BHA değerleri.....	88
Şekil 4.13 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	90
Şekil 4.14 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin 28 günlük UPV değerleri.....	92
Şekil 4.15 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin 28 günlük su emme oranları.....	93
Şekil 4.16 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin 28 günlük ağırlık kaybı oranları.....	95
Şekil 4.17 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin 28 günlük BHA değerleri.....	96
Şekil 4.18 : Ahşap aparatın oluşturduğu boşlukların doldurulma aşamaları.....	97
Şekil 4.19 : Plastik kalıptaki sıvalı numuneler.....	98

Şekil 4.20 : Plastik kalıptan çıkarılan sıvalı numuneler.....	98
Şekil 4.21 : Ahşap aparatları ayrılan sıvalı numuneler.	99
Şekil 4.22 : Boşlukların doldurulması için çelik kalıplara yerleştirilen numuneler.....	99
Şekil 4.23 : Boşlukları sıva harçları ile doldurulan numuneler.....	100
Şekil 4.24 : Sıvalı numunelerin farklı sıcaklıklar etkisi altındaki görünüşleri.	101
Şekil 4.25 : 700 °C sıcaklığa maruz kalan K-PK grubu sıvalı numune.....	103
Şekil 4.26 : Kontrol beton numunelerin farklı sıcaklıklardaki görünüşleri.....	103
Şekil 4.27 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin farklı sıcaklıklardaki görünüşleri.	104
Şekil 4.28 : Lab ortamında bekletilmiş kontrol beton numuneleri.....	104
Şekil 4.29 : 700 °C sıcaklık sonrası kontrol beton numuneleri.....	105
Şekil 4.30 : 700 °C sıcaklık sonrası PK grubu iç beton numuneler.	105
Şekil 4.31 : 700 °C sıcaklık sonrası K-PK grubu iç beton numuneler.....	105
Şekil 4.32 : 700 °C sıcaklık sonrası KA grubu iç beton numuneler.	106
Şekil 4.33 : 700 °C sıcaklık sonrası G-Na grubu iç beton numuneler.	106
Şekil 4.34 : 700 °C sıcaklık sonrası G-K grubu iç beton numuneler.	106
Şekil 4.35 : Lab ortamında bekletilmiş kontrol beton numuneleri.....	108
Şekil 4.36 : 700 °C sıcaklık sonrası kontrol beton numuneleri.....	108
Şekil 4.37 : 700 °C sıcaklık sonrası PK grubu iç beton numuneler.	109
Şekil 4.38 : 700 °C sıcaklık sonrası K-PK grubu iç beton numuneler.....	109
Şekil 4.39 : 700 °C sıcaklık sonrası KA grubu iç beton numuneler.	110
Şekil 4.40 : 700 °C sıcaklık sonrası G-Na grubu iç beton numuneler.	110
Şekil 4.41 : 700 °C sıcaklık sonrası G-K grubu iç beton numuneler.	111

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BHA	: Birim hacim ağırlık
CaCO₃	: Kireç taşı
CaO	: Kalsiyum oksit
CH	: Kalsiyum hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
G-K	: KOH ile aktive edilen yüksek fırın cürufu ile üretilen numune grubu
G-Na	: NaOH ile aktive edilen yüksek fırın cürufu ile üretilen numune grubu
KA	: Kalsiyum alüminatlı çimento ile üretilen numune grubu
KAÇ	: Kalsiyum alüminatlı çimento
KOH	: Potasyum hidroksit
K-PK	: Kireç ve Portland kompoze çimento ile üretilen numune grubu
MgCO₃	: Magnezyum karbonat
NaOH	: Sodyum hidroksit
PÇ	: Portland çimentosu
PK	: Portland kompoze çimento ile üretilen numune grubu
PKÇ	: Portland kompoze çimento
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiO₂	: Silisyum oksit
SKK	: Söndürülmüş kalker kireç
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu kül
UPV	: Ultrases geçiş hızı
V	: Ses dalga hızı
XRD	: X ışınımı kırınımı
YFC	: Yüksek fırın cürufu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TİP HARÇLARLA KAPLAMA YAPILMIŞ BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ

MUHAMMED ŞAMİL GÜRKAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

129+X sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Teknolojinin gelişmesi, sanayileşmenin artması ve nüfusun çoğalması fazla enerji kullanımına neden olmaktadır ve bu durumun sonucu olarak da yangın riskini beraberinde getirmektedir. Yangın etkisi beton dayanımı açısından çok önemli bir etkiye sahip olduğundan her yapı için yüksek sıcaklık etkisi göz önünde bulundurulması gereken parametrelerdendir. Betonda önemli bir parametre olan yüksek sıcaklık etkisi betonlarda çatlamalara, renk değişimlerine ve parçalanmalara neden olabilmektedir. Bu etkiler sonucunda beton dayanımında önemli kayıplar görülebilmektedir. Yapı malzemelerinin yangın karşısındaki davranışlarının bilinmesi, malzemeler için korunma tedbirlerinin alınmasında önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada, sıva yapılmamış kontrol beton numuneleri ve kontrol beton numunelerin kaplama yapılması için 5 grup bağlayıcı malzeme (Portland Kompoze Çimento, Kireç-Portland Kompoze Çimento, Kalsiyum Alüminatlı Çimento, NaOH ve KOH alkali aktivatörü ile aktive edilmiş Yüksek Fırın Cürufu) kullanılarak sıva harçları üretilmiştir. Üretilen numuneler, üç farklı kür süresinde (7, 14 ve 28 gün) yüksek sıcaklık etkisine (100, 300, 500 ve 700 °C) maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan sıvalı betonların yangından sonra sıvaları kesilerek iç beton numuneler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda numunelere basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV), su emme oranı, ağırlık kaybı oranı, birim hacim ağırlık (BHA) deneyleri ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklığa maruz bırakılan sıva ile kaplanmış olan numunelerin basınç dayanımı, sıva ile kaplama yapılmamış kontrol beton numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Sıvası kesilen numunelerde basınç dayanımı bakımından en iyi dayanım gösteren Portland Kompoze Çimento kullanılarak üretilen numuneler olurken, ağırlık kaybı oranı bakımından en iyi sonuç Kalsiyum Alüminatlı Çimento kullanılarak üretilen numuneler olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık etkisi, sıva harçları, geopolimer, kalsiyum alüminatlı çimento

ABSTRACT

Master Thesis

HIGH TEMPERATURE EFFECT ON CONCRETE COATED WITH DIFFERENT TYPE OF MORTARS

MUHAMMED ŞAMİL GÜRKAN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

129+X sayfa

2021

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

The development of technology, the increase in industrialization and growth in the population cause excessive energy use and as a result of this, it brings the risk of fire. Since the fire effect has a very important effect in terms of concrete strength, high temperature effect is one of the parameters to be considered for every structure. The effect of high temperature, which is an important parameter in concrete, can cause cracks, color changes and fragmentation in concrete. As a result of these effects, significant losses in concrete strength can be observed. Knowing the behavior of building materials against fire has an important place in taking protection measures for materials.

In this study, unplastered control concrete samples and plaster mortars by using 5 groups of binder materials (Portland Composite Cement, Lime-Portland Composite Cement, Calcium Aluminate Cement, Blast Furnace Slag activated with NaOH and KOH alkali activator) for coating control concrete samples were produced. Produced samples were exposed to high temperature (100, 300, 500 and 700 °C) at three different curing times (7, 14 and 28 days). Interior concrete samples were obtained by cutting the plaster of the plastered concretes exposed to high temperatures after the fire. As a result of the study, compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), water absorption rate, weight loss rate, unit volume weight (UVW) tests and microstructure analyzes were performed on the samples. According to the results obtained, the compressive strength of the samples coated with plaster exposed to high temperature was higher than the control concrete samples that were not coated with plaster. In plaster cut samples while the samples produced using Portland Composite Cement showed the best strength in terms of compressive strength, the samples produced using Calcium Aluminate Cement had the best result in terms of weight loss rate.

Keywords: High temperature effect, plaster mortars, geopolymer, calcium aluminate cement

1. GİRİŞ

Yapı elemanları için önemli özelliklerden birisi, yüksek sıcaklıklara karşı göstermiş oldukları dirençtir. Bu özellik fabrika, termik santraller, yüksek sıcaklığa maruz kalan bacalar gibi sadece özel amaçlı yapılarda irdelenmektedir. Gelişen teknoloji ve sanayileşmenin artması, nüfusun giderek çoğalması ve fazla enerji kullanımı yangın riskini beraberinde getirmekte ve buna bağlı olarak yangının maddi ve manevi zararlarında artışa neden olmaktadır. Yangının meydana gelmesi sonucu oluşan yüksek sıcaklık etkisi beton dayanımı için en önemli faktörlerden biri olduğundan, her yapı için yüksek sıcaklık durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle yangın sonucu yüksek sıcaklığın oluşturduğu hasarlara ülkemizde de çok sık rastlanmaktadır (Uysal, 2004; Bingöl ve Gül, 2009; Kızılkant ve Yüzer, 2008). Yapılarda kullanılan yapı malzemelerinin, yangın karşısındaki davranışlarının bilinmesi, alınması gereken önlemlerin belirlenmesinde son derece önemlidir (Binici ve diğ., 2013). Etkili bir çevresel faktör olan yangın, yüksek sıcaklık etkisiyle betonda çatlamalara, renk değişimlerine ve parçalanmalara neden olmakta, bu etkilerden dolayı da basınç dayanımı ve elastisite modülünde azalmalar görülmektedir (Subaşı ve diğ., 2011; Yüzer ve diğ., 2007). Beton içindeki bileşenlerin, genellikle termal genleşmeleri birbirinden farklıdır. Betondaki sıcaklık değişimleri, betonun bileşenlerindeki farklı termal genleşmelerden kaynaklı farklı hacim değişimlerine sebep olur. Ayrıca betonun yavaş termal iletkenliğe sahip olması, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış betonda, içerisinde tutulan ısının dış ortamdan farklı sıcaklığa sahip olmasından dolayı beton içerisindeki suyun su buharına dönüşümlerini meydana getirir. Dolayısıyla bu nedenler beton yüzeylerinde çatlak oluşumuna ve beton dayanımının azalmasına yol açar (Binici ve diğ., 2013; Kaya ve Yazıcıoğlu, 2015). Basınç dayanımındaki azalma miktarı; kullanılan malzemelerin özelliklerine, ulaşılan en yüksek sıcaklığa, etki eden sıcaklığın süresine ve soğutma şekilleri gibi değişkenlere göre farklılık gösterir. Ancak 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda basınç dayanımında belirgin kayıplar olduğu teknik literatürdeki ağırlıklı görüştür (Uysal, 2004; Bingöl ve Gül, 2009).

İnşaat sektöründeki işlevini gün geçtikçe arttıran harç ve sıvalar, her alanda önemli kullanım alanlarına sahiptirler. Gelişen koşullara bağlı olarak günümüz inşaat

uygulamalarının kalite ve dayanıklılığı da artmaktadır (Babadağ, 2009). Sıvalar, taşıyıcı eleman ve duvar yüzeylerini kaplayarak yüzeylerin uygun düzgünlüğün sağlanması, betonarme taşıyıcı elemanların çevresel etkenlere karşı korunması ve ısı yalıtımı gibi hususlarda yapılara avantaj sağlamaktadır (Kaptan, 2020). Sıva, uygulandıkları yapı elemanlarının yüzeylerini örtmeleri ve düzgün göstermelerinin yanı sıra, çevresel faktörden kaynaklı yapıdaki yüzeyleri dış etkenlere (yangın, soğuk, sıcak, yağmur vb.) karşı korumak, dayanıklılığını arttırmak için yapılan kaplama işlemine denir (Oktay ve diğ., 2017; Qassab, 2019).

Portland çimentosunun imalatı, enerjisi yoğun bir süreçtir ve bir yılda üretilen sera gazının yaklaşık %7'sini oluşturarak atmosfere büyük miktarda sera gazı salmaktadır (Chindaprasirt ve diğ., 2007). Çimentonun kısmi ikamesi olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve metakolin gibi geopolimer malzemelerin kullanımı CO₂ salınımını en aza indirmek için yapılan çalışmalar arasındadır (Ranjbar ve diğ., 2014). Geopolimerlerde karışım aşamasında işlenebilirlik için kullanılan su, geopolimerin kür ve kurumaması sırasında geopolimerler içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimerlere yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır (Rangan, 2008).

Bu çalışmada, beton yapıların maruz kalabileceği yüksek sıcaklık etkilerine karşı beton yapıların dayanımını koruyabilecek veya daha az dayanım kaybı meydana getirebilecek yöntem olarak sıva uygulaması incelenmiştir. Öncelikle 100x100x100 mm boyutlarında standart beton numuneler üretilmiştir. Üretilen bu betonlar, 28 gün havada kür süresinin sonunda 150x150x150 mm boyutlarındaki kalıpların her bir yüzeyine eşit mesafede olacak şekilde ahşap aparatlar ile ortalananmıştır. Kalıplara ortalanan beton yüzeyleri ile kalıp yüzeyleri arasında kalan 2.5 cm'lik boşluk, sıva kalınlığını oluşturmuştur. Kalıplara ortalanan betonu kaplayacak sıva harçları, 5 grup bağlayıcı malzeme (Portland Kompoze Çimentosu, Kireç-Portland Kompoze Çimentosu, Kalsiyum Alüminatlı Çimento, NaOH alkali aktivatörü ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer ve KOH alkali aktivatörü ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer) kullanılarak hazırlanmıştır. Sıva uygulanmamış 100x100x100 mm boyutundaki standart beton numuneler kontrol grubu olarak seçilmiştir. Kontrol beton numuneler ve sıvalı beton numuneler üç farklı kür süresinin (7, 14 ve 28 gün) sonunda 1 saat boyunca yüksek sıcaklıklara (100, 300, 500, 700 °C) maruz bırakılmıştır. Daha sonra sıva ile kaplanmış beton numunelerin sıvalı kısımları kesilerek iç betonlara ulaşılmıştır. Elde edilen iç beton

numunelerine ve kontrol beton numunelerine çeşitli deneyler yapılmıştır. Ayrıca belirtilen 5 grup bağlayıcı malzeme kullanılarak 50x50x50 mm ve 100x100x100 mm boyutlarındaki kalıplar ile sıva harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen sıva harç numuneleri üç farklı kür süresinin sonunda (7, 14 ve 28 gün) yüksek sıcaklıklara (100, 300, 500 ve 700 °C) maruz bırakıldıktan sonra çeşitli deneyler yapılmıştır. Üretilen numunelere basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV), su emme oranı, ağırlık kaybı oranı ve birim hacim ağırlık (BHA) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca çalışmada, mikroyapı analizleri olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınımı kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Yapılan deney ve analizlerde, farklı tip karışımlardan oluşan sıva harçlarının hem betonu koruma etkisi hem de yüksek sıcaklığın numunelerde meydana getirdiği görsel ve mikroyapı değişiklikleri ele alınarak incelenmiştir.



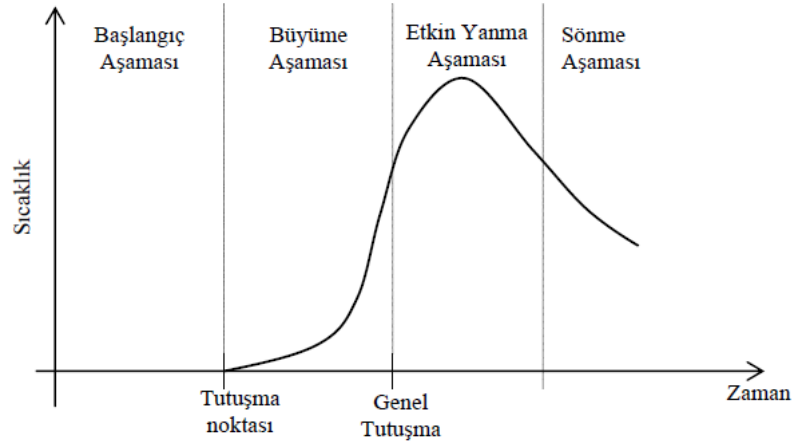
2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Yangın Etkisi

Yangın can ve mal kaybına yol açabilen bir felakettir. Katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması ile yüksek sıcaklığa sebep olan bir olaydır. Bu olay yanıcı maddenin oksijen ile ısı altında belirli oranlarda birleşmesi sonucu gerçekleşen kimyasal bir reaksiyondur. Yangının oluşabilmesi için oksijen, yanıcı madde ve bir ısı kaynağının bir arada bulunması gerekmektedir. Yanma olayı, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyona girme hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır. Yanıcı maddedeki karbonun yanması sonucunda karbondioksit (CO₂) oluşmakta ve oksijenin yetersiz görüldüğü durumda zehirleyici karbon monoksit gazı da (CO) oluşmaktadır. Yanma işlemi sırasında çıkan enerji genellikle sıcak gazlar şeklinde olsada çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır (Burnaz, 2010; Uçarkoşar, 2013; Akyürek, 2019; Hossein Eskandani, 2020).

2.2 Yangın Gelişim Aşamaları

Şekil 2.1’de yangın söndürme işleminin olmadığı tipik bir oda içerisinde yangın gelişim sürecindeki aşamaların sıcaklık-zaman eğrisi gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi yangın gelişme aşamaları başlangıç, büyüme, etkin yanma ve sönme aşamalarından oluşmak üzere toplam dört aşamadan oluşmaktadır (Buchanan ve Abu, 2017; Burnaz, 2010).



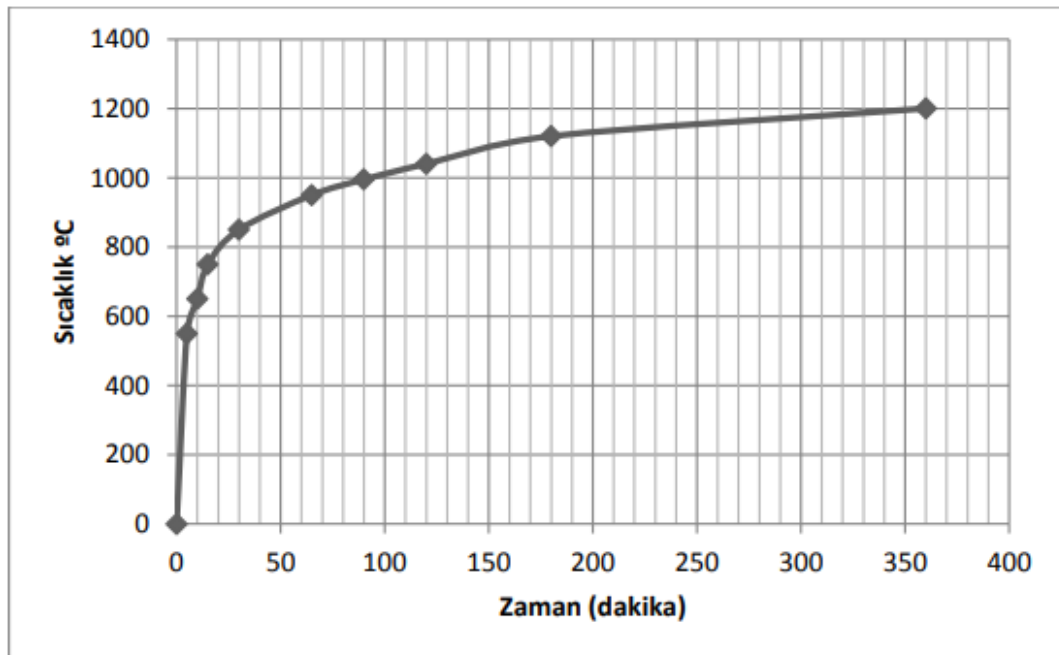
Şekil 2.1 : Sıcaklık-zaman eğrisinde yangın gelişim aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017).

2.3 Standart Yangın Davranış Modeli

Yangın başarımı genellikle, bir yapı ya da yapı elemanlarının herhangi bir yangına karşı dayanım ve dayanıklılığı şeklinde ifade edilmektedir. Yapılan deney ve çalışmalarda yangın başarımalarının belirlenmesi için birebir ölçekli ya da ölçekli numuneler üzerinde yangın deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde sıklıkla ISO-834 gibi sıcaklık-zaman eğrileri kullanılmaktadır (Burnaz ve Durmuş, 2004; Erdem, 2010; Kayacı, 2014). Bu eğri 2.1 bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS EN 13501-2, 2009).

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

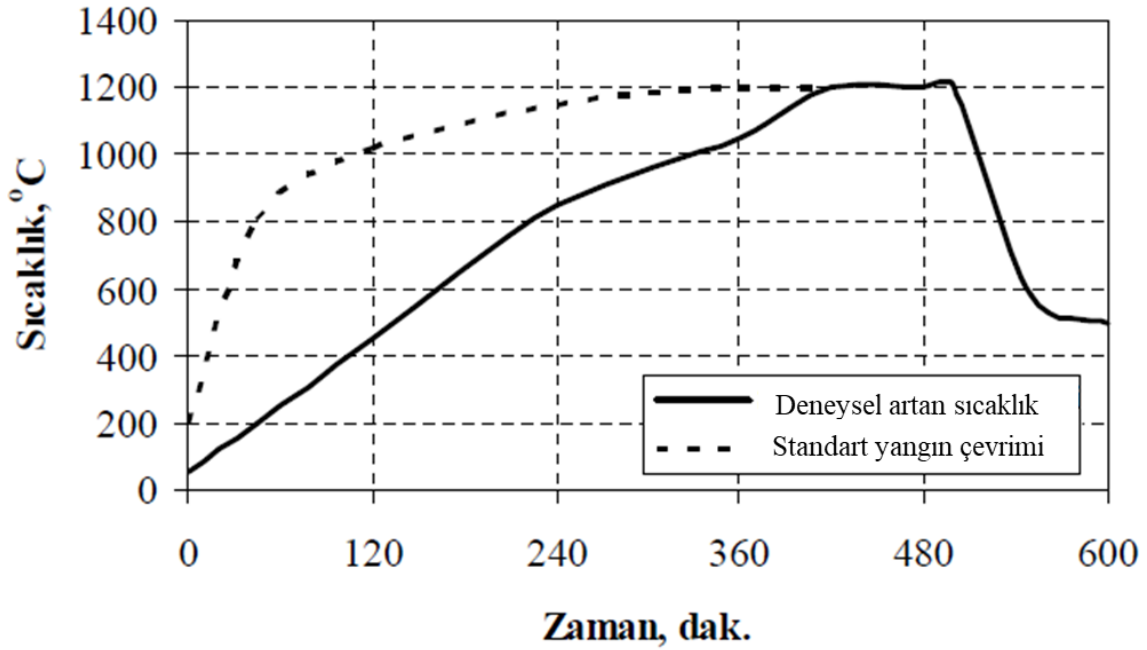
Denklemden; t yangın süresi (dakika), T_0 başlangıç sıcaklığı (20 °C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (TS EN 13501-2, 2009). Şekil 2.2’de standart sıcaklık-zaman eğrisi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.2 : Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS EN 13501-2, 2009).

Yapı elemanlarında yangın etkisini benzetmek oldukça güçtür. Bu durumun nedeni yapı elemanlarının yangın sırasında karmaşık, yüksek ve geçici sıcaklık etkisinde kaldıklarından yangınların şiddetini ve davranışının tahmin edilmesinin oldukça güç olmasıdır. Yapılan

çalışmalara göre deneysel çalışmaların artan sıcaklık koşullarında yapıldığı görülmektedir. Bu koşullar standart yangın koşullarından farklı olmasına rağmen bu araştırmalar betonda yangın etkisinin önemli bir ölçüde anlaşılmasını sağlayabilmiştir. Bu sebeple betonda yangın etkisinden daha çok betonda yüksek sıcaklık çalışmaları yapılmış ve bu yapılan çalışmaların sonuçları yorumlanmıştır (Demir, 2008). Şekil 2.3'te yangın ve deneysel sıcaklık artışı zaman ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.3 : Yangın ve deneysel sıcaklık artışı zaman ilişkisi (Peng ve diğ, 2006).

2.4 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi

Dünyanın her tarafında beton veya betonarme yapılar bazen yangına maruz kalabilmekte ve bunun sonucunda yapıda kısmi zararlar oluşabilmekte veya tamamen kullanılmaz hale gelebilmektedir (Sağsöz, 2013). Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının etkisinde kalmış beton veya betonarme yapılar hakkında 20. yüzyılın başından itibaren, özellikle de 1960'lardan sonra birçok çalışma yapılmıştır (Burnaz, 2010). Bu nedenle betonarme yapılarda ana taşıyıcının beton olduğunu düşünürsek, betonun yangın davranışı göz önünde bulundurulması gereken önemli konulardan biridir (Kayacı, 2014). Yüksek sıcaklıklara karşı dirençli ve yanmaz bir malzeme olan beton, yangın etkisinde ilk etapta önemli bir zarar görmez ve zehirli gaz veya duman çıkarmaz. Fakat bu dayanıklılık belirli

sıcaklık değerlerinde ve sınırlı bir süre zarfında geçerlidir (Topçu ve Demir, 2005; Gülce, 2009). Yüksek sıcaklık etkisi altında kalan betonun mekanik ve kimyasal özelliklerinde ciddi değişimler olduğu gözlenmiştir (Özdemir, 2019). İlk ısıtma sırasında betonun dayanımını etkilemede birçok faktör bir araya gelir, öyle ki 150 °C'deki basınç dayanım ölçüleri normal koşullardaki dayanım değerinin %30'u kadar düşük, %120'si kadar yüksek sonuçlar verebilir. Bu nedenle, betonun yüksek sıcaklıklarda tipik dayanım davranışını, belirli karışım ve çevre koşulları belirtilmedikçe ortalama bir eğriyle temsil etmek yanıltıcı olabilir (Khoury, 1992). Betonun yüksek sıcaklıklardaki dayanımını etkileyen faktörleri, çevresel faktörler (ulaşılacak en yüksek sıcaklık, bu sıcaklığa ulaşma hızı, bu sıcaklığın etki ettiği süre, soğutma hızı, soğutma şekilleri ve yükleme koşulları) ve malzeme faktörleri (agrega türü ve özellikleri, çimento tipi ve özellikleri, agrega-çimento hamuru arasındaki aderansı ve kullanılan mineral katkıların özellikleri) olarak iki ana grupta toplamak mümkündür (Sarshar ve Khoury, 1993; Demir, 2008).

Yangın etkisi altında kalan betonun kalitesinde düşüşler meydana gelir. Çimento hamurunun yapısı bozulur ve taşıma kapasitesinde azalmalar olur. Betonda meydana gelen bu bozulmalar yangın tipine, sıcaklık artış hızına ve yangının etki ettiği süreye bağlıdır (Bodnarova ve diğ, 2013).

Günümüzde yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı betonlara göre mukavemet ve dayanıklılık özellikleri bakımından sunduğu avantajlardan dolayı yüksek dayanımlı betonlar; modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda üretilmeye başlanmıştır. Yüksek dayanımlı betonlar normal dayanımlı betonlara kıyasla iç yapıdaki geçirimsizlik özelliğinin daha iyi olmasından dolayı yüksek sıcaklık etkisi altında daha fazla hasara uğrar. Bu geçirimsizlik özelliğinden kaynaklı yapı içerisindeki suyun buharlaşıp uzaklaşmasını engellediği için hidrostatik basınç etkisiyle betonun patlayıp parçalanmalarına neden olur (Aydın ve diğ, 2008; Noumowe ve diğ, 2009; Subaşı ve diğ, 2011).

Yüksek dayanımlı betonların yangın performansı yangının karakterine, beton karışım özelliklerine ve yapısal tasarım özelliklerine bağlıdır. Yüksek dayanımlı betonların yangına dayanım süresini yangının yoğunluğu, yangının boyutu, yangının ne kadar ısı açığa çıkardığı ve ısınma hızı belirler. Yüksek dayanımlı betonların yangın dayanımını belirleyen malzeme özellikleri ise beton dayanımı, beton nem içeriği, beton yoğunluğu, lif kullanımı ve agrega tipidir (Kodur ve Phan, 2007).

Beton gözenekli bir yapıdadır ve bu gözenekler hem sıvı hem de buhar halindeki su ile doludur. Bu nedenle beton bir yapıda yangın sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar, sadece onun mekanik ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini etkilemekle kalmaz aynı zamanda betondaki nem kaybını da etkiler. Yüksek sıcaklık sonucu betondaki sıvı haldeki su buharlaşır. Eğer betondaki buharlaşma oranı betondaki buhar kaybindan fazla ise betonda patlayarak parça atmalar oluşabilir, bu durum yapının çökmesine neden olabilir. Bu sebeple betonda nem muhtevasının önemli bir etkisi vardır (Kızıllıkanat ve diğ., 2013).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betona su ile söndürme uygulanırsa soğutma sırasında betonda termal şok meydana gelmektedir. Bu nedenle ani sıcaklık değişimine uğrayan betonda, termal gerilmeler ve çatlakların oluşumu sonucunda dayanımda azalmalar meydana gelmektedir. 400 °C'yi aşan sıcaklıklarda su ile ani bir soğutma sonrasında çözülen Ca(OH)_2 'nin ortamdaki nem ile tekrar hidrate olmasıyla hacminde %44'lük bir artış meydana gelir. Bu durum da beton numunelerinin parçalanmasına yol açabilmektedir (Sarshar ve Khoury, 1993; Topçu ve Demir, 2005).

Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında betonda oluşan çatlaklar, genleşme ve büzülme kaynaklı olabilir. Hızlı ısınmanın bir sonucu olarak farklı genleşmeler ve büzülme, beton içerisindeki çimento hamuru ve agregaların farklı termal özelliklerinden kaynaklanabilmektedir. Çimento hamuru ısıtmanın ardından hafif bir ilk genleşmeden sonra, sürekli ısıtma ile daha yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde büzülürken, agregaların tümü ise sürekli olarak genleşmektedir (DeJong, 2005).

Çimento hamuru ilk ısıtma sırasında fiziksel ve kimyasal dönüşümlere maruz kaldığından dolayı betonun kararsız bir bileşendir. 100-200 °C'ye kadar olan daha düşük sıcaklık aralıklarında beton, buharlaşmalardan kaynaklı yapısında su kaybına uğrar. Isıl etkiler yaklaşık 600 °C'nin üzerinde önemli bir hale gelir ve erimeye yol açar (Khoury, 1992).

Prizini tamamlamış çimento hamuru 150 °C sıcaklık etkisinde yaklaşık %0.2 oranında genleşir (Cruz ve Gillen, 1980). Sıcaklığın 150 °C'den 300 °C'ye yükselmesiyle çimento hamurunun büzülmeye başladığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık 800 °C'ye çıkarıldığında ise bu sıcaklığa maruz bırakılan prizini tamamlamış çimento hamurunun hacimce büzülmesi %2.2'ye çıkabileceği tespit edilmiştir. Genel olarak 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, hidrasyon ürünlerinin dehidrasyonu sonucu çimento hamurunun büzülmesine neden olurken, agregalar genellikle genişip parçalanmışlardır. Bu nedenle yüksek sıcaklık etkisi altında termal gerilmeler ve çatlaklar gelişir (Hossain, 2006).

Yüksek sıcaklıklar, çimento hamurunun fiziksel ve kimyasal bileşimini değiştirerek beton mukavemetinde ve sertliğinde kayıplar meydana getirir. Bu kayıplarda serbest suyun yer değiştirmesi ve buharlaşması, bağlanmış ve emilmiş suyun kaybedilmesi, 400 ile 500 °C’lerde kalsiyum hidroksitin ayrışması ve soğuduktan sonra kirecin rehidratasyonu sonucu genişmesi, 575 °C’de kumların çoğunluğunu oluşturan kuvarzın α -kuvarzdan β -kuvarza geçişi (yaklaşık %5.7’lik bir hacim artışı), 400-600 °C’de CSH yapıların bozulması gibi etkenler rol oynar (Felicetti ve Gambarova, 1998; Peng ve diğ, 2006; Demir, 2008; Kızıllkanat, 2010).

Yaklaşık 500 °C’de kuvarz içerikli agreganın içindeki düşük kuvarz, yüksek sıcaklığın etkisiyle yaklaşık %1 hacim artışı ile beraber dönüşüm fazına girer. Bu etki kum, granit ve bazı şist gibi büyük miktarda kuvarz içeren agregalarda büyük genişmelere yol açar. Çimento hamurundaki bozulmalar yaklaşık 550 °C’de başlar. Hacimdeki artış agreganın genişmesine, patlamasına ve kabarıp dökülmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda agregada oluşan genişmeler, agrega parçacıklarını çevreleyen hamur içinde çatlakları tetikler (Demir, 2008).

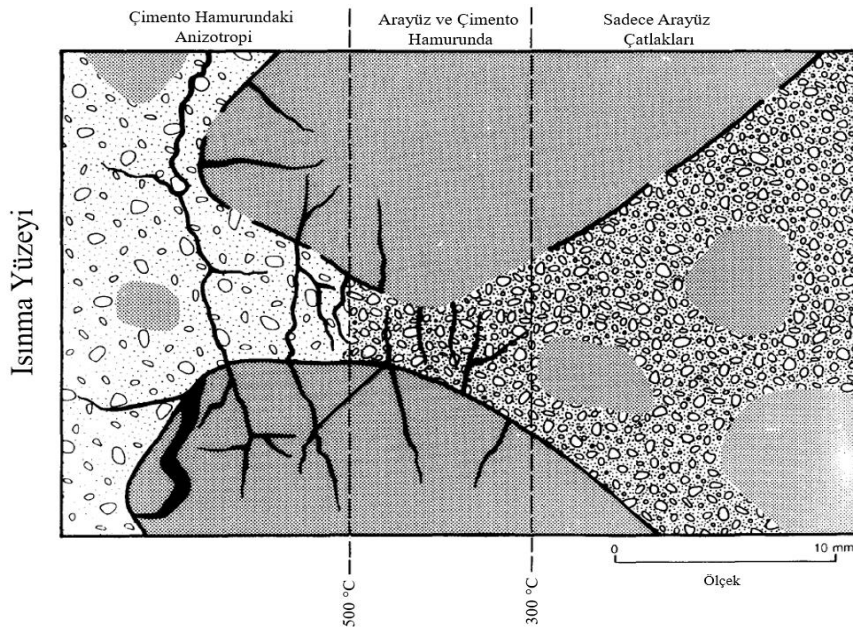
Betonun ısıl genişleme katsayısı, 200 °C’ye kadar düşüktür; ancak bununla birlikte yaklaşık 600 °C’de, kullanılan agregada bulunan kuvars (yaklaşık 573 °C’de kuvarsın alfa-beta dönüşümü) nedeniyle hızla artar. Genişleme katsayısı en düşük seviyede olan doğal taş kalkerdir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir yapıda ısıl genişleme farklılıkları çimento hamuru ile agrega arayüzünde çatlamalara neden olmaktadır. Oda sıcaklığı ile 200 °C aralığında nemli beton küre ile betonun ısıl genişleme katsayısı, kuruma büzülmesi ile genişmeyi azalttığından havada küreleme ile elde edilen katsayıların yaklaşık %70-85’ini oluşturur (Yamazaki ve diğ, 1995; Mahsanlar, 2006).

Beton yapısında agregalar %60-80 arası hacme sahiptirler. Agregada özelliklerinde bulunan farklılıklar yüksek sıcaklığa maruz bırakılma esnasında betonun performansını önemli derecede etkiler (Kızıllkanat, 2010). Araştırmalara göre ısıl iletkenlik bakımından, agrega türünün temel unsur olduğu görülmektedir. Genel anlamda ısıl iletkenliklerine göre bazalt düşük iletkenliğe, dolomit ve kalker orta seviyede iletkenliğe ve kuvarz ise en yüksek iletkenliğe sahiptir (Neville, 1995). Boşluk oranı ve boşluk yapısı su içeriği ile birlikte ısıl iletkenlik katsayısına etki eden önemli unsurlardandır. Havaya göre suyun ısı iletim özelliği daha fazladır. Bu nedenle kuru durumdaki bir yapıda gözeneklerin fazla olması ısıl iletkenlik katsayısının düşmesine neden olur. Betonun yüksek sıcaklık etkisinde

gözeneklerindeki suyu kaybettiği, çimentonun dehidrasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüştüğü ve ısıl iletkenlik katsayısının azaldığı bilinmektedir (Mahsanlar, 2006).

Yüksek sıcaklığa yol açan nedenlerden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı yapı tarafından emilir. Emilen ısı nedeniyle yapının sıcaklığı yükselir. Bu olayda ısı yayılım katsayısı etkili olur. Isı yayılım katsayısı, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma durumu özellikle de 100 °C civarında yapı bünyesindeki serbest suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir (Demir, 2008; Mahsanlar, 2006).

Riley (1991) bir çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıya maruz bırakmış ve sıcaklıkları beş adet termokupl yardımı ile ölçerek izotermi çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermelere benzer değişimler gösterdiğini saptamıştır. Oluşan çatlamlar agrega taneleri, çimento hamuru ve ikisi arasındaki arayüzde belirgin olarak gözlemlenmiştir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi çatlak kısım test edilen bütün numunelerde yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyden 25-30 mm içeriye girmiştir. 300 °C'nin altında sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel arayüz çatlakları, 300-500 °C arasında arayüz ve çimento hamurunda çatlaklar, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklarda ise çimento hamurunda ve agrega tanelerinde ciddi büyük boyutlu çatlaklar meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda bu şekilde anizotropik özellik gözleniyorsa betonun maruz kaldığı sıcaklığın 500 °C'yi aştığı sonucuna varılabilir.



Şekil 2.4 : Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991).

Malhotra (1956), sıcaklığın betonun mukavemetine etkisi üzerinde yaptığı çalışmada normal Portland çimentosundan yapılan 2 inç çapında ve 4 inç yüksekliğinde numuneler kullanarak testler yapmıştır. Ezilme mukavemetindeki kayıpların ana faktörleri çatlakların oluşumu ve Ca(OH)_2 dehidrasyonu olduğu belirtilmiştir. Agregâ/çimento oranının yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun dayanımı üzerine önemli bir etkisi vardır. Dayanım kaybı, agregâ yönünden zayıf karışımlarda zengin karışımlara göre daha azdır.

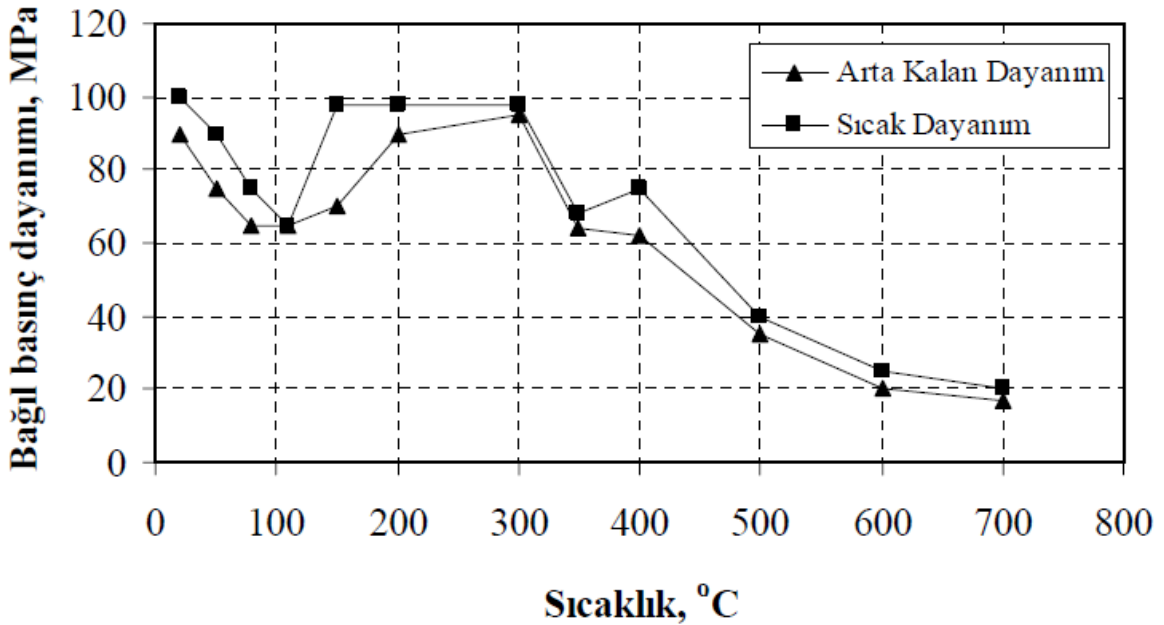
Crook ve Murray (1970), betonun yüksek sıcaklıkta dayanım kaybını çimento hamurunun dehidrasyonuna ve oluşan kılcal boşluklardan kaynaklandığı açıklamaktadır. Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan hemen sonra mekanik mukavemetinin yeniden kazanılmasındaki ana faktörün, meydana gelen karbonatlaşma olayından kaynaklandığını belirtmiştir.

Çimento hamurunda bulunan su tabakalarının, 50 °C ile 120 °C sıcaklıkları arasında genleşmelerinden dolayı bağlarının zayıflamasının mukavemette azalmaya yol açtığı düşünülmektedir. Daha sonrasında mikro çatlakların belirginleşmeye başladığı 300 °C'ye kadar dayanımda artışın olması termal kurumanın pozitif etkisiyle gerçekleşmektedir. Sıcaklığın 300 °C'yi geçmesiyle yapıdaki porozitede görülen artış mekanik özelliklerin kötüleşmesinde önemli bir unsurdur. Sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında, C-S-H ara katmanında bulunan su ile C-S-H ve sülfoalüminat hidratlarından kaynaklanan kimyasal bağ suyunun bir kısmının da kaybolması mikro çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Meydana gelen mikro çatlaklar yaklaşık 300 °C'de ilk önce Ca(OH)_2 'nin toplandığı kısımlarda sonrada yaklaşık 400 °C'de henüz hidrate olmamış tanelerin bulunduğu kısımlarda oluşmaktadır. Artan sıcaklıkla dayanımda kayıplar artmaya devam edecek ve 350 °C ile 400 °C arasındaki sıcaklıklarda Ca(OH)_2 dehidrasyon yoluyla CaO 'e dönüşecektir. Kalsiyum hidroksitin ayrışmasından dolayı çimento hamurunun daha fazla dehidrasyonu yaklaşık 500 °C'de başlar. Fakat C-S-H'nin tamamen ayrışması için ise 900 °C civarında sıcaklıklar gereklidir (Piasta ve diğ., 1984; Newman ve Choo, 2003; Industry, 2008; Mehta ve Monteiro, 2014; Topal, 2020).

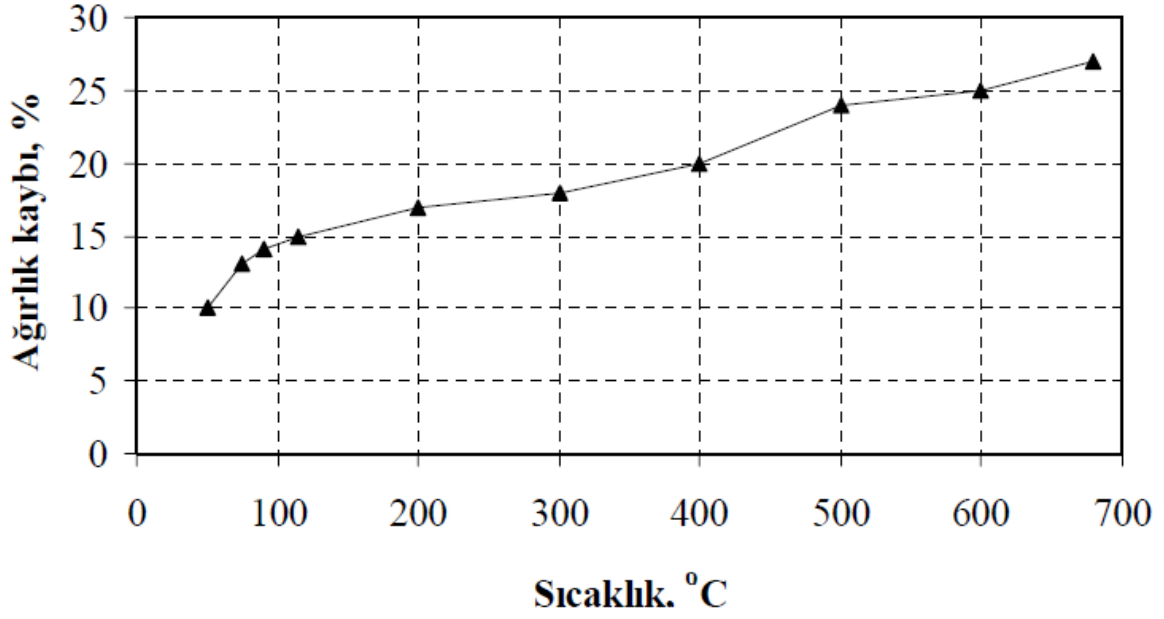
Morsy ve diğ. (1998) yaptıkları bir çalışmada, çeşitli çimento hamurlarının basınç dayanımı ile ısı işlem sıcaklığı arasındaki ilişkisini göstermektedirler. Sıcaklığın 200 °C'ye ulaşması sonucunda artan sıcaklıkla birlikte basınç dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir. 22-200 °C sıcaklık aralığındaki ilk basınç dayanımındaki azalmanın sebebi, hamur içerisindeki su katmanlarının şişmesi sonucu aderansın zayıflamasına bağlanabilir. Sıcaklığın artması ile birlikte basınç dayanımındaki artışın sebebi, otoklav denilen buhar etkisinin sonucu olarak hidrate olmamış çimento tanelerinin ek

hidratasyonundan kaynaklanıyor olabilir. Bu nedenle kalsiyum silikat hidrat fazlarının oluşumu ile yoğun mikroyapının gelişmesi yüksek mekanik performansa etki etmektedir (Morsy ve diğ, 1998; Hiremath ve Yaragal, 2017).

Yaklaşık 120 °C’de çimento hamurunun sıcak ve bağıl dayanımları için küçük değere sahip olduğu Şekil 2.5’te görülmektedir. 50-120 °C sıcaklık aralığında dayanımın küçük seviyelerde olmasının sebebi bünyesinde bulundurduğu suyun buharlaşma eğilimi ile hamurun şişerek aderans kaybına neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumdan sonra 300 °C’ye kadar ise dayanımın arttığı görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi sertleşmiş çimento hamurunda ağırlık kaybında artış gözlemlenmiştir (Demir, 2008). Ayrıca beton davranışı ile bağlantılı olan elastisite modülü ise sıcaklıktan oldukça etkilenir. Sıcaklık derecelerinin artması ile elastisite modülü değerlerinde kademeli olarak düşüş olduğu belirtilmiştir. 21 °C ile 100 °C arasında elastisite modülünde yaklaşık %10 değerinde bir azalma olur. Sıcaklığın 120 °C’yi aştığı durumlarda elastisite modülü değerleri, artan sıcaklıkla birlikte giderek azalmaktadır. 800 °C sıcaklıktaki elastisite modülündeki azalma, suyun betondan uzaklaşp boşluk ve gözeneklerinin artması ile %90’lara ulaşmaktadır (Yamazaki ve diğ, 1995; Demir, 2008).



Şekil 2.5 : Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi (Demir, 2008).



Şekil 2.6 : Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi (Demir, 2008).

Beton bünyesindeki boşluklarda bulunan suyun, yüksek sıcaklıkta buharlaşması sonucu betonun ağırlığı azalır ve genişleme nedeniyle hacmi artar. Yüksek sıcaklık sonucunda meydana gelen ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler betonun birim hacim ağırlığının azalmasına neden olur. Bu azalmalar göz ardı edilebilir düzeydedir (Mahsanlar, 2006). Beton 70 °C’de ilk kütlelerinin %99’a kadarını korumaktadır. 70 ile 120 °C arasında beton bünyesindeki suyu kaybetmeye başlar ve kütledeki kayıplar sadece %1.4 civarındadır. 120 ile 300 °C arasında en yüksek kütle kaybı %7 civarındadır. 300 ile 600 °C arasında kütle kaybının kısmi olarak daha az önemi vardır (Demir, 2008).

Özbey (2009) yaptığı çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan betonda meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerindeki etkileri araştırmıştır. Meydana gelen etkileri araştırmak için üretmiş olduğu numuneleri 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, 3 saat süreyle 150, 300, 450 ve 600 °C olmak üzere dört farklı sıcaklık derecesine tabii tutmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler havada ve suda soğuyacak şekilde iki farklı grupta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, hacimce su emme, yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri yapılan deneylerle hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre havada soğutma şeklinde soğutulan numunelerde dayanımın kaybının daha az olduğu ve özellikle

de 600 °C'de betonların dayanımında fazla miktarda kayıplar meydana geldiği görülmüştür.

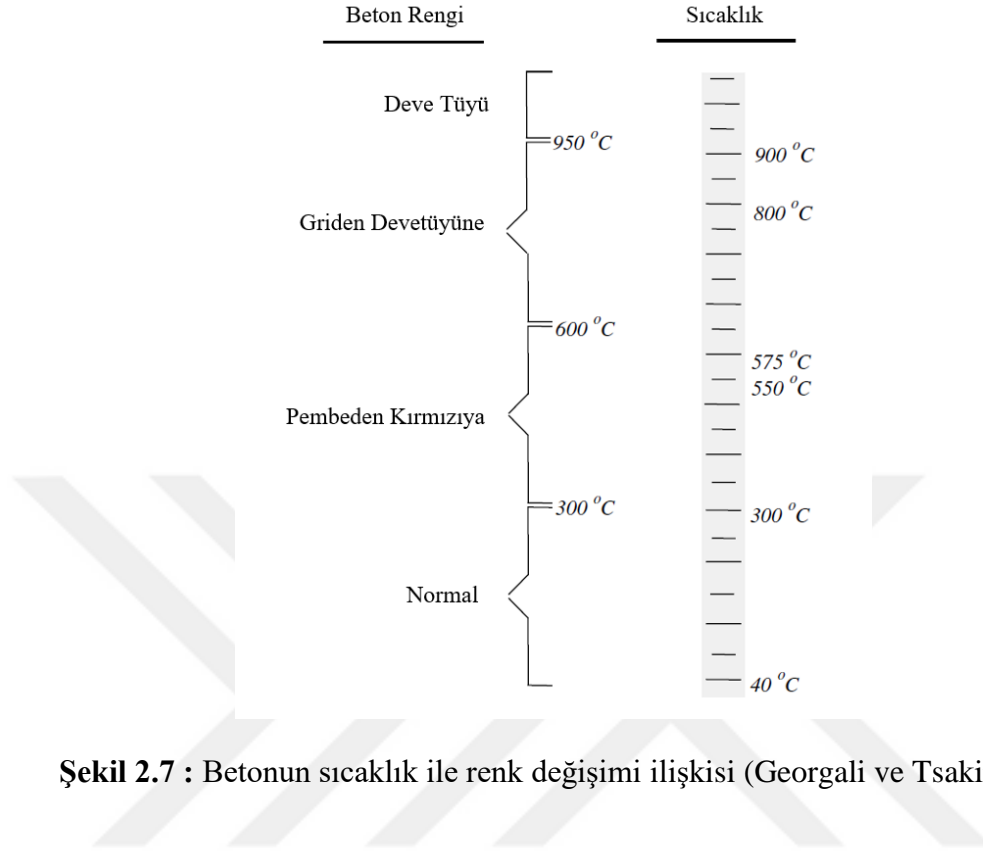
Betona etki eden sıcaklığın artmasıyla beton içindeki boşluk oranı, 100 ile 300 °C arasında serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşması ve 500 °C civarında agregaların stabilitesinin bozulması ile artar (Uçarkoşar, 2013).

Betonların durabiliteleri ile su emme miktarları arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Yüksek su emme oranlarına sahip betonlarda önemli durabilite problemleri vardır (Ulus, 2007). Artan sıcaklıkla beraber beton iç yapısındaki gözeneklerde serbest bulunan su ile kimyasal bağlı sular buharlaşır. Bu nedenle beton daha gözenekli bir yapı haline gelir ve betonda hacimsel su emme oranında artış beklenir. Hacimsel su emme oranlarının düşük seviyede bulunması, dışa açık kılcal ve kanal boşluklarının en az seviyede bulunmasından kaynaklandığı söylenebilir (Çelik, 2019).

Volkanik, başkalaşım ve tortul kayalarının çoğu düşük sıcaklıklarda renk değiştirmezler. Betonda renk değişikliğinin olması beton dayanımının azalmasında önemli etkileri olabilir (Demir, 2008). Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonda mekanik özelliklerinde değişimler olduğu gibi renginde de değişiklikler meydana gelmektedir. Silisli ve kalkerli agregalar ile yapılan betonlar, sıcaklıkla birlikte renk değişimlerine uğrarlar. Meydana gelen renk değişimleri kalıcıdır ve böylece yangın sırasındaki en yüksek sıcaklık sonradan tahmin edilebilir. Böylece kalan mevcut durumdaki dayanım yaklaşık olarak değerlendirilebilir. Genel olarak rengi pembenin ötesinde değişen beton şüphelidir ve gri aşamayı geçen beton muhtemelen gevrek ve boşlukludur (Neville, 1995; Kızılkant ve Yüzer, 2008). Tortul kalker ve silisli şist, 230-300 °C aralığındaki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra renk değişikliğine (soluk pembe) uğrayabilir. Sıcaklık yükseldikçe renk değişimi devam eder ve kademeli olarak koyulaşmalar başlar. 600 °C civarında kiremit kırmızısı görünümü almaktadır. Sıcaklık 600 °C'den daha fazla değerlere ulaştığında ise kiremit kırmızısı yavaş yavaş griye dönüşmektedir. Meydana gelen bu renk geçişlerinin nedeni az miktardaki demir içeriğidir (Demir, 2008).

Genellikle zarar görmüş beton yapısında değerlendirme, meydana gelen renk değişiminin, yüzeydeki çatlamların ve dökülmelerin görsel olarak gözlemlenmesiyle başlar ve bu durum geniş ve genel bir sıcaklık kılavuzu sağlar. 300 °C üzerindeki sıcaklıkta beton normal renginden pembeye, 300-600 °C sıcaklık aralığında pembeden kırmızıya, 600-900 °C sıcaklık aralığında beyazımsı griye ve 900-1000 °C sıcaklık aralığında ise devetüyü

rengine döner (Georgali ve Tsakiridis, 2005). Şekil 2.7’de betonun sıcaklık ile renk değişimi ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.7 : Betonun sıcaklık ile renk değişimi ilişkisi (Georgali ve Tsakiridis, 2005).

2.5 Yapılarda Sıva Harçları ve Etkileri

Sıvalar, doğa koşulları karşısında yapı elemanlarını dış tesirlerden korumak, su veya rutubet geçişini engellemek ve imalat yüzeylerini düzeltme amacıyla uygulanmaktadır (Gökdemir, 2010). Sıvalar iyi aderans, kolay işlenebilme, dayanım ve geçirimsizlik özellikleri ile sıva bünyesindeki bağlayıcıların bu özellikleri sağlayacak biçimde seçilmesi öngörülmektedir. Sıva, yapıları yangınlara karşı korumada büyük bir öneme sahiptir (Akbulut, 2018). Sıvalar plastik kıvamdayken çalışması sırasında plastik kıvamını koruyarak işlenebilmeli ve uygulanan yüzeye yapışmalıdır. Sıvalar sertleştikten sonra sıva üzerinde çatlamlar ve sonradan dökülecek şekilde boşlukları olmadan işlevini devam ettirmelidir. Aynı zamanda sıvalar genellikle gözeneksiz olmalı ve dış etkilere karşı yüksek fiziksel ve mekanik dayanımlı olmalıdır. Sıvalar meydana gelebilecek hacim değişikliklerinde çatlamlara engelleyebilecek kadar esnek olmalı aynı zamanda yeterli mukavemete de sahip olmalıdır. Sıvalar kolon, duvar, tavan, merdiven gibi yapı elemanlarında uygulanabilir kaplamalardır ve ayrıca kaba sıva kalınlıkları 2-3 cm olmalıdır

(Kaptan, 2020). Sıva harçları, kumun içerisinde bağlayıcılar, su ve gerektiği kadar katkı maddesi kullanılarak karışımın hazırlanması ile oluşmaktadır. (Yiğiter, 2014).

Sıvaların tasarımında, atmosfer faktörleri (sıcaklık, hava, nem, güneş ışınları, rüzgar gibi), mekanik faktörler ve malzeme özellikleri (ekonomiklik, bulunabilirlik, estetiklik, fiziksel ve kimyasal mekanik özellikler gibi) faktörleri göz önüne alınmalıdır. Sıvaların uygulanacağı yüzey yağlı, kirli ve tozlu olmamalı ve ıslatılmamalıdır (Vergül, 2019).

Genel olarak bir sıvadan tabakalar arası ve yüzeyde iyi bir tutunma ve aralarında boşlukların bulunmaması, tabaka kalınlıklarında farklılık görülmemesi, homojenlik, lekesiz görünüm, yeterli sertlik, dış etkilere ve aşınmaya karşı dayanıklılık özellikleri beklenmektedir (Özer, 1982).

Sıvalar, gerek uygulanan yüzeyden kaynaklı gerek kendi bünyesi ile alakalı çeşitli hasarlara uğrayabilmektedir. Sıva uygulanan yüzeyde dökülme veya çatlama olması sıvaların da çatlamasına ya da dökülmesine neden olmaktadır. Uygulanan yüzey ile sıvanın farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması ve sıvaların su ve neme maruz kalması sıvanın zarar görmesine neden olan etmenler arasındadır. Sıva uygulanan yüzeyle sıvanın iyi bir yapışma özelliği göstermemesi ve aralarında boşluk kalması sıvalarda hasara neden olmaktadır. Sıvada kullanılan ince agregada reaktif silis bulunması çimento ile reaksiyonu sonucunda sıvaların çatlayıp dökülmesine neden olan diğer bir etmendir. Aynı zamanda kılcallık yoluyla dışardan gelen suyun yapıdaki tuzları bir yerde biriktirip kristalleşmesi veya kireç türü farklı minerallerin yüzeyde kristalleşmesi sonucu meydana gelen ve yüzeylerde görülebilen çiçeklenme olayıda bir hasar türüdür (Kaptan, 2020).

Çakır (2010) yaptığı çalışmada, yapı yüzeyini dış etkilere karşı koruyan kireç bağlayıcı sıva malzemesi araştırması yapmıştır. Kireç harcının özelliklerini iyileştirmek için doğal puzolanlar katılarak oluşturulan karışımları bağlayıcı olarak belirlemiştir ve bağlayıcıya katılan standart kum yerine gittikçe artan oranlarda toprak ekleyerek uygun sıva üretimi yapmıştır. Mukavemet ve suya dayanıklılık bakımından kireç harcının doğal puzolanla iyileştirilmesi normal kirece göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yiğiter (2014) yaptığı çalışmada, pirinç kabuğu külleri ve atık kağıt lifleri katkı malzemesi şeklinde kullanarak 3 farklı boyutta kalıplarla sıva harcı numuneleri hazırlamıştır. Kullandığı katkı maddeleri standart agrega, çimento ve su karışımında olan gözenekli yapının boşluklarını ve geçirimsizliğini azalttığını ve buna bağlı olarak da dayanımda artış

gözlendiğini belirtmiştir. Ancak araştırma sonuçlarına göre katkı maddelerinin fazla miktarda kullanımı dayanımı olumsuz etkilediği sonucuna varmıştır.

Mavi (2000) çalışmasında, geleneksel kireç harç ve sıva özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Olumsuz özelliklerini iyileştirmek amacıyla çalışmasında farklı cins ve miktarda katkı maddeleri kullanarak 9 adet karışım oluşturmuş ve fiziksel ve mekanik deneylerinin yanı sıra rötre ve buhar geçirgenliği deneyleri de yaparak incelemeler ve karşılaştırmalar yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kireç harcı ile az miktarda puzolan içeren numunede basınç dayanım değerleri birbirine yakınken, puzolan miktarının iki katına çıkarılması ile basınç dayanımında artışlar meydana gelmiştir.

Babadağ (2009) yaptığı bir çalışmada, sıva ve harçların farklı kimyasal katkıları kullanıldıklarında oluşturduğu etkileri araştırmıştır. Deneylerde çimento, kum, karma suyu ve 6 adet kimyasal katkı kullanılmıştır. Toplam 7 adet sıva harcı karışımı yapılmıştır. Bu yapılan karışımlarda 6 adet katkılı ve 1 adet katkısız referans harç olmak üzere hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan karışımlara eğilme, basınç, ısıl genleşme, rötre ve yapışma dayanımı tayini deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Y-MFS kodlu katkı (yüzey aktif madde ve melamin formaldehit sülfonat esaslı katkı) mukavemet açısından en iyi performans veren katkı olduğu belirtilmiştir.

Bayraktar (2012) yaptığı çalışmada, sıva yapımında kullanılmak üzere 4 tip sıva harcı (çimento, kireç, alçı ve melez) üretmiştir ve bu üretilen sıva harçlarının yüksek sıcaklık etkisi altındaki mekanik özelliklerindeki farklılıkları araştırmıştır. 28 ve 90 gün kür edilen harç numuneleri 20, 125, 250, 500, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisinde olmak üzere altı farklı sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Referans numuneleri olarak 20 °C sıcaklıkta bekletilen harç numuneleri kabul edilmiştir. Harçların soğutma işlemi havada ve suda soğutma yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelere göre en fazla dayanımın üretilen harçlar arasında çimento harcının gösterdiği ve yüksek sıcaklığa tabii tutulan harçlarda, havada soğutma işlemlerinin daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Kaya ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, kaplamalı beton basınç dayanımına donma-çözülme etkisini araştırmışlardır. 50x50x50 mm boyutlu küp beton numuneler, 28 gün suda kür edildikten sonra 100x100x100 mm ölçülerindeki küp kalıplar içerisine sıva kalınlığı 25 mm olacak şekilde ortalanarak yerleştirilmiştir. Sıva kaplamasız numuneler referans numune olarak kabul edilmiştir. Referans ve üç farklı sıva malzemesi (alçı, ısı yalıtım ve çimento esaslı sıva) ile kaplanmış numunelere donma-çözülme deneyleri

yapılmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre ilk 50 çevrimlik donma-çözülme verilerine göre en dayanıklı kaplama ısı yalıtım sıvası, en düşük dayanıklı kaplama ise çimento esaslı hazır sıva olduğu belirtilmiştir. 100 çevrimlik donma-çözünme verilerine göre ise en fazla dayanım kayıpları alçı sıva ile yapılan kaplamalı numunelerde olduğu belirtilmiştir.

2.5.1 Çimento

1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası hazırlamış olduğu ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek ve daha sonra pişen bu karışımı öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Ortaya çıkan bu ürüne su ve kum katıldığında ve zamanla sertleşme olduğunda, ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin Portland adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığını gören Joseph Aspdin, elde ettiği bu bağlayıcı için 1824 yılında "Portland Çimentosu (PÇ)" adı altında patent almıştır. Bu bağlayıcı daha sonraki yıllarda büyük gelişmeler gösterse de "Portland" ismi aynen kullanılmaya devam etmiştir (Yılmaz, 2010).

Çimento toz halindedir ve belirli miktarda su ile karıştırıldığında plastik hamur haline gelmektedir. Fiziksel ve kimyasal işlemlerden katı ve taş benzeri bir hale gelen hamur, taneleri bütünlük katı madde oluşturan bir malzemedir. Çimento hamuru hem havada hem de suda sertleşebilmekte aynı zamanda mukavemetini koruyup geliştirebilmektedir. Çimento hidrolik bir malzemedir ve en önemli yapı malzemelerinden biridir (Li ve Ren, 2011). Çimento; inşaat, ulaşım, su yapıları, elektrik enerjisi, ulusal savunma ve diğer inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan beton, betonarme ve öngerilmeli beton için temel bileşendir. Birçok çimento çeşidi arasında en yaygın kullanılan çimento çeşidi Portland çimentosudur. Bu çimentonun çeşitleri ise; normal Portland çimentosu, Portland yüksek fırın çimentosu, Portland puzolan çimentosu, Portland uçucu kül çimentosu ve Portland kompoze çimentosu vb. şekindedir (Zhang, 2011). Kireç taşı ve kil ya da benzer kütle kompozisyonuna ve yeterli reaktiviteye sahip diğer malzemelerin yaklaşık 1450 °C'ye kadar ısıtılmasıyla klinker topakları veya nodülleri üretilir. Çimento üretimi için klinker ile belirli yüzde oranında alçı ile karıştırılarak ince şekilde öğütülür (Taylor, 1990). Öğütülme işleminin sonunda ince taneler haline gelen çimentonun inceliği, dayanım kazanmada etkili bir unsurdur. İnce öğütülen çimento tanelerinin yüzey alanları daha fazla olduğundan hidratasyonu daha hızlı bir sürede tamamlamış olacaktır (Vergül, 2019).

Avrupa Standardizasyon Komitesi genel çimentolar için çok sayıda çimento türünü içerecek şekilde TS EN 197-1 (2012)'de yer vermiştir. Doğrudan Türk standardı olarak kabul edilen bu Avrupa standardı da genel amaçlı Türk çimentolarının yerini almıştır. Yeni genel çimentolar TS EN 197-1 (2012)'de "CEM I Çimentosu" olarak adlandırılır (Yılmaz, 2010).

CEM çimentosu, hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu meydana gelen ve içerisinde bulunan reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının %50'yi aşan oranlarda bulunması gereken çimento türüdür. Standartlara göre 5 ana tipe ayrılmıştır (Yılmaz, 2010).

CEM I çimentosu, pişmiş kil ve kalker bileşiminden oluşan klinkerin yalnızca kalsiyum sülfat ve yan bileşim olarak ağırlıkça en fazla %5 olacak şekilde öğütülmesiyle elde edilir (Yılmaz, 2010).

CEM II çimentosu, bu tip çimentoda %6 ile %35 arasında mineral katkıları kullanılmaktadır. Kullanılan mineral katkı türüne bağlı olarak isimlendirmeler kullanılmaktadır. Bunlar Portland Cürüflü, Portland Puzolanlı gibi isimlerle ifade edilmektedir (Yılmaz, 2010). A ve B tipi olarak bu çimentolar iki tipe üretilirler. A tipi çimento en fazla yüzde %20 ve B tipi çimento ise en fazla %35 oranında katkı içermektedir. A tipi çimentolarda yüksek fırın cürufu, puzolan, uçucu kül, pişmiş şist, kalker ve silis dumanı ilave edilebiliyorken, B tipi çimentolarda silis dumanı hariç A tipi çimento ile aynı ilaveler içermektedir (Tekin, 2014). Yapısındaki ince dolgu malzemeleri sayesinde, çimentolaşan kütledeki mikro gözenekleri sıkılaştırmasıyla geçirimsizliği azaltmaktadır. Sahip olduğu mineral katılardan dolayı uzun süreli mukavemeti yüksek ve su ihtiyacı düşüktür (Şenkaya, 2019).

CEM III çimentosu, Yüksek Fırın Cürufunun %36 ile %95 arasındaki oranlarda katkı malzemesi kullanıldığı çimento tipidir (Yılmaz, 2010).

CEM IV çimentosu, Puzolanik çimentoların bulunduğu fakat katkı maddesi olarak cüruf veya kalkerin kullanılmadığı çimento tipidir. Kullanılan katkı madde oranı puzolan ve uçucu kül katkıları ile birlikte %11 ile %55 arasında değişmektedir (Yılmaz, 2010).

CEM V çimentosu, içerisinde kompoze çimentolar bulundurulur. Hem cüruf hem de puzolan ve uçucu kül kullanılma oranları %18 ile %50 arasında olacak şekilde birlikte katılmasıyla oluşan çimento tipidir. Klinker kullanma oranı %20 ile %64 arasında kalması koşulunun sağlanması ile üretilirler (Yılmaz, 2010).

Portland çimentosu, kalkerli ve killi hammaddelerin döner fırınlarda yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda oluşan klinker ile belirli oranlarda alçı (%4-6) ilave edilmesiyle birlikte 0.5 – 80 µm boyutların öğütülmesi sonucunda elde edilmektedir. Klinker tipik olarak %67 CaO, %22 SiO₂, %5 Al₂O₃, %3 Fe₂O₃ ve %3 diğer oksitlerden oluşmaktadır. Portland çimentosu 4 ana bileşimden (Trikalsiyum silikat (C₃S), Dikalsiyum silikat (C₂S), Tri-kalsiyum alüminat (C₃A), Tetrakalsiyum alüminoferrit (C₄AF) ana bileşimleri) oluşmaktadır (Yılmaz, 2010; Taylor, 1990).

C₃S ve C₂S su ile reaksiyona girerek çimento hamurunda katılaşma (priz alma) ve çimento hamurunda sertleşme (dayanım kazanma) özelliklerine etki etmektedir. Asıl bağlayıcı özelliği kazandıran ve reaksiyonları sonucu oluşturdukları ürünlerin türü aynı olan hidrasyon ürünleri oluşturmaktadır (Aytaç, 2006).



Belirtilen 2.2 ve 2.3 bağıntılarında “H” su (H₂O), “CH” sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ve “C₃S₂H₃” ise tobermorit olarak ifade edilmektedir.

Durmuş (2008) çalışmasında, Portland çimentosu ve Portland kompoze çimentosu kullanılarak üretilen harçların yüksek sıcaklıktaki mekanik dayanımlarını yapay sinir ağı ile incelemeye çalışmıştır. Çalışmada hazırlanan harç numuneler 7, 28 ve 90. günlerde 20, 100, 300, 400, 500, 600, 700 ve 900 °C olmak üzere 8 farklı sıcaklığa yüksüz olarak tabii tutulmuş ve harçların soğutma şekilleri havada ve suda olmak üzere iki farklı grupta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına ulaşana kadar soğutulan numunelerde ultrases geçiş hızı, özgül ağırlık, dinamik elastisite modülü, boşluk yüzdesi, eğilme ve basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Yüksek sıcaklığın harçlar üzerinde etkisi istatistik ve yapay sinir ağları ile incelenerek belirlenmiştir. Yapılan çalışmada sonuç olarak, 300 °C’ye kadar olan basınç dayanımının kontrol numunelerine göre artış gösterdiği ve bu sıcaklıktan sonra dayanımda sürekli bir şekilde düşüşler olduğu görülmüştür. Ayrıca, hava ve su ile soğutulan harç numunelerinde istatistiksel bir fark olduğu ve yapay sinir ağı ile yapılan bir

değerlendirmede en fazla %8 hata payı ile eğilme ve basınç dayanımının tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Kızılkant ve Yüzer (2008) yaptıkları çalışmada, CEM I 42.5 çimentosu, silis ve kalker esaslı agregaları ve %10 ikameli olarak farklı puzolanların (silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi) ilavesi ile üretilen 40x40x160 mm boyutlu harç numuneleri yüksek sıcaklıklara (100, 200, 300, 600, 900 ve 1200 °C) maruz bırakıldıktan sonra iki farklı şekilde soğutma işlemi (havada soğutma ve suda soğutma) uygulanarak harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi uygulanmış numunelerde kontrol deneyleri yapılmış, aynı numunelerde Munsell Renk bileşenleri olan tür, değer ve doymuşluk, tayfsal ışıkölçer ile sayısal olarak belirtilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre yüksek sıcaklığa maruz kalan harcın basınç dayanımında meydana gelen değişim ile rengin tür bileşeninde meydana gelen değişimin paralellik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Harç numunelerinin renk değişimi ile basınç dayanımındaki değişimi arasında bağlantı kurulmuş ve agrega türüne göre iki farklı bağıntı elde edilmiştir.

Topçu ve Demir (2007) tarafından yapılan çalışmada, CEM II/B-M (P-L) 32.5 R ve CEM I 42.5 R çimento türleri ile 40x40x160 mm boyutlarında üretilen harç numuneleri, 28 gün boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kirece doymun suda bekletilmiş ve yüksek sıcaklık fırınında 6 °C/dak. ısıtma hızıyla üç farklı sürede (1, 3 ve 5 saat), 5 farklı sıcaklığa (150, 300, 400, 600 ve 900 °C) maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıklara tabii tutulan harç numunelerine iki farklı soğutma (havada ve suda soğutma) işlemi uygulandıktan sonra numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde birim ağırlık, ultrases hızı, dinamik elastisite modülü, kılcal su emme katsayısı, ağırlıkça su emme, eğilme ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Yapılan deneyin sonuçlarına göre arta kalan dayanımlara 1-3 saat uygulanan yüksek sıcaklığın önemli etkisinin olduğu, yüksek sıcaklığın uygulama süresinin artmasıyla birlikte bu etkinin azaldığı ve bu nedenle meydana gelen büyük dayanım azalmalarının ilk iki saat içinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Gülce (2009) yaptığı çalışmada, dört farklı çimento tipi (CEM I 42.5 R, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, CEM IV/B (P-V) 32.5 ve CEM III/A 32.5 N) kullanarak numuneler üretmiştir. Deneysel çalışmasını numune üretimi, kürü, yüksek sıcaklık etkisi, soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere 5 aşamada gerçekleştirmiştir. Üretilen numuneler 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda 5 farklı sıcaklığa (150, 300, 450, 600 ve 900 °C) maruz bırakılarak ve iki farklı grupta soğutma (havada ve suda soğutma) işlemi uygulanmıştır.

Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre numunelerde yüksek sıcaklıklarda kayıplar görülmüştür ve özellikle de 450 °C ile 900 °C arası sıcaklıklarda dayanım kayıplarının daha fazla olduğuna dikkat çekilmiştir. Dört çimento tipinde de havada soğutma yapılması ile numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çimento tipleri arasında bariz farklılıklar gözlenirse de yüksek sıcaklığa maruz kalacağı öngörülen yapılarda Cem III tipi çimento kullanımı önerilmektedir.

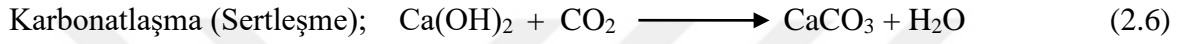
2.5.2 Kireç

İlk olarak neolitik çağda Miken ve Minos uygarlıklarında M. Ö. 1700 yıllarında kireçten elde edilen sıvalara rastlanmaktadır. M. Ö. 300'lerde ise Mısırlılar kireci kullanmışlardır (Yılmaz, 2010). Kireç, hammadeleri zengin ve yaygın bir şekilde doğada bulunan en eski bağlayıcılardan biridir. Üretimi basit ve düşük maliyetli olmasının yanı sıra kullanımında kolaydır. Kirecin ana hammaddesi, ana bileşeni kalsiyum karbonat olan doğal kayadır. Doğal hammaddelelerin yanı sıra bir başka kireç kaynağı da kimyasal endüstriyel yan ürünlerdir. Örneğin, asetilen taşından asetilen hazırlanmasında kalan karbür cürufunun ana bileşeni kalsiyum hidroksittir, yani sönmüş kireçtir (Zhang, 2011).

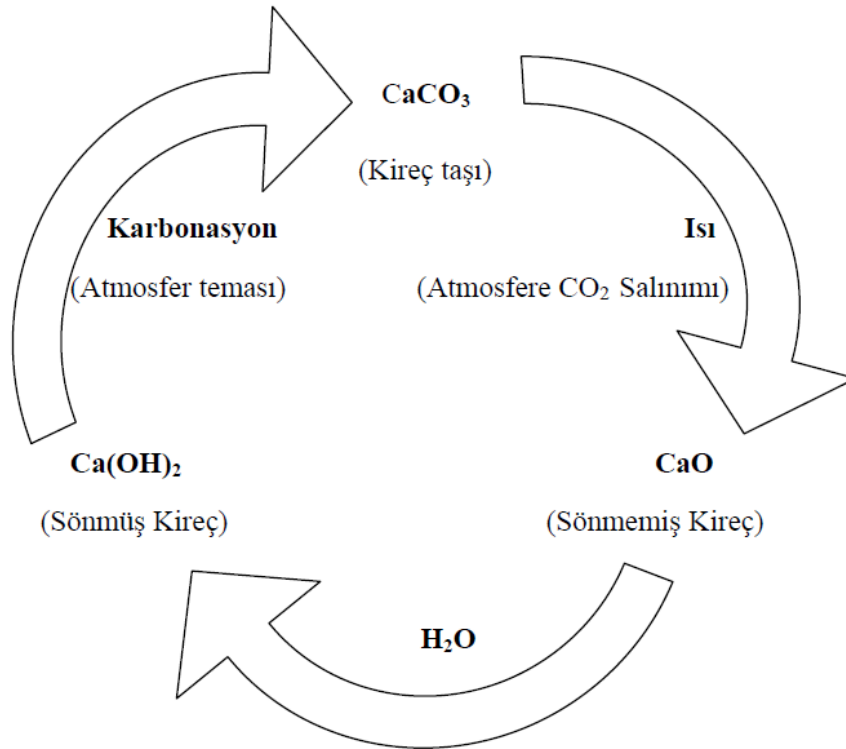
Alçı hazırlanmasına göre sönmemiş kirecin hazırlanması daha fazla yüksek sıcaklık gerektirdiğinden kireç teknolojisinin gelişmesi gecikmiştir. Kalker, dolomit, mermer, kalsit, tebeşir ve manyezit gibi taşların iri parçalar halinde kırılmasının sonrasında kireç ocağı fırınlarında mazot, kömür veya meşe çalısı ile 900 °C'yi aşan sıcaklıklarda kızdırılması sonucu kalsinasyon işlemiyle bünyelerinde bulunan CO₂'nin (karbondioksit) uçmasıyla sönmemiş kireç elde edilmektedir (Eren, 1998; Swallow ve Carrington, 1995).

Kirecin hammaddesi kireçtaşı (kalker), kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve magnezyum karbonattan (MgCO₃) oluşan bileşiklerdir. Kireçtaşı (CaCO₃), yaklaşık 900°C sıcaklıkta yakılarak sönmemiş kireç (CaO) oluşur ve karbondioksit (CO₂) açığa çıkar. Meydana gelen sönmemiş kireç (CaO), kolay bir şekilde ufalanabilen amorf bir malzemedir ve rengi beyazdır. Kaliteli ürün elde edebilmek için kirecin dikkatle söndürülmesinin önemli bir rolü vardır. Bu durum sönmemiş kirece ağırlığınca 1/3'ü kadar su katılması ile oluşmaktadır. Söndürülme sırasında ve sonrasında hidrasyon olayı kireç kuyusunda bekletilirken devam eder. Kirecin bu kuyuda bekletilme nedeni hidrasyonun sürmesidir.

Hidrate kireç, hava ile temas ettiğinde havanın karbondioksiti ile birleşerek karbonatlaşma meydana gelir ve sertleşir (Akcan, 2015). Aşağıda belirtilen 2.4, 2.5 ve 2.6 bağıntılarında kireçtaşının sırasıyla yakma, söndürme ve karbonatlaşma reaksiyonları gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 2.8’de kireç döngüsü verilmiştir.



(CaCO_3 : Kireçtaşı (kalsiyum karbonat), CaO : Kalsiyum oksit (sönmemiş kireç), CO_2 : Karbondioksit, H_2O : Su, Ca(OH)_2 : Kalsiyum hidroksit (sönmüş kireç))



Şekil 2.8 : Kireç döngüsü (Yılmaz, 2010).

Pişmiş durumda olan hava kireci (CaO) söndürme işlemi olmadan kullanılmaz. Kireç tamamen söndürülmeden yapılarda kullanılırsa söndürme olayı yapıda tamamlanır ve devamında bu durum hacim artmasına bu da kirecin kullanıldığı bölgelerde çatlaklara, dökülmelere ve kabuklaşmalara yol açar. Söndürülme işlemi uygulandıktan sonra havada sertleşme gösteren hava bağlayıcıları sınıfında olan kireç su direnci ve mukavemeti oldukça düşüktür ve dolayısıyla tek başına kullanılmamaktadır. Kum ve su katılarak yapıda sıva ve duvar harcı yapımında kullanılmaktadır. Diğer bir kullanım alanı ise hava kirliliği olan bölgelerde kirliliği azaltmak amacıyla tarım ve ziraat işlerinde yakıtlara karıştırılarak kullanımınıdır. Beton, tuğla ve taş gibi yüzeylere kolayca yapışma özelliği göstererek işçilikten tasarruf sağlaması, sertleşme sonrasında binada meydana gelebilecek deformasyona uyum sağlayabilecek şekil değiştirme özelliğine sahip olması kullanım avantajlarından (Bayraktar, 2012).

Kirecin kalitesine su/kireç oranları, sönmemiş kirecin saflığı, parçacık büyüklüğü, pişirme sıcaklığı, karıştırma ve söndürmede kullanılan suyun saflığı gibi faktörler etki etmektedir (Akcan, 2015).

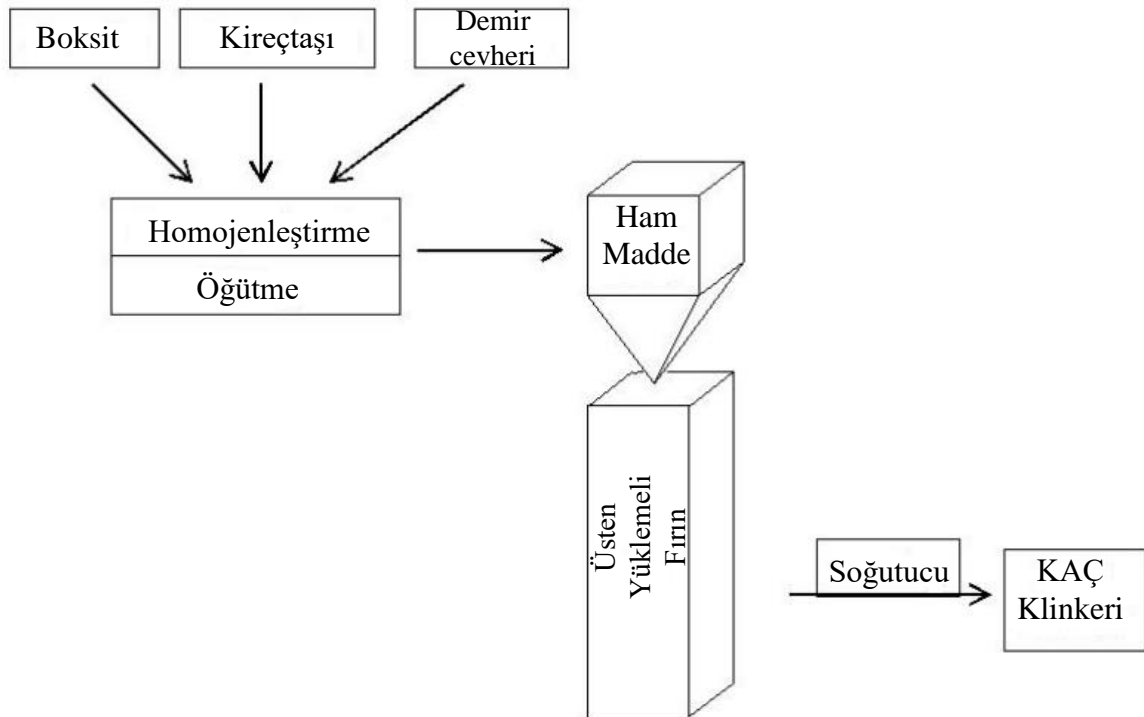
Sönmemiş kireç kolay bir şekilde su ile tepkimeye girebilmektedir. Sönmüş ve sönmemiş kirecin özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Kalsiyum kireci ve dolomitik kireç olarak sınıflandırılma yapılan çizelgede kendi aralarında kalsiyum oksit oranına göre de adlandırma yapılmıştır. Sınıflandırmalarda içeriğinde bulunabilen magnezyum oksit, karbondioksit, alüminyum oksit, demir oksit ve titanyum oksit gibi metal oksitler ve asitte çözünmeyen maddelere ilişkin oranlar da çizelgede verilmiştir (Aktaş, 2019).

Çizelge 2.1 : Sönmüş ve sönmemiş kirecin özellikleri (Aktaş, 2019).

Bileşim ve Oranlar (Ağırlıkça %)	Kalsiyum Kireci			Dolomit	
	KK90	KK80	KK70	DK85	DK80
CaO, en az	90	80	70	85	80
MgO	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≥ 30	> 5
CO ₂ , en çok	4	7	12	7	7
Asitte çözünmeyen maddeler SiO ₂ dahil, en çok	1.5 - 2	1.5 - 2	1.5 - 2	1.5 - 2	1.5 - 2
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ metal oksitleri en çok	1 – 1.5	1 – 1.5	1 – 1.5	1 – 1.5	1 – 1.5
SO ₃ , en çok	2	2	2	2	2

2.5.3 Kalsiyum alüminatlı çimento

Yüksek alüminatlı çimento, Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra İngiltere'de yaygın olarak kullanılan ve Portland çimentosuna kıyasla daha yüksek alüminyum içeriğine sahip olan bir malzemedir. Kalsiyum alüminatlı çimentolar (KAÇ) çoğunlukla kireçtaşı ve boksitten üretilmektedir (Pöllmann, 2012). Kalsiyum alüminatlı çimentonun gelişimi, jipsli zeminlerde demiryolu tünellerinin yapımında kullanılan Portland çimento esaslı betonun maruz kaldığı sülfat saldırısı ile ilişkili sorunların üstesinden gelme çabaları ile hızlanmıştır. Bu tip bağlayıcıyla ilgili ilk patent 1908'de Fransa'da Bied tarafından yapılmıştır ve 1913 yılında üretime girip Ciment Fondu olarak tanınmıştır. Kalsiyum alüminatlı çimentonun Portland çimentosuna göre çok daha hızlı dayanım kazandığı anlaşıldıktan sonra bu önemli özellikten faydalanmak için Birinci Dünya Savaşı'nda Fransız ordusu tarafından silah mevzileri ve barınakların yapımında kullanılmıştır. Günümüzde bu çimento çeşitli özel uygulamalarda kullanılmaktadır (Odler, 2000). KAÇ üretimi için, KAÇ hammaddelerinin belirli oranlarında karışımı ile yaklaşık 1600 °C sıcaklıklardaki fırınlarda beslenmesi ve elde edilen klinkerin öğütülmesi sonucunda üretilmektedir (Yanardağ, 2020). Şekil 2.9'da KAÇ üretimi için üst yüklemeli fırın şematize edilmiştir.



Şekil 2.9 : KAÇ üretimi için üst yüklemeli fırın (Pöllmann, 2012).

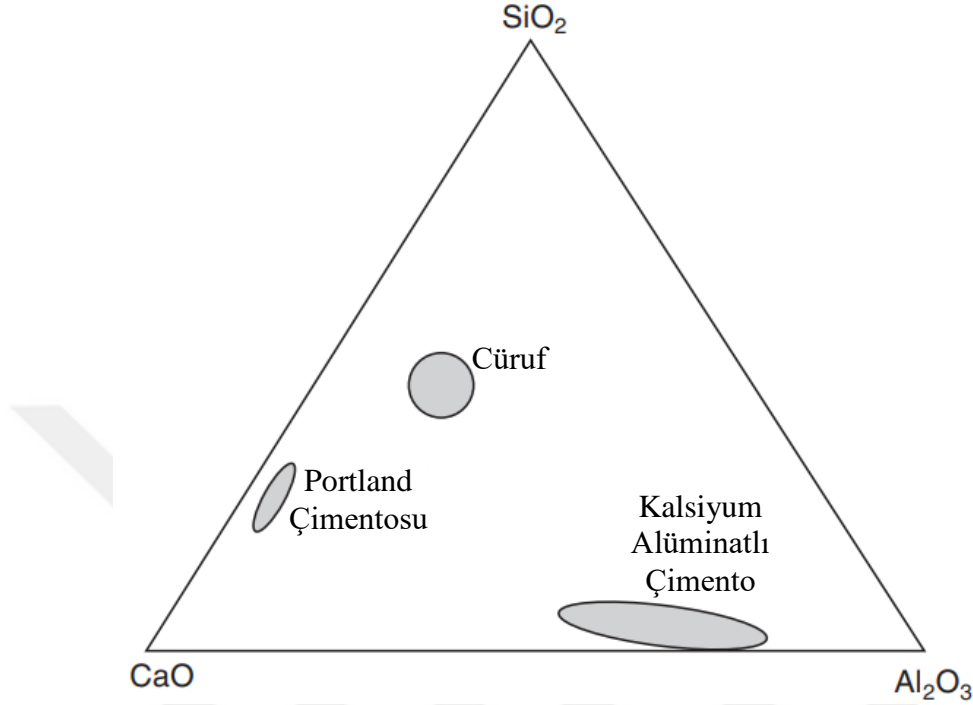
KAÇ, Portland olmayan çimentoların veya özel çimentoların en önemli türüdür. Buna rağmen, hacimce her yıl kullanılan kalsiyum alüminatlı çimentolar Portland çimentosunun yalnızca binde biri kadardır. Portland çimentosuna göre yaklaşık 4-5 kat daha maliyetli olduklarından, kalsiyum alüminatlı çimentoların Portland çimentosu yerine kullanımı pek de ekonomik değildir (Scrivener, 2003). Bu kadar az KAÇ kullanımının en önemli nedenlerinden birisi, geçirdiği dönüşüm reaksiyonları sonucu yarattığı dengesizliktir. Hidratasyon sürecinde ortaya çıkan dönüşüm reaksiyonlarının sonucu olarak gözeneklilik artmakta ve dayanım düşmektedir (Yanardağ, 2020).

KAÇ kullanımı, yapılarda yüksek basınç dayanımı, hızlı sertleşme, yüksek sıcaklık ve sıcaklık değişikliklerine direnç, kimyasal saldırılara direnç, darbe ve aşınmaya karşı direnç gibi özelliklerin kazanımını sağlar. KAÇ'ın priz süresi ortalama 3-5 saat aralığında olup bu özelliğiyle PÇ'ye benzemektedir. Ayrıca KAÇ'ın termal genişmesi, PÇ'e göre daha düşüktür (Scrivener, 2003; Scheinherrová ve Trník; 2017; Yanardağ, 2020).

KAÇ, günümüzde oldukça çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. KAÇ, refrakter uygulamaları, ağır koşullar için beton uygulamaları, hızlı tamir betonları ve kuru harç karışımları (hızlı tamir harçları, fayans yapıştırıcıları ve kendiliğinden yerleşen bileşenlerle döşeme uygulamaları) gibi bir dizi özel amaçları olan kullanım alanlarına sahiptir. Yüksek reaksiyon hızı ve hidratasyon ısısı nedeniyle soğuk havalarda yapılan uygulamalarda (yollar, havaalanları, soğuk hava depo onarımları, soğuk iklimlerde kış inşaatları ve tamir harçları gibi) ve hızlı priz, yüksek erken dayanım gerektiren uygulamalarda kullanım için uygundur. Yüksek aşınmaya karşı direnç gösteren uygulamalarda (endüstriyel zeminler, yollar gibi), yüksek kimyasal, fiziksel faktörlere ve asit direncine karşı direnç gerektiren uygulamalarda (beton borular, kanalizasyon elemanları gibi) kullanıma uygundur. Boksitten üretilmiş KAÇ, genellikle 1350 °C sıcaklığa kadar dayanım sağlayabilir. Alümina içeriği yüksek beyaz KAÇ ise, 2000 °C sıcaklığa kadar dayanım sağlayabilmektedir (Yanardağ, 2020; Scrivener, 2003; Ng, 2013).

Portland çimentoları gibi kalsiyum alüminatlı çimentolarda kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitleri içermektedir. Bununla birlikte Şekil 2.10'da, CaO-SiO₂-Al₂O₃ sistemi ile birlikte Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufunun bileşim bölgeleri ile beraber yaklaşık olarak kalsiyum alüminatlı çimento bileşim bölgesi ve kompozisyonların oldukça farklı olduğu görülmektedir (Scrivener, 2003). Kalsiyum alüminat çimentoları, kimyasal bileşiminde %40-80 arasında geniş bir Al₂O₃ içeriğine sahiptir. Portland çimentosunun aksine trikalsiyum silikat (C₃S) içermez, fakat sınırlı miktarda dikalsiyum silikat (C₂S)

içerebilmektedir. Aynı zamanda kalsiyum alüminatlı çimento, alüminli çimento veya yüksek alüminalı çimento olarak da adlandırılabilir (Odler, 2000).



Şekil 2.10 : PÇ, KAÇ ve cürufların bileşim aralığı (Scrivener, 2003).

Portland çimentosundan farklı olarak kalsiyum alüminatlı çimentoda en yüksek miktardaki ana bileşen Al_2O_3 'tür. Çizelge 2.2'de KAÇ'ın sınıflarına göre kimyasal bileşim yüzde aralığı verilmiştir.

Çizelge 2.2 : KAÇ'ın sınıflarına göre kimyasal bileşim aralıkları (Sucu ve Delibaş, 2015).

Sınıf	Renk	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	SiO_2 (%)	$Fe_2O_3 + FeO$ (%)	TiO_2 (%)	MgO (%)
Standart Düşük Alümina	Gri, Soluk Siyah	36-42	36-42	3-8	12-20	<2	~ 1
Düşük Alümina, Düşük Demir	Gri, Açık Gri	48-60	36-42	3-8	1-3	<2	~ 0.1
Normal Alümina	Beyaz	65-75	25-35	<0.5	<0.5	<0.05	~ 0.1
Yüksek Alümina	Beyaz	>80	<20	<0.2	<0.2	<0.05	~ 0.1

Guirado ve Galí (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, faz analizleri yapılmış 20 farklı KAÇ numunesinin faz yüzdeleri Çizelge 2.3'te belirtilmiştir. KAÇ'ın faz çeşitleri, kararsız ve karmaşık yapılara sahiptir (Yanardağ, 2020).

Çizelge 2.3 : Ana fazların KAÇ için bileşim aralığı (Guirado ve Galí, 2006; Yanardağ, 2020).

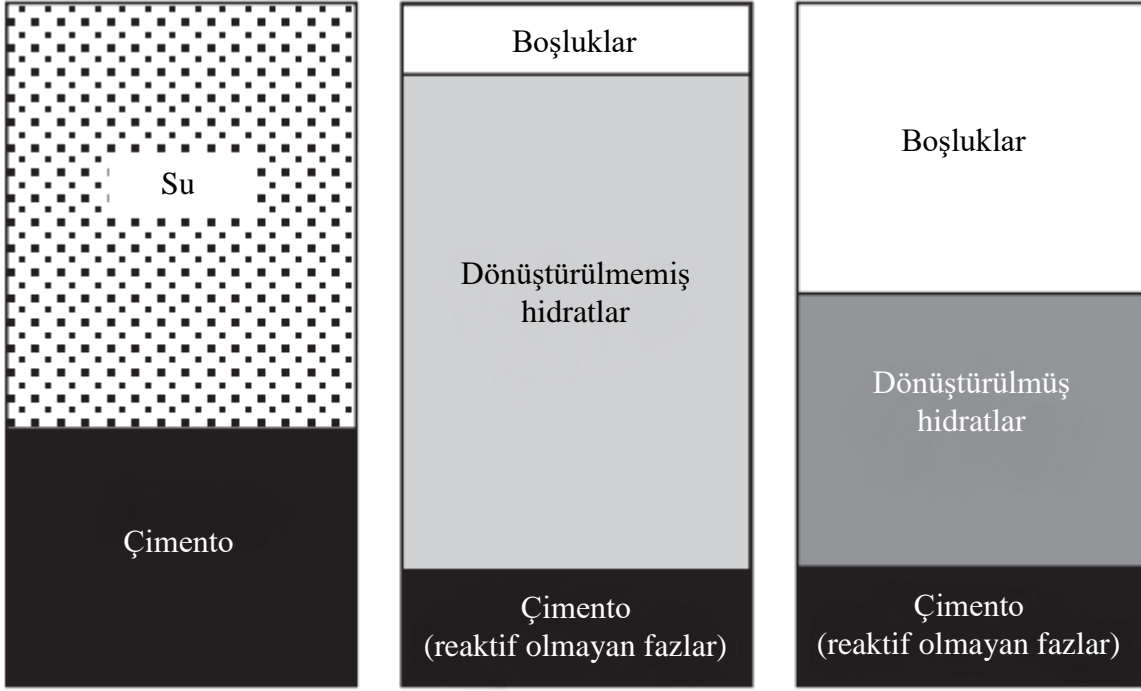
	Faz	%
KAÇ ana fazları	CA	40-70
	C ₂ AS	0-20
	C ₁₂ A ₇	0-10
KAÇ ve PÇ ana fazı	C ₄ AF	10-40
PÇ ana fazları	C ₃ S	0
	C ₂ S	<10
	C ₃ A	0

Standart sınıf KAÇ'lar için hem alüminanın (Al₂O₃) kimyasal içeriği hem de monokalsiyum alüminat (CA) fazının kimyasal içeriği %40-60 aralığındadır (Scrivener, 2003). %40'tan fazla değişen miktarlarda meydana gelen CA, suyla hızlı bir şekilde reaksiyona girerek KAÇ'larda mukavemet gelişiminden sorumludur (Swift, 2013). Bu faz aynı zamanda erken mukavemet gelişiminden sorumlu ana hidrolik fazdır (Klaus ve diğ., 2015). C₂AS fazı, hidrasyonu yavaşlatmaktadır ve ileri yaş dayanımına katkı sağlar. Bu özelliklerinden dolayı C₂S fazı ile benzer bir davranış şekli vardır (Yanardağ, 2020). C₁₂A₇ yaygın olarak bulunan bileşen olmasına karşın kalsiyum alüminatlı çimentoların kübik şeklinde olan sadece küçük bir bileşendir (Odler, 2000). Çimentoya hızlı bir şekilde priz aldırmasına rağmen dayanıma herhangi bir etkisi bulunmamasından ve küçük miktarda da olmasından dolayı KAÇ'ta çok aranan bir bileşen değildir (Yanardağ, 2020). C₄AF, priz süresi ve dayanıma katkısı bakımından önemli bir etkisi yoktur (Idrees ve diğ., 2019). Ayrıca çimento içerisinde serbest C₃A bulunmadığından sülfat ve kimyasal etkilere karşı oldukça dirençlidir (Öztürk, 2008).

KAÇ hidrasyon süreci, PÇ hidrasyon süreci sistemlerinden farklıdır. Hidrasyon, çimento ile suyun aralarında oluşturduğu reaksiyondur. PÇ hidrasyonununun %60-80'i 28

günde gerçekleşmekte ve 28 günden sonra da PÇ hidratasyonu yavaş bir şekilde ilerlemektedir. Bununla birlikte KAÇ hidratasyonunun büyük bir çoğunluğu ilk 24 saat içerisinde gerçekleşmektedir (Kan ve diğ, 2017). PÇ, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C₂S ve C₃S fazlarını oluştururlar. Oluşan bu fazlar su ile tepkimeye girdikleri zaman C-S-H ve C-H hidratlarının oluşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra KAÇ, temel olarak kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile monokalsiyum alüminat (CA) fazını oluştururlar. Bu faz su ile birleştiğinde, kalsiyum alüminat hidratların elde edilmesini sağlamaktadır (Sucu ve Delibaş, 2015).

Hidratasyon reaksiyonları boyunca yarı kararlı olan hidratlar CAH₁₀ ve C₂AH₈, her ikisinde AH₃ ile birlikte daha kararlı olan C₃AH₆ hidratına dönüşmektedir (Midgley ve Midgley, 1975). Yarı kararlı hidratlar (CAH₁₀ ve C₂AH₈) düşük katı yoğunluğuna sahip olduklarından, başlangıçta su ile dolu olan boşlukların çoğunu doldurarak düşük gözeneklilik bırakırlar. Dönüşüm gerçekleştiğinde, daha yoğun olan kararlı hidratların (C₃AH₆ ve AH₃) oluşumu ile katı hacimde önemli bir azalma ve gözeneklilikte artış meydana gelir ve bunun sonucunda da mukavemette azalma olmaktadır. Dönüşüm etkisi, yüksek su/çimento (~0.7) oranına sahip betonlarda, düşük su/çimento (<0.4) oranına sahip betonlara göre daha fazladır (Scrivener, 2003). Aynı zamanda yarı kararlı hidratların, kararlı hidratlara dönüşümü ile su oluşmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip betonlarda, ilk başta oluşan yarı kararlı hidratlardan sonra hidrate olmamış çimento kalmaktadır. Bu hidrate olmamış çimento, yarı kararlı hidratların kararlı hidratlara dönüşümü reaksiyonlarından açığa çıkan su ile reaksiyona girer. Bu durumda gözeneklilikteki artış azalır ve bu dönüşümlerden sonra yoğun, düşük gözenekli mikroyapılar elde edilmesiyle dayanımda artış meydana gelmektedir (Scrivener, 2003; Yanardağ, 2020). Şekil 2.11'de kalsiyum alüminatlı çimentodaki reaksiyonların hacimsel ilişki şeması verilmiştir.



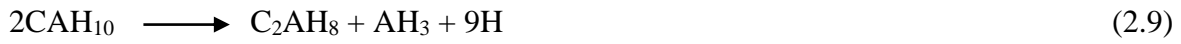
Şekil 2.11 : KAÇ reaksiyonlarının hacimsel ilişki şeması (Scrivener, 2003).

Pöllmann (2012), tipik bir KAÇ'ın farklı sıcaklıklardaki (5 – 45 °C) hidratasyonu sırasında oluşan fazları aşağıda verilen 2.7-2.11 bağıntılarıyla belirtmiştir.

Düşük sıcaklıklarda (<15 °C):



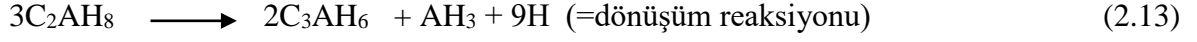
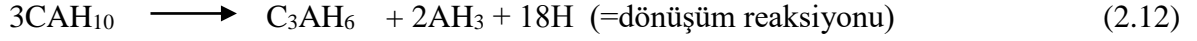
Orta dereceli sıcaklıklarda (15 – 25 °C):



Yüksek sıcaklıklarda (>25 °C):



CAH₁₀ ve C₂AH₈'de olan genel dönüşüm reaksiyonları 2.12 ve 2.13 bağıntılarında özetlenebilir:



Çizelge 2.4 : Kalsiyum alüminat hidratlar için yoğunluk ve bağlı su yüzdeleri (Scrivener, 2003).

Faz	Yoğunluk (kg/m ³)	Bağlı Su (%)
CAH ₁₀	1720	53
C ₂ AH ₈	1750	40
C ₃ AH ₆	2520	28
AH ₃	2400	35

KAÇ, yarı kararlı hidratların, kararlı hidratlara (C₃AH₆ ve AH₃) dönüşümü ile nihai dayanımı geliştirmektedir. Bu kararlı hidratların oluşumu, hidrasyonun ortam sıcaklığında küçük aşamalar şeklinde meydana geldiği için yarı kararlı (CAH₁₀ ve C₂AH₈) hidratların oluşumu ile elde edilmektedir. Yarı kararlı hidratlar Çizelge 2.4'te de görüldüğü gibi yüksek su içeriğine ve düşük yoğunluklara sahiptirler. Bu durumdan dolayı su ile dolu alanı hızlı bir şekilde kaplayarak erken dayanım sağlamasına neden olmaktadır. Kararlı hidratların esas oluşumundan önce erken dayanıma neden olan bu durum, geçici olarak görülmesi gereken bir durumdur (Yanardağ, 2020).

Dönüşüm etkisi genel olarak dayanım kaybına, gözeneklilik ve gerçirgenlikte artışa neden olmaktadır. Dönüşüm reaksiyonları; sıcaklık (sıcaklık artışı daha hızlı dönüşüm), bağıl nem (bağıl nemin doymunluğun altına düşmesi daha yavaş dönüşüm), su/çimento (daha yüksek su/çimento oranı daha hızlı dönüşüm), minerolojik bileşimi (düşük alkali içeriğine sahip olunması daha yavaş dönüşüm) gibi çok çeşitli faktörlere bağlıdır (Bensted, 2002). Dönüşüm reaksiyonlarının etkilerinin azaltılabilmesi için hidrat grubunu değiştiren cüruf veya kireçtaşı gibi bağlayıcı malzemelerin eklenmesi ile sağlanabilir (Yanardağ, 2020).

Tuyan ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, KAÇ'ın %10 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül ile ikame edilmesi sonucu üretilen harçların basınç dayanımı, yüksek sıcaklık

direnci ve dayanıklılık deney sonuçlarını kontrol karışımı (ikamesiz KAÇ harçları) ile karşılaştırmışlardır. Karışımlara mineral katkı ilavesi, karışımların gözenek yapılarında değişikliklere sebep olsa da kimyasal özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemişlerdir. Deney sonuçlarına göre yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün KAÇ'a ikame edilerek kullanılması ile ekolojik verimli ve maliyeti uygun bir bağlayıcı yapı malzemesi üretilbileceğini belirtmişlerdir.

Öztürk (2008) yaptığı çalışmada, KAÇ ve şamot toprağı ile oda sıcaklığında hazırladığı harçlarla kübik numunelerin, 100-1400 °C arası sıcaklıklarda mekanik davranışlarını deneylerle incelemiştir. Numunelerin tabii tutulduğu her sıcaklık aralığında hacim, basınç dayanımı ve böhme aleti ile aşınma kaybı değerleri bulunmuştur. Sıcaklık karşısında ki numunelerde ölçülen değerler ile laboratuvarda bekletilen referans numunelerde ölçülen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda harç numunelerinin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve aşınma kayıplarında önemli değişikliklerin meydana geldiği belirtilmiştir.

Chotard ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada, su/çimento oranı 0.3 ve 0.4 olan alüminli çimentoları incelemiştir. X ışınımı kırınımı (XRD), diferansiyel termal analiz (DTA), termogravimetrik (TG) ve boyuna dalga hızı ölçümlerini 20 °C ölçüm sıcaklığında belirli sürelerde (0 ± 24 saat) yapmışlardır.

Şengül (2018) çalışmasında, kalsiyum alüminat çimentolarında neme ve sıcaklığa bağlı olarak yarı kararlı kalsiyum alüminat hidratlarının bozunması dayanımı önemli ölçüde kaybettiğinden, bu bozunmayı azaltabilmek için stratlingit oluşturmayı amaçlamıştır. Bu stratlingit oluşumunu elde etmek için de ülkemizde çok miktarda bulunan bir silis kaynağı kullanmayı hedeflediğinden silis kaynağı olarak perlit seçmiştir. Perlit içeriğinin artmasıyla hidratasyon ısısının azaldığı belirtilmiştir. Perlit ilavesi karışımlarda yararlı olmasına rağmen, karışımların hiçbiri 600 °C veya 1100 °C'ye tabii tutulduktan sonra dayanımlarının veya kütlelerinin önemli bir kısmını muhafaza edemediği tespit edilmiştir.

Khaliq ve Khan (2015) yaptıkları çalışmada, kalsiyum alüminat çimentolu betonun malzeme özelliklerini 23, 200, 400, 600 ve 800 °C'lik çeşitli sıcaklıklarda incelemiştir. Malzeme özellikleri basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, gerilme şekil değiştirme davranışı ve kütle kaybı deney yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Kalsiyum alüminatlı çimentonun yüksek sıcaklık performansı geleneksel normal dayanımlı beton ile karşılaştırılmıştır. Kalsiyum alüminatlı çimentolu betonların yüksek sıcaklık

testlerinde alümina varlığından dolayı normal dayanım betonlara göre mekanik performansta önemli bir artış gösterdiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra her iki beton tipinde taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra yaptıkları görsel araştırmada, kalsiyum alüminat çimentolu betonların normal dayanımlı betonlara göre düşük çatlama sergilediği belirtilmiştir.

Lee ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ) esaslı ultra yüksek performanslı betonun mikroyapısal ve kimyasal değişimlerini araştırmışlardır. 100 °C sıcaklık etkisinde CAH_{10} 'un dehidrasyonu ile C_3AH_6 oluştuğu belirtilmiştir. 450 °C sıcaklık etkisinde C_3AH_6 ve AH_3 'ün dehidrasyonu ile $C_{12}A_7$ fazının oluştuğu belirtilmiştir. KAÇ esaslı yüksek performanslı betonların KAÇ'ta oluşan hidratasyon reaksiyonları ile mikro gözeneklilikte önemli bir artışa yol açarak buhar basıncının serbest kaldığı belirtilmiştir. 800 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra susuz KAÇ ve dehidre edilmiş C-A-S-H'in bitişik mikro silika ile sinterleşmesi sonucu olarak kalsiyum alümina silikat (C-A-S) jelinin oluşumuyla mukavemete katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

2.5.4 Geopolimer

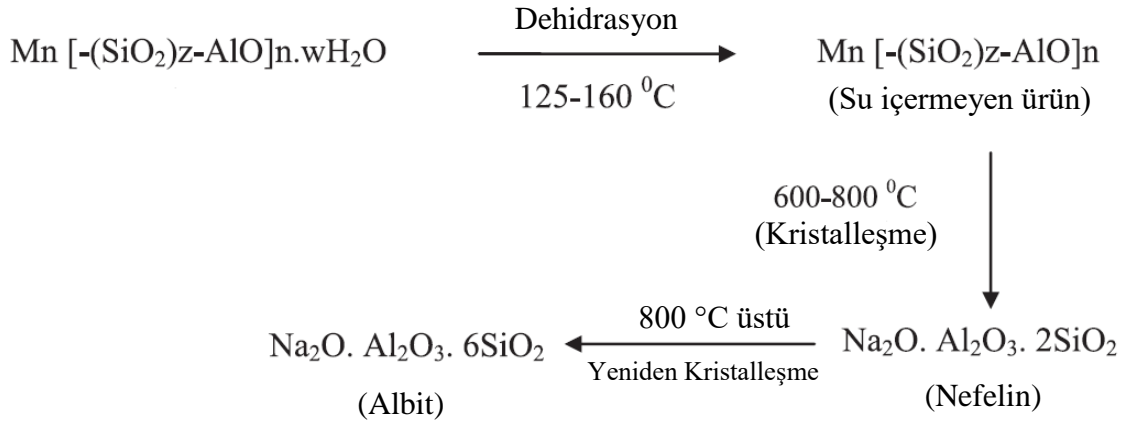
Çimento üretimi, dünya genelindeki toplam emisyonların %5-7'sini ve inşaat endüstrisiyle ilgili toplam emisyonların yaklaşık %17'sini oluşturarak küresel ısınmaya etkisi olan en büyük nedenlerden biridir. İnşaat endüstrisi tarafından kullanılan çimento miktarını azaltabilmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır ve belki de yapılan araştırmalar arasındaki en önemlisi ve başarılısı geopolimer betonun geliştirilmesidir. Geopolimer beton üretimi, Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre %80'e kadar daha az enerji kullanımı ve karbon emisyonu gerektirmektedir (Akbarnezhad ve diğ, 2015). 1978'de Davidovits tarafından geopolimer bağlayıcıların tanıtılmasından itibaren, geopolimer bağlayıcılar kimya alanında olduğu kadar diğer birçok mühendislik alanında da büyük bir ilgi uyandırmıştır. Geopolimer bağlayıcılar, çevre dostu olmalarının yanı sıra asit ve sülfat saldırılarına karşı dirençleri ve yüksek erken dayanımlarından dolayı Portland çimentosu ile üretilen betonlara önemli bir alternatif olmaktadır (Thokchom ve diğ, 2009).

Geopolimerler, kireç ve Portland çimentosunun ardından üçüncü nesil çimento olarak kabul edilir. Geopolimer terimi genel olarak amorf bir alkali alüminosilikatı tanımlamak için kullanılır (Singh ve diğ, 2015). Geopolimerler, oldukça konsantre su içeren alkali

hidroksit veya silikat çözeltileri ile reaksiyona giren alüminosilikat katıdır. Hammadde seçimine ve işleme koşullarına bağlı olarak geopolimerler, yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş sertleşme, asit direnci, yangın direnci, düşük ısı iletkenlik ve Portland çimentolu betonlara göre düşük hidratasyon ısı dahil çok çeşitli özellikler sergileyebilmektedirler (Duxson ve diğ., 2007; Karakoç ve diğ., 2014; Angulo-Ramírez ve diğ., 2017). Alkali çözeltiler içinde kolayca çözünebilen silikat veya alümino-silikat kaynakları geopolimer üretimi için yeterlidir ve böylece geopolimer üretiminde bol hammadde kaynağı imkanı sunmaktadır (Li ve diğ., 2004).

Bol hammadde kaynağı, az CO₂ emisyonu, daha az enerji tüketimi, düşük üretim maliyeti, yüksek erken dayanım, hızlı priz alma özelliklerini bulduran geopolimerler; beton, tuğla, seramik, ısıya dayalı kompozitler, endüstri için sızdırmazlık ürünleri vb. uygulamalar ile inşaat mühendisliğinde kullanım alanlarına sahiptir (Li ve diğ., 2004; Hardjito ve Rangan, 2005).

Geopolimer betonun kimyasal bileşenleri normal Portland çimentosu ile üretilen betonunkinden farklılık gösterir. Portland çimentolu betonda oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli yerine geopolimerde geopolimerik alüminosilikat hidrat (A-S-H) jeli oluşmaktadır (Albitar ve diğ., 2017). Geopolimerler, seramik benzeri mikroyapısında dağılmış yüksek oranda nano gözeneklerin varlığı nedeniyle fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun, alüminosilikat ağına zarar vermeden göç etmesine ve buharlaşmasına izin vermesiyle yüksek sıcaklıklarda iyi yangın direncine sahiptir. Yangın esnasında, N-A-S-H jeli tarafından emilen suyun buharlaşması, su içermeyen ürünlerin oluşumu, kararlı su içermeyen fazların kristalleşmesi ve erimesi (sinterleme) gibi genel olarak tahribata yol açan çeşitli olaylar meydana gelmektedir. Geopolimerlerin yangın esnasında faz dönüşümü Şekil 2.12’de gösterilmektedir (Singh ve diğ., 2015).



Şekil 2.12 : Yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimerlerin faz dönüşümü (Singh ve diğ., 2015).

Geopolimer karışımındaki su, kimyasal reaksiyonda rol oynamamaktadır, sadece işleme sırasında karışıma işlenebilirlik sağlamaktadır. Sertleşme ve sonraki dönemlerde geopolimer matristen dışarı atılan su, matriste geopolimere kesintili nano gözenekler bırakmaktadır (Rangan, 2008).

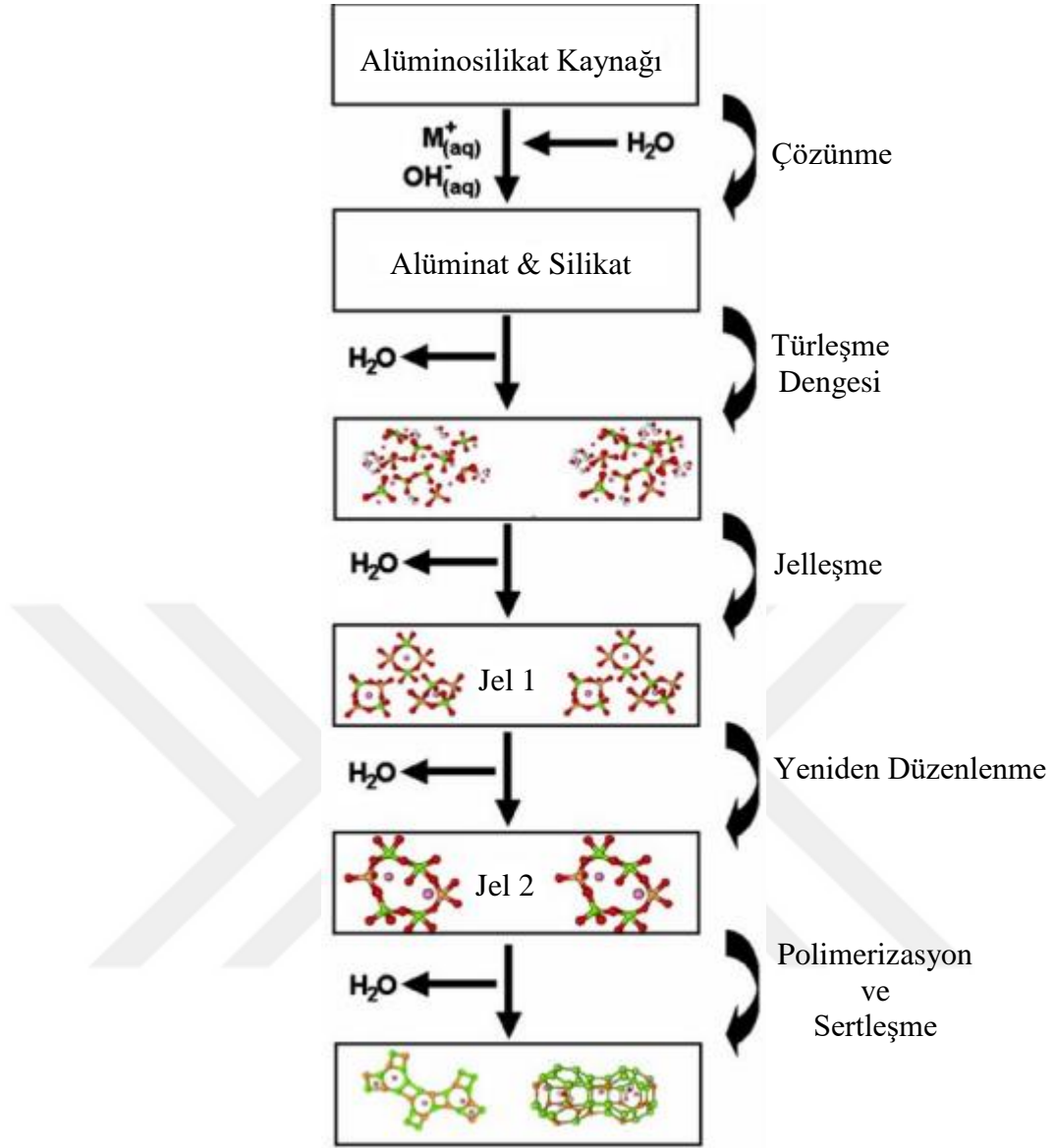
Geopolimerler, silisyum (Si) ve alüminyum (Al) kaynağı olarak sağlanması uçucu kül veya cüruf gibi endüstriyel yan ürünlere veya termal olarak aktivite edilmiş metakaolin gibi doğal malzemelere bağlıdır. Bu silisyum ve alüminyum, alkali aktivite edici bir çözelti içinde çözülür ve daha sonra moleküler zincirler halinde polimerize olur ve bağlayıcı haline gelir (Aleem ve Arumairaj, 2012). Polisialat olarak adlandırılan M-A-S-H (M = Na, K) jeli, geopolimer malzeme özelliklerinin çoğunu oluşturan amorf yapıları parçacıkları ve elementleri birbirine bağlayan dengeli kimyasal sistemi içinde çimentoya benzer bağlayıcı gibi davranan bir jeldir (Luga, 2015). Geopolimerin sertleşmesi, sodyum alüminosilikat hidrat jelinin (NASH) oluşumuyla bağlantılıdır ve daha sonraki aşamalarda bu jelin oluşumu mukavemet gelişiminde rol oynar (Siyal ve diğ., 2016).

Geopolimerler kaynak malzemeler ve alkali sıvılar olmak üzere iki ana bileşene sahiptir. Alüminosilikat bazlı geopolimerler alüminyum ve silisyum açısından zengin içeriğe sahip olması gerekmektedir. Bunlar, kaolinit ve killer gibi doğal mineraller ve cüruf, uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve kırmızı çamur gibi yan ürün malzemeleri kaynak malzemeler olarak kullanılabilir. Geopolimerler tekrar eden sialat monomer (–Si–O–Al–O–) birimlerinden oluşur. Alüminosilikat malzemeleri aktive etmek için alkali

sıvılar kullanılmaktadır. Geopolimerizasyonda kullanılan alkali sıvılar genel olarak sodyum ve potasyum bazlı olan sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) sıvı alkalileridir. KOH, NaOH'a göre daha yüksek alkalilik seviyesine sahip olmasına karşın NaOH silikat ve alüminat monomerlerini serbest bırakmak için daha büyük kapasiteye sahiptir (Lloyd ve Rangan, 2010; Singh ve diğ, 2015).

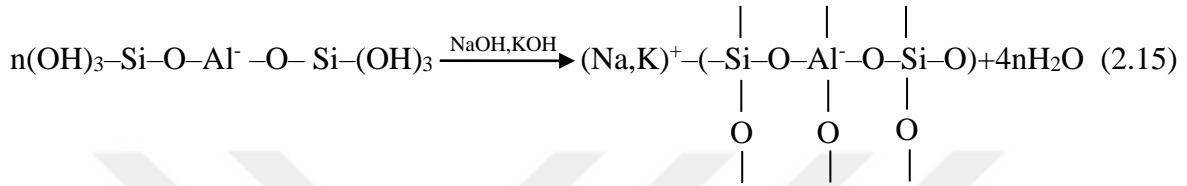
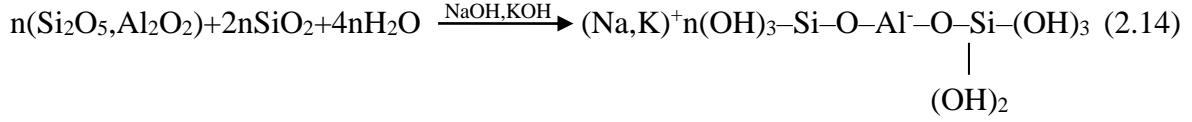
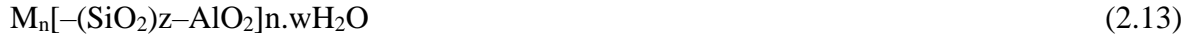
Geopolimerizasyon, belirli bir miktarda silis ve alüminayı çözmek ve ham madde partiküllerinin yüzey hidrolizini desteklemek için güçlü bir alkali ortam gereksinimi olan bir işlemdir. Bu gereksinim duyduğu ortam basit veya bileşik alkali çözeltiler kullanılarak elde edilmektedir (De Vargas ve diğ, 2011). Aktivatör tipi ve konsantrasyonu, reaksiyon ürünlerinin mikroyapısal gelişimi ve morfolojisi üzerinde önemli bir katkısı bulunmaktadır (Komljenović ve diğ, 2010). Geopolimerin basınç dayanımında aktivatör konsantrasyonu önemli bir etkiye sahiptir. İdeal aktivatör konsantrasyonu, geopolimerlerin dayanımının artmasında katkıda bulunmaktadır. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde alkali ile aktifleştirilen matriste bulunan serbest OH^- iyonları sebebiyle malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar meydana gelebilmektedir ve bu da malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilmektedir (De Vargas ve diğ, 2011). Belirli bir alkali aktivatör konsantrasyonundan sonra hammadde tipine bağlı olarak basınç dayanımında azalma başlar. Meydana gelen basınç dayanımındaki bu azalma esas olarak erken aşamalarda alüminosilikat jelin çökmesine neden olan aşırı hidroksit iyonlarından kaynaklanmaktadır (Part ve diğ, 2015).

Geopolimerizasyon oluşum süreci modellenmesi, Şekil 2.13'te aşamalı şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.13 : Geopolimerizasyon için kavramsal modelleme (Duxson ve diğ, 2007).

Geopolimerizasyon işlemi alkali koşul altında Si-Al mineralleri üzerinde oldukça hızlı ve ekzotermik bir reaksiyon içerir ve bu da üç boyutlu bir polimerik zincir ve Si–O–Al–O bağlarından oluşan halka yapı ile sonuçlanır. Aşağıdaki 2.13-2.15 nolu bağıntılarda geopolimerizasyon sürecinde meydana gelen şematik oluşum gösterilmektedir (Shi ve diğ, 2012; Davidovits, 1991; Van Chanh ve diğ, 2008).



Burada M alkali element, z ifadesi 1, 2 veya 3 şeklinde ve n geopolimerizasyon derecesi olarak ifade edilmektedir.

Omer ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranına göre granüle yüksek fırın cürufu bazlı geopolimerik harçların yüksek sıcaklıklara (200, 400, 600 ve 800 °C) maruz bırakıldıktan önceki ve sonraki basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızları etkisini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda harçların basınç dayanımının artan sodyum silikat içeriği ile arttığı ve bu artan içerikle benzeri eğilim, yüksek sıcaklığa maruz kalma içinde belirlenmiştir. Genel davranış ise sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir ve ultrases geçiş hızları ölçümleri benzer bir davranış gösterdiğini bildirmişlerdir.

Jang ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktifleştirilen uçucu kül/cüruf hamurlarının özelliklerini deneysel çalışmalar ile sunmaktadırlar. Karışımlarda uçucu kül ve cüruf kullanarak 5 farklı cüruf-bağlayıcı oranlarında (0, 0.3, 0.5, 0.7 ve 1) bağlayıcılar hazırlanmıştır. NaOH çözeltisi ve sodyum silikat çözeltisinden bir alkali aktivatör hazırlanarak kullanılmıştır. Tüm örnekler oda sıcaklığında kürlenme koşulları altında hazırlanmıştır. Sonuçlar, yüksek cüruf içeriklerinin alkali ile aktifleştirilen uçucu kül/cüruf hamurlarının basınç dayanımını arttırdığını, fakat cüruf-bağlayıcı oranlarının %70 ve %100 olduğu durumlarda otojen rötre nedeniyle çatlaklar meydana getirdiği belirtilmiştir.

Park ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklıklara maruz kalan alkali ile aktive edilmiş uçucu kül/cüruf içindeki bağlayıcı jelin fizikokimyasal özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre basınç dayanımının 400 °C'ye maruz kalana kadar arttığı ve bu sıcaklığı aştıktan sonra basınç dayanımının azalmaya başladığı belirlenmiştir. 400 °C'nin altındaki sıcaklıklarda meydana gelen basınç dayanımı artışı, sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra gözenekliliği azaltan bağlayıcı jel ile ilişkilendirilmiştir. Kalsiyum alüminosilikat hidratın (C-A-S-H) dehidrasyonu ve sodyum alüminosilikat hidratın (N-A-S-H) oluşumu aynı anda meydana geldi ve gözenek yapısının mikro gözenekli durumdan mezo gözenekli duruma dönüşümünü sağlamıştır. Bağlayıcı jelin kristalleşmesi, gözeneklilikte bir artışı meydana getirdi ve böylece mukavemetin 400 °C'nin üzerinde azalmasına neden olmuştur. Aynı zamanda bu durum gözenek yapısının mezo gözenekli durumdan makro gözenekli duruma dönüşümünden sorumlu olmuştur. Yüksek sıcaklıkların etkisi altında gözeneklilik, mukavemet ile ters bir ilişkiye sahip olduğu ve bağlayıcı jel ilave oluşumu, dehidrasyon ve kristalleşme geçirince önemli ölçüde değişiklik gösterdiği belirtilmiştir.

Duan ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve metakaolin bazlı geopolimerlerin, yüksek sıcaklık ve asit saldırılarına karşı mikroyapılarını ve dayanımlarını incelemiştir. Uçucu kül ve metakaolinin sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri ile aktive edilmesiyle hazırlanan geopolimer numunelere ısı kütür uygulanmıştır. Geopolimer numuneler ve normal Portland çimentosu ile üretilen numuneler basınç dayanımı ve birkaç temel dayanıklılık parametreleri ile değerlendirilip kıyaslanmıştır. Geopolimer numunelerin, normal Portland çimentosu ile üretilen numunelere göre yoğun bir mikroyapıya sahip olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi altında ve asidik çözeltilere direnç açısından geopolimer numunelerde, normal Portland çimentosu ile üretilen numunelere göre nispeten daha az mukavemet kaybı ve daha düşük kütle değişimi meydana geldiği ifade edilmiştir. Geopolimerler numunelerin kütle kaybı eğrileri normal Portland çimentosu ile üretilen numunelere benzer, fakat normal Portland çimentosu ile üretilen numunelere göre nispeten daha düşük bir kayıp oluştuğu belirtilmiştir.

Cheng ve Chiu (2003) yaptıkları çalışmada, granüle yüksek fırın cürufunun geopolimer yapımında aktif bir dolgu malzemesi olarak kullanımını incelemiştir. Çalışmada geopolimer priz süresinin sıcaklık, potasyum hidroksit (KOH) konsantrasyonu, metakaolinit ve sodyum silikat ilavesi ile iyi ilişkili olduğu belirtilmiştir. Eklenen KOH konsantrasyonu artmasıyla priz sürelerinde de artış olduğu ifade edilmiştir. Geopolimer

priz sürelerinin 60 °C sıcaklıkta, oda sıcaklığına kıyasla daha kısa olduğu belirtilmiştir. Maksimum basınç dayanımının 79 MPa ulaştığı bulunmuş olup, mukavemetin artan metakaolinit ilavesiyle artış gösterdiği belirtilmiştir. Geopolimerlerin inşaat amaçlı imal edilebilir ve mühendislik uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir.

Tippayasam ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, daha yaygın olan NaOH ve Na₂SiO₃ alkali çözeltileri yerine KOH ve K₂SiO₃ alkali çözeltileri kullanarak geopolimer numuneler hazırlamışlardır. Çalışmada, KOH konsantrasyonunun, kür sıcaklığının ve ısıtılmanın metakaolin bazlı geopolimerlerin özelliklerine etkisi araştırılmıştır. KOH konsantrasyonları 6, 8, 10, 20, 30 ve 40 M olarak seçimi yapılmıştır. 24 saat süresince 40 °C ve 60 °C'de kürleme sıcaklıkları, K₂SiO₃/KOH oranları 1 ve 1.5 olan numunelere uygulanmıştır. Sonuçlara göre 40 °C'de 24 saat boyunca kürlenmiş ve 550 °C ısıtılma işlemi gören 10 M KOH konsantrasyonuna sahip geopolimerin 28 günde en yüksek basınç dayanımı verdiği belirtilmiştir. Isıtılma işlemi, uygulanan ısı ile suyu geopolimer yapıdan uzaklaştırmasından kaynaklı geopolimer gözenekliliğinin artmasına yol açmıştır. Bu nedenden dolayı geopolimer numunelerde yoğunluk azalırken, su emme ve gözenekliliğinde artış olduğu belirtilmiştir. Isıtılma işlemi görmüş numunelerin mikroyapısı ısıtılma işlemi görmemiş geopolimer numunelerden daha olgun geopolimer matrisine sahip olduğu ve seramik benzeri özelliğe sahip olduğu ifade edilmiştir.

Zhang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonların yangına dayanıklılık bakımından normal Portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara pratik bir alternatif olabileceğini araştırmışlardır. Metakaolin ve uçucu kül karışımı ile üretilen geopolimerler numuneleri aktif hale getirmek için potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K₂SiO₃) çözeltileri kullanarak hazırlamışlardır. Numuneler ortam sıcaklığında, 100, 300, 500 ve 700 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerdeki sonuçlara göre geopolimer beton 300 °C'ye kadar aderansında önemsiz bir azalma gösterirken 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde bozulmalara uğradığı belirtilmiştir. Geopolimer beton, benzer basınç dayanımına sahip normal Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre benzer veya daha iyi aderans özellikleri gösterdiği ifade edilmiştir.

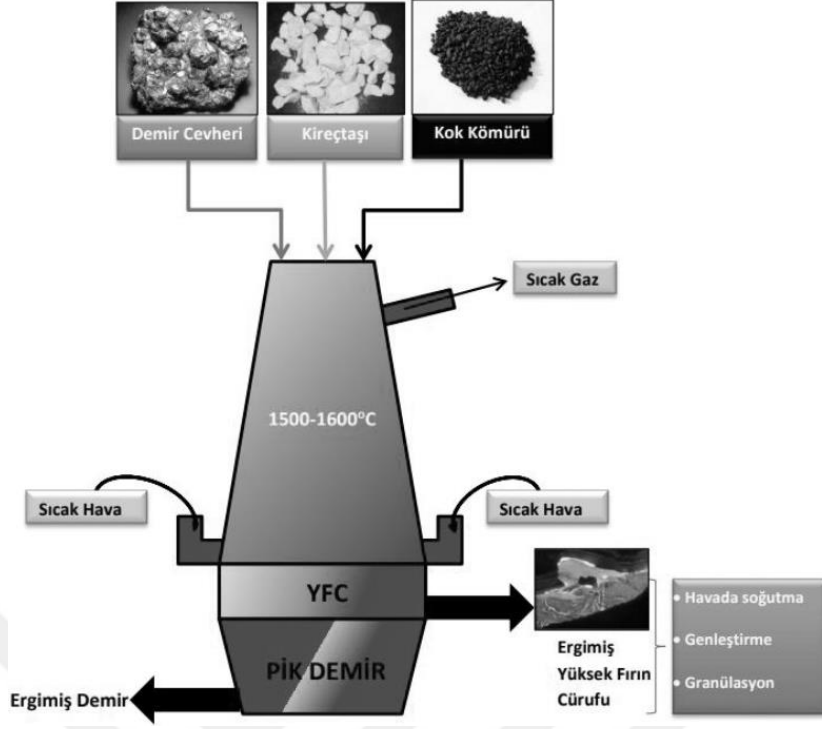
Chithambaram ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, uçucu küle granüle yüksek fırın cürufunun kısmi ikamesi ile oluşturulan geopolimer harçlar, alkali aktivatör çözeltileri olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonunu kullanarak hazırlamışlardır.

Geopolimer harçların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını incelemek için uçucu külün %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında granüle yüksek fırın cürufu ile değiştirilmiştir. Uçucu kül/granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçlarda 8 M, 10 M, 12 M ve 14 M NaOH konsantrasyonları kullanılmıştır. Geopolimer numuneler ayrıca kül fırınlarında 200 °C ile 1000 °C arasında her 200 °C sıcaklık aralığında değişen yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış olup basınç dayanımı değişimi ve buna karşılık gelen ağırlık kaybı incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer harçların basınç dayanımı üzerinde etkisinin, sıcaklık artışı ile ağırlık kaybı arasında doğrudan bir ilişkisi olduğu belirtilmiştir.

2.5.4.1 Yüksek fırın cürufu

1862 yılında Almanya'da Emil Langen tarafından öğütülmüş yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılığı keşfedilmiştir. İlk kez yüksek fırın cürufu çimento, 1865 yılında Almanya'da bir fabrikada üretimi gerçekleştirilmiştir. Almanya'da 1892 yılında Portland çimentosu klinkerinin granüle yüksek fırın cürufu ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen Portland yüksek fırın cürufu çimentosu üretimi başlamıştır. 1889'da bu cüruf içeriğine sahip çimento, Paris'te bir yeraltı metrosu yapımında kullanılmıştır. 1950 yılında yüksek fırın cürufunun beton katkı malzemesi olarak kullanılması çeşitli ülkelerde başlamıştır (Akbulut, 2020; Uğurlu, 2020).

Yüksek fırın cürufu, demir üretimi sırasında açığa çıkan bir yan üründür. Ana malzeme olarak demir üretimi için demir cevheri, kok kömürü ve kireç taşı kullanılmaktadır. Kireç taşı demir cevherinin ayrışma işleminde yardımcı rol oynarken kok kömürü ise yakıt olarak kullanılmaktadır. Uygulanan sıcaklığın yaklaşık 1600 °C'ye ulaşması ile demir cevherlerinin yüksek fırınlarda oksijenlerden ve yabancı maddelerden arındırılması ile demir elde edilmektedir. Yüksek sıcaklık sonucunda oksijen ile kok kömürü karbonunun birleşmesinden kaynaklı oluşan karbon monoksitle karbon dioksit gazları ortamı terk etmesiyle geriye eriyik durumda demir ve eriyik durumda cüruf (yabancı maddeler topluluğu) kalmaktadır. Yan ürün olan cürufun bünyesinde yüksek oranda silika, kalsiyum oksit ve alümina bulunmaktadır. Ayrışma sürecinde yüksek fırın cürufları, eriyik haldeki demirin üst kısmında toz şeklinde bulunur ve fırından hammadde ile birlikte ayrı ayrı tahliye işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.14'te yüksek fırın cürufunun üretim şeması gösterilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Mollaismailoğlu, 2020; Alıyev, 2019).



Şekil 2.14 : YFC üretim şeması (Alıvey, 2019).

Oldukça yüksek sıcaklıkta bulunan YFC suya dökülerek veya başka bir işlemle çok hızlı soğutulduğu takdirde amorf yapıda granüle halde iri kum taneleri büyüklüğünde ince bir malzeme haline gelmektedir. Bu hali ile beton üretiminde ince malzeme şeklinde kullanılabilirdiği gibi öğütüldüğü takdirde ise çimento üretiminde ve beton katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Yüksek sıcaklıkta bulunan YFC havada yavaş bir şekilde soğutma işlemi uygulandığı durumda ise yapısı kristal olmaktadır (Topçu ve Canbaz, 2008; Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

YFC inşaat sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanımı ile oldukça fazla kullanım alanlarına sahiptir. Bu alanlardaki uygulamalar; asfalt betonu, Portland çimento betonu, mimari dekoratif yapılar, barajlar, köprüler, tüneller, arıtma tesisleri, nükleer tesisler, kanalizasyon boruları, menfezler, otoyollar ve endüstriyel zeminler vb. gibi çeşitli uygulamalardır (Uğurlu, 2020; Mollaismailoğlu, 2020).

YFC'nin kullanımının çimento ve beton üzerinde birçok etkisi bulunmaktadır. YFC, çimento hamurunun daha boşluksuz ve geçirimsiz bir yapıda bulunmasını sağlar. Bu nedenle su ile beraber çimento hamurunda zararlı kimyasalların geçişini önler. Donma-çözünme, sülfat saldırıları, klor ve asit saldırısı, alkali silika reaksiyonu gibi birçok betona

hasar verecek olumsuz duruma karşı çimento hamurunun korunmasını sağlayarak dayanıklılığa katkı sağlar. YFC, priz süresini uzatır ve hidrasyon ısısının düşürülmesini sağlar. Bu da sıcak havalarda kütle betonların dökülmesine imkan sağlamaktadır. Bu özelliklerine ek olarak daha yüksek ileri dönemlerde dayanım, işlenebilirlik, çelik korozyon direnci gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da bulunabilmektedir. Daha düşük erken dayanıma sahiptir ve erken prizin istendiği soğuk hava koşullarında kullanıma uygun değildir (Richardson, 2006; Siddique, 2007; Çiftçi, 2020).

Topçu ve Canbaz (2008) yaptıkları çalışmada, YFC'yi çimento yerine % 0, 25, 50, 75, 100 oranlarında ikame ederek hazırlamışlar ve YFC'yi aktive etmek için sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat kullanmışlardır. 7x7x7 cm boyutlarında hazırladıkları harç numuneleri 28 gün kür edildikten sonra donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış ve kontrol numunelerde dayanım ve diğer fiziksel kayıplar incelenmiştir. Donma-çözülme etkisi altında kalan harçların çevrim sayısı arttıkça bağıl birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülleri, basınç dayanımları azalmıştır. Aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda bu azalmalar genel olarak düşmüştür. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen %100 oranında YFC içeren numunelerde birim ağırlık açısından en avantajlı sonuçlar elde edilmiştir.

Bingöl (2018) yaptığı çalışmada, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu aktive etmek için sodyum meta silikat aktivatörünü kullanarak üretilen geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Geopolimer harçların deney sonuçlarını karşılaştırabilmek için Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) kullanılarak üretilen harçlar kontrol harçları olarak belirlenmiştir. Sodyum oranları %4, %8 ve %12 olacak şekilde harçlar üreterek 1 gün etüvde 75 °C sıcaklıkta, 28 gün havada ve 28 gün suda kür ederek durabilite deneyleri yapmıştır. Ürettikleri numunelere yüksek sıcaklık (300, 600 ve 900 °C), rötre, aşınma, asit etkisi, baz etkisi, karbonatlaşma, hızlı klor geçirimsizliği, ıslanma-kuruma, birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve işlenebilirlik deneyleri uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. YFC'li geopolimer harçların kontrol harçlarına kıyasla daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Gürkan ve Türkmen (2020) yaptıkları çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Bu bağlayıcı malzemeleri aktive edebilmek için iki farklı alkali aktivatör (NaOH ve KOH) kullanarak 3 farklı konsantrasyonda (8 M, 10 M ve 12 M) üretim gerçekleştirilmiştir. Geopolimer

numuneler, uçucu küle %0, 25 ve 50 oranlarında YFC ikamesi ile 3 farklı karışım oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Üretilen numunelere 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin sonunda basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre YFC ikame oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımında da artış olduğu ifade edilmiştir.

Delhomme ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufundan üretmiş oldukları harç numunelerin davranışlarını incelemiştir. Portland çimentosuna %0, 20, 50 ve 80 oranlarında ikame edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu harçları yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Harç numunelerinin 20, 150, 300, 600 ve 900 °C sıcaklık değerlerindeki etkisinde dayanım deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeriğine (%80 öğütülmüş granüle YFC ikamesi) sahip geopolimer harçların basınç dayanım değerleri 150 °C'ye kadar artış gözlenmiş olup bu sıcaklık derecesinden sonra dayanımda düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Chore ve Joshi (2015) yaptıkları çalışmada, puzolanik atık malzemelerden üretilmiş betonun mukavemet karakterizasyonunu incelemiştir. Normal Portland çimentosuna uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler ikame edilmiştir. İkame oranları 8 deneme karışımından oluşmuş olup puzolanik malzemeler bu deneme karışımlarında değişen oranlarda ve kendi aralarında eşit olacak şekilde ilavesi yapılmıştır. Betonun işlenebilirliğinin artırılması için kimyasal katkı da eklenmiştir. 7, 28, 40 ve 90 günlük basınç mukavemetleri değerlendirilirken 7, 28 ve 40 günlük eğilme ve çekme dayanımları değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre kullanılan puzolanik malzemelerin çimento ile birlikte sürdürülebilir beton sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Topal ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların karışımlarında nehir agregası yerine %0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında geri dönüştürülmüş beton agregası kullanarak geopolimer beton üretimi yapmışlardır. Bu numuneler farklı yüksek sıcaklıklara (100, 200, 400, 600 ve 800 °C) maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelere havada, fırında ve suda olmak üzere 3 farklı şekilde soğutma işlemi uygulanmıştır. Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, ağırlık kaybı, kılcal su geçirimsizliği ve su emme değerleri yapılan deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerinin mikroyapısındaki değişiklikler de incelenmiştir. Sonuçlara göre karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega kullanımının artması basınç dayanımını azaltmıştır. Geopolimer

numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla numunelerin ciddi şekilde etkilendiği ifade edilmiştir. Sıcaklık derecesinin artması ile ağırlık kaybı ve kılcal su geçirimsizlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Bağlayıcı malzemeler

İç beton numunelerin üretimi için CEM I 42.5 R (PÇ) çimentosu kullanılırken 5 grup sıva harcı için ise CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R (PKÇ), söndürülmüş toz kalker kireç (SKK80-T), kalsiyum alüminatlı çimento (KAÇ) ve yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı malzemeleri kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de kullanılan bağlayıcı malzemelere ait kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ 42.5 R	PKÇ 42.5 R	SKK80-T	KAÇ	YFC
SiO ₂	18.76	19.50	1.75	6.20	32.47
Al ₂ O ₃	5.19	6.01	0.35	50.00	9.94
Fe ₂ O ₃	3.68	3.88	0.20	2.70	1.25
CaO	63.47	59.98	89.50	38.80	32.45
MgO	1.67	1.88	1.00	0.80	9.31
Cl	0.01	0.01	-	-	0.01
Fiziksel Özellikleri					
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.12	3.06	-	3.25	2.86
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3938	4266	-	4000	3996
Yoğunluk (kg/dm ³)	-	-	0.45-0.50	-	-
İncelik-90 mikron üzeri (%)	-	-	6-7	-	-

3.1.1.1 CEM çimentosu

Elazığ SEZA çimento firmasından CEM I 42.5 R ve CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R çimento tipleri temin edilmiştir. Çizelge 3.1’de CEM çimentolarına ait kimyasal bileşenler ve fiziksel özellikler verilmektedir.

3.1.1.2 Söndürülmüş toz kalker kireç

Sarsılmaz SKK80-T söndürülmüş toz kalker kireci sıvada bağlayıcı malzeme olarak PKÇ ile birlikte eşit oranlarda hazırlanarak kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de söndürülmüş toz kalker kirece ait temel karakteristik özellikler verilmektedir.

3.1.1.3 Kalsiyum alüminatlı çimento

ÇİMSA firmasından kalsiyum alüminatlı çimento olarak Refro50 temin edilmiş olup sıvada bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de KAÇ malzemesine ait kimyasal bileşenler ve fiziksel özellikler verilmektedir.

3.1.1.4 Yüksek fırın cürufu

Çalışmada kullanılan YFC, Karabük ilindeki Karçimsa firmasından temin edilmiştir ve sıvada bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de YFC malzemesine ait kimyasal bileşenler ve fiziksel özellikler verilmektedir.

3.1.2 Aktivatörler

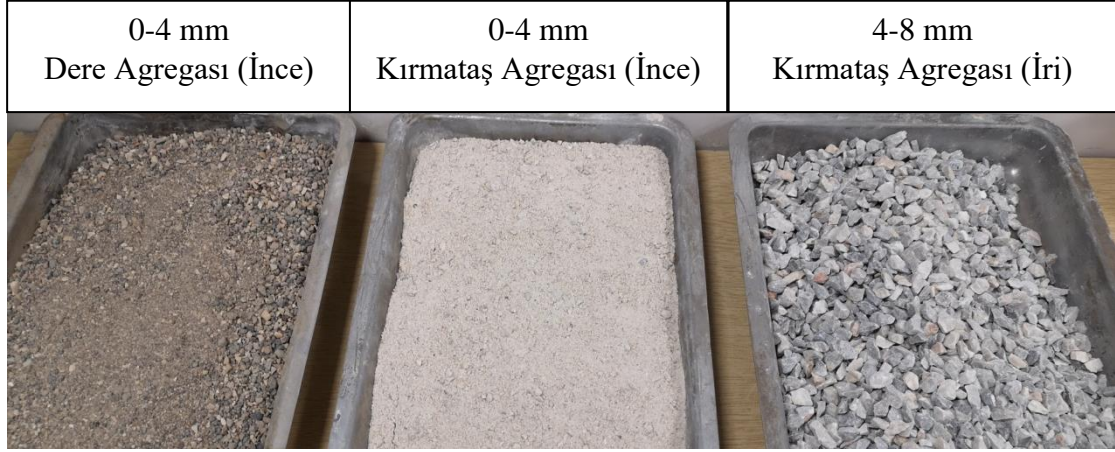
Bu çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinde sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) alkali aktivatörleri kullanılmıştır. Kullanılan aktivatörler musluk suyu kullanılarak konsantrasyonu 10 M olarak hazırlanmıştır ve temel karakteristik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Aktivatör özellikleri.

Özellikler	Sodyum Hidroksit	Potasyum Hidroksit
Molekül Formülü	NaOH	KOH
Molekül Kütlesi (g/mol)	40.00	56.10
Renk	Beyaz	Beyaz
Yoğunluk (g/cm ³)	2.13	2.12

3.1.3 Agregalar

Portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol beton numunelerinde ince ve iri agrega olarak kırmataş agrega kullanılmıştır. Kontrol beton numunelerde maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Kullanılan agregalar 0-4 mm (ince agrega) ve 4-8 mm (iri agrega) tane sınıflarında olacak şekilde belirlenip kullanılmıştır. Kontrol beton üretimindeki agregaların hacimce yüzdeleri ince agrega için %60, iri agrega için %40 olarak TS 802 (2016)'da bulunan optimum bölgeye uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Kontrol beton numuneleri kaplamak için yapılan sıva harçları üretiminde agrega olarak dere agregası (0-4 mm) kullanılmıştır. Kullanılan agrega çeşitleri ve tane aralığı Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Çalışmada kullanılan agregalar.

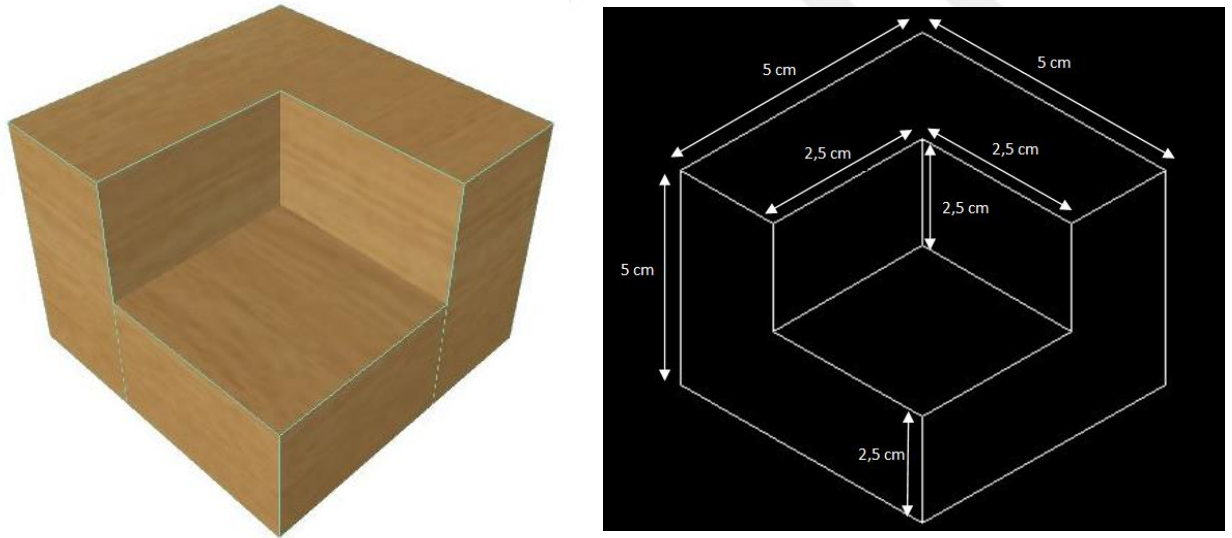
3.1.4 Aletler

3.1.4.1 Elek

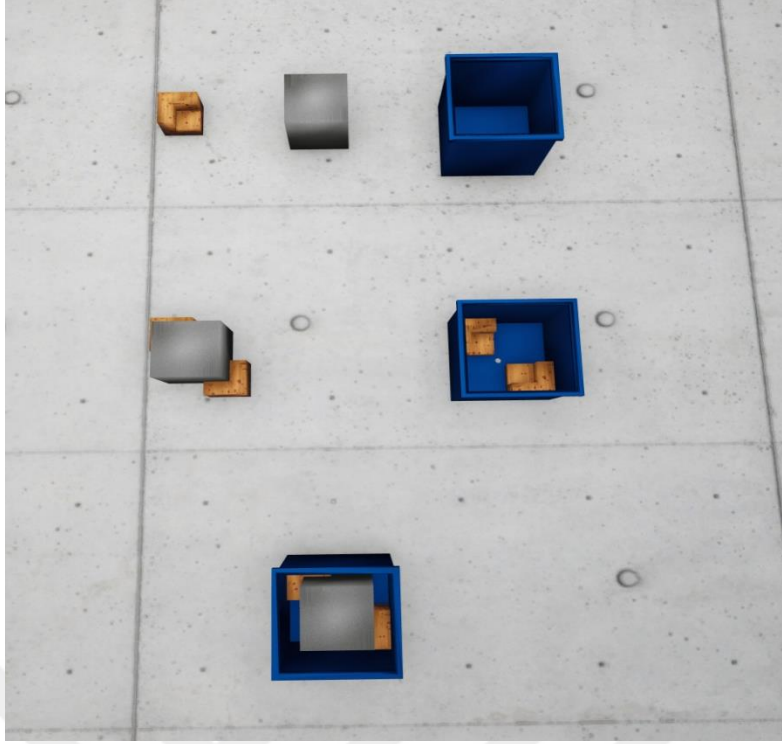
Kontrol beton numunelerinde ve sıva harçlarında kullanılan agregalar için TS ISO 3310-2 (2015)'ye uygun elekler kullanılmıştır.

3.1.4.2 Ahşap aparat

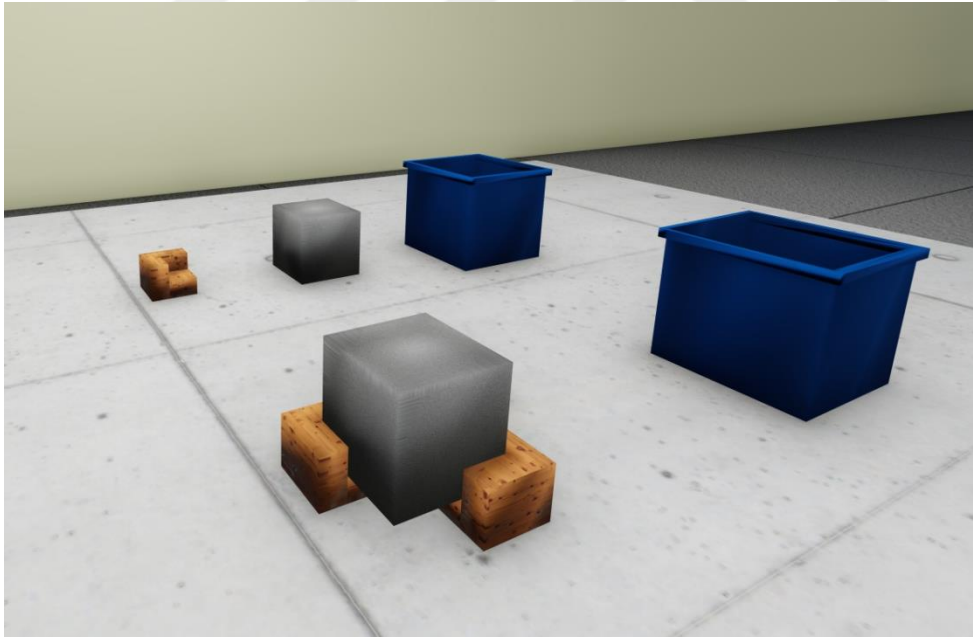
Kontrol beton numune yüzeylerinin 2.5 cm kalınlığında sıva harçları ile kaplanabilmesi için 150x150x150 mm boyutlu plastik kalıpların çarpaz alt iki köşesine ahşap aparatlar yerleştirilmiştir. Kullanılan ahşap aparatlar, 150x150x150 mm boyutlu plastik kalıplara kontrol beton numunelerin yerleştirilmesi ile her kenarında 2.5 cm boşluk bırakarak ortalananmış bir şekilde kalmasını sağlamaktadır. Numunelerin yüzeyleri ile kalıp yüzeyleri arasında kalan 2.5 cm'lik boşluğun sıva harcı ile doldurulması için gereken hacim 2375 cm³'tür ve numunenin içine çarpaz iki ahşap aparat kullanılacağı için iki ahşap aparatın toplam hacmi 218.75 cm³'tür. Bir numunede sıva harcı dökümü yapılabilecek hacmin aparatlar %9.21'ini kapsayacağı için beton dökümü yapılacak hacim %90.79'dur. Aşağıda gösterilen şekillerde kullanılan ahşap aparat, ahşap aparat ölçüleri ve kontrol beton numunelerin ortalama aşamaları gösterilmektedir (Şekil 3.2-3.4). Üç boyutlu çizimler için ArchiCAD 12 ve Autocad 10 programlarından ve renderlerin alınmasında Lumion 8.5 programından yararlanılmıştır.



Şekil 3.2 : Ahşap aparat ve ölçüleri.



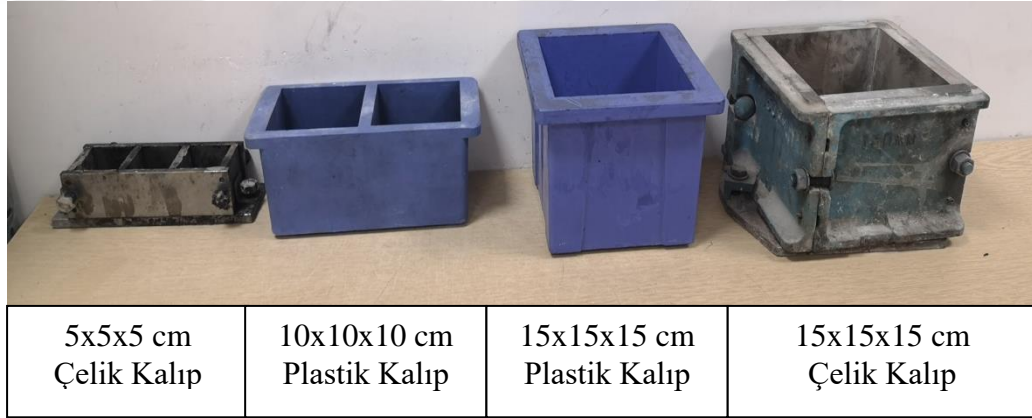
Şekil 3.3 : Kontrol betonun kalıplarda ortalanma aşamaları.



Şekil 3.4 : Kontrol betonun ahşap aparatlar ile ortalanması.

3.1.4.3 Kalıplar

Kontrol beton numunelerin üretimi için 100x100x100 mm boyutlu plastik kalıplar kullanılmıştır. Üretilen kontrol beton numuneleri 2.5 cm kalınlığında sıva harçları ile kaplamak için ahşap aparatlar ile birlikte 150x150x150 mm boyutlu plastik kalıplar kullanılmıştır. Sonrasında ise 150x150x150 mm boyutlu plastik kalıplardan çıkarılan sıvalı numunelerin ahşap aparat gelen kısmında kaplanması için 150x150x150 boyutlu çelik kalıplar kullanılmıştır. Sıvada kullanılan bağlayıcılarla üretilen harç numuneler için 50x50x50 mm boyutlu çelik kalıplar ve 100x100x100 mm boyutlu plastik kalıplar kullanılmıştır. Şekil 3.5'te kullanılan plastik ve çelik kalıplar gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Çalışmada kullanılan kalıplar.

3.1.4.4 Mikser

Şekil 3.6'da gösterilen mikser çalışmada kontrol beton ve sıva harç üretiminde kullanılan malzemeleri karıştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 3.6 : Çalışmada kullanılan mikser.

3.1.4.5 Etüv

Şekil 3.7’de gösterilen etüv, kontrol beton ve sıva harç üretiminde kullanılan agregaların hem özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesi amacıyla hem de su emme oranı tayini deneyinde kullanılmıştır.



Şekil 3.7 : Etüv.

3.1.4.6 Yüksek sıcaklık fırını

Üretilen kontrol beton numuneleri ve sıva harç numuneleri 100, 300, 500 ve 700 °C'lik yüksek sıcaklıklara 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Bu amaçla, Şekil 3.8'de gösterilen yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır.



Şekil 3.8 : Yüksek sıcaklık fırını.

3.1.4.7 Basınç dayanım cihazı

Kontrol beton ve sıva harç numunelerin basınç dayanımını tayin edebilmek için 3000 kN kapasitesine sahip tek eksenli basınç dayanım cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.9'da kullanılan basınç dayanım cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.9 : Basınç dayanım cihazı.

3.1.4.8 Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçüm cihazı

UPV ölçüm cihazı, ultrasonik dalgalar göndererek bu dalgaların belirli boyuttaki numunenin bir yüzeyinden diğer bir yüzeye ulaşmasına kadar geçen süreyi elektronik olarak ölçmektedir ve tahribatsız bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan UPV cihazı Proceq marka bir dijital ölçüm cihazıdır ve Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 : UPV cihazı.

3.1.4.9 Beton kesimi

Farklı tipte harçlarla kaplanan sıvalı beton numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra iç beton numunelerin sıva ile kaplandığı alan, iç betona ulaşabilmek için sanayi bölgesindeki mermer atölyesinde kesilmiştir. Kesim yapan makine numunelerin her 6 yüzeyinde 2.5 cm kalınlığı kesecek şekilde ayarlanmıştır ve iç beton yüzeylerine ulaşılmıştır. Şekil 3.11’de beton kesim makinesi gösterilmektedir.



Şekil 3.11 : Sıvalı numunenin kesimi.

3.2 Yöntem

3.2.1 Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Kontrol beton numuneleri için karışımlarda 0-4 mm ince agrega tane boyut aralığı ve 4-8 mm iri agrega tane boyut aralığı seçilmiş olup maksimum tane çapı 8 mm olan kırmataş agregası kullanılmıştır. Sıva harçlarının üretimi için ise ince agrega tane sınıfında olan (0-4 mm) dere agregaları kullanılmıştır. Üretimi yapılan numunelerin karışımlarında kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek için TS EN 932-2 (1999)’de belirtilen çeyrekleme yöntemi ile numuneler alınmış ve agrega deneylerine tabii tutulmuştur.

Çeyrekleme yöntemi, kullanılacak tüm malzemeyi temsil etmesi için yığının farklı bölgelerinden örnekler alınarak düz yüzeyli bir zemine çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra oluşturulan bu dairesel malzeme yığını kürekle dörde bölünüp karşılıklı iki parçası atılmıştır. Deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar bu döngü devam etmiştir. Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri TS EN 1097-6 (2013) standardına göre tespit edilmiştir.

Her bir deney için numuneler üzerinde üçer defa deneylere tabii tutulmuş olup sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Hem kontrol beton numunelerinde hem de sıva harçlarında kullanılan agregaların üzerinde yapılan deneyler ve elde edilen veriler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.2 Üretilen numunelerin karışım oranlarının belirlenmesi

3.2.2.1 Kontrol beton numunelerinin karışım oranları

Kontrol beton olarak üretilen numuneler için bağlayıcı malzeme olarak Portland Çimentosu kullanılmıştır. Kontrol beton numuneleri bütün parametreler için standart olarak aynı karışım oranlarında üretilmiştir. Beton karışım hesabı, en büyük agrega tane büyüklüğü (D_{max}) 8 mm olarak belirlenmiş olup TS 802'ye göre yapılmıştır. Bağlayıcı, hapsolmuş hava ve su hacimlerinin 1 m³'den çıkarılması ile toplam agrega hacmi bulunmuştur. Hazırlanan su/çimento oranı 0.43 olan kontrol betonların çimento, iri agrega ve ince agrega malzemelerinin 1 m³'teki ağırlık miktarları sırasıyla 512, 614.02 ve 878.85 kg'dır. Çizelge 3.3'te kontrol beton numunelerinin karışım oranları verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Kontrol beton numunelerinin karışım oranları

Beton Bileşenleri	kg/m ³
Çimento	512
Su	220
İnce Agrega	614.02
İri Agrega	878.85

3.2.2.2 Sıva harçlarının karışım oranları

Üretilen sıva harçların isimlendirilmesi bağlayıcı malzeme tipine göre yapılmıştır. Kullanılan bağlayıcılar; Portland Kompoze Çimentosu, kütlece eşit Kireç-Portland Kompoze Çimentosu karışımı, Kalsiyum Alüminatlı Çimento, NaOH alkali aktivatörü ile aktive edilen YFC bağlayıcı malzemeli geopolimer, KOH alkali aktivatörü ile aktive edilen YFC bağlayıcı malzemeli geopolimer olarak 5 farklı karışım tipinden oluşmaktadır ve isimlendirilmesi sırasıyla PK, K-PK, KA, G-Na ve G-K olarak belirlenmiştir. Her bir tip bağlayıcı karışımı ile hazırlanan sıva harçlarının karışım oranları; bağlayıcı/kum oranı 1:3, çözelti/bağlayıcı veya su/bağlayıcı oranları kıvam sınıfı TS EN 206-1 (2014)'e göre S4 (160-210 mm) sınıfında olacak şekilde, geopolimer harç numunelerinde kullanılan alkali aktivatörler ise 10 M konsantrasyona sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Çizelge 3.4'te üretilen numunelerin karışım oranları gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 : Sıva harçlarının karışım oranları.

Malzemeler	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
Çimento, (g)	500	250	-	-	-
Kireç, (g)	-	250	-	-	-
KAÇ, (g)	-	-	500	-	-
YFC, (g)	-	-	-	500	500
Kum (0-4 mm), (g)	1500	1500	1500	1500	1500
Su, (g)	266.89	374.22	241.69	223.13	193.90
Çözelti, (g)				312.38	302.68
NaOH, (g)	-	-	-	89.25	-
KOH, (g)	-	-	-	-	108.78

3.2.3 Kontrol beton ve sıva harçlarının üretimi ve kür edilmesi

Kontrol beton ve sıva harçları için karışımda kullanılacak tüm malzemeler 1 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. YFC bağlayıcı malzemeli geopolimer harçlar için hazırlanan alkali aktivatörler belirlenen konsantrasyonda hazırlanmış olup çözelti homojen olana kadar karıştırma işlemi sürmüştür. Beton için bağlayıcı, su, ince agrega ve iri agrega karışım

malzemeleri, sıva harçları için ise bağlayıcı, su veya çözelti ve ince agrega karışım malzemeleri mikserde karıştırılmıştır. Üretilen numuneler kalıplara yerleştirilmeden önce, numuneler sertleştikten sonra kolayca çıkabilmesi için kalıp yüzeyleri kalıp ayırıcı yağ ile yağlanmıştır.

Üretilen kontrol beton numuneleri 100x100x100 mm boyutundaki plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Kontrol beton numuneler kalıplara yerleştirilirken, taze beton tabaka tabaka dökülüp (yaklaşık olarak kalıp yüksekliğinin 1/3'ü kadar) şişleme çubuğu ile sıkıştırma sağlanmıştır ve kalıp yüzeyleri mala yardımı ile düzeltilmiştir. Bütün kontrol beton numuneler 28 gün havada kür edilmiştir ve sıvası yapılacak kontrol betonlar 28 günlük kür süresinin ardından sıva ile kaplama işlemi yapılmıştır.

28 günlük kür süresini tamamlayan kontrol betonlar 150x150x150 mm boyutlu plastik kalıplara ahşap aparat vasıtasıyla ortalanacak şekilde yerleştirilmiştir. Üretilen sıva harçlarını kalıplara yerleştirme esnasında sıkıştırma işlemi için şişleme çubuğu ve tokmak kullanılmıştır. Yerleştirilmesi tamamlanan sıvalı betonlar 24 saat sürenin ardından kalıplardan çıkarılıp üst yüzeyinden ters çevrilerek ahşap aparatları çıkarılmıştır ve sonra 150x150x150 mm boyutlu çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Ahşap aparatları alınan sıvalı betonların çelik kalıplara yerleştirilmesindeki amaç, iç betonu ortalayabilmek için kullanılan ahşap aparatların oluşturduğu boş kısımları doldurmaktır. Üretilen sıvalı beton numuneler 7, 14 ve 28 gün havada kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklık fırınında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır.

Sıva harç numuneleri için hazırlanan harçlar 5x5x5 mm boyutlu çelik kalıplara yerleştirilmiştir ve üretilen harçlar 7, 14 ve 28 gün havada kür edilmiştir. Su emme oranı tayini için hazırlanan sıva harçları 10x10x10 mm boyutlu plastik kalıplara yerleştirilmiştir ve 28 gün havada kür edilmiştir.

3.2.4 Taze beton deneyi

3.2.4.1 Çökme deneyi

TS EN 12350-2 (2019) standardına göre üretilen numunelere çökme (slump) deneyi uygulanmıştır. Taban çapı 200 ± 2 mm, üst yüz çapı 100 ± 2 mm ve yüksekliği 300 ± 2 mm olan içi boş kesik huni içine üretilen betonların doldurulması, çökme hunisine eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, çökme hunisi yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde yapılmıştır. Doldurma sırasında

her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminin ardından çökme hunisi üst seviyesinden taşan fazla beton, sıkıştırma çubuğu ile sıyrılıp alınmış olup yüzey tesviyesi yapılmıştır. Çökme hunisi, el tutamaklarından tutularak düşey şekilde yukarı doğru çekilmiş olup bu işlem 5-10 saniye arasındaki sürede tamamlanmıştır. Çökme hunisinin alınmasından sonra, çökme hunisinin üst seviyesi ile çöken beton kütesinin en yüksek noktası arasında çökme mesafesi ölçülmüştür. Tüm deney işlemi betonun çökme hunisine doldurulmaya başlanmasından, çökme hunisinin çekilerek alınmasına kadar kesinti olmaksızın 150 saniyede tamamlanmıştır. Şekil 3.12’de çökme deneyi aletleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Çökme deneyi aletleri.

3.2.5 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

3.2.5.1 Basınç dayanımı tayini

TS EN 12390-3 (2019) deney standardına göre üretilen kontrol beton (100x100x100 mm boyutunda), sıvası alınmış iç beton (100x100x100 mm boyutunda) ve sıva harç numunelerinin (50x50x50 mm boyutunda) basınç dayanımları tayin edilmiştir. Numuneler deney cihazına yerleştirilmeden önce numunelerin deney cihazındaki numuneye temas edecek yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temiz bir hale getirilmiştir. Üretilen küp

numuneler basınç deneyi cihazına, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirme işlemi yapılmıştır. Basınç cihazının yükleme hızı, numune boyutları tanımlandığında cihaz tarafından otomatik olarak ayarlanmaktadır.

Bağıntı 3.1’de numune basınç dayanımı denklemi verilmektedir. Basınç dayanımını belirleyebilmek için her gruptan üçer adet üretilmiştir ve bu üretilen üç numunenin basınç dayanım değerlerinin ortalaması olarak kaydedilmiştir.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²)

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm².

3.2.5.2 Su emme oranı tayini

Su emme oranı tayini, numunelerin emmiş oldukları su miktarını ağırlık oranınca ifade eden tayin yöntemidir. Bu deney yöntemi TS 12390-7 (2019)’de belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir deneyin sonucu 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. İlk etapta numuneler 24 saatlik periyotlar halinde etüvde kuru ağırlığa gelmesi sağlanmış ve sonrasında etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına gelen numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen ağırlıklar arasındaki fark en küçük olan ağırlığın %0.2’sinden az olduğu durumda numunenin etüv kurusu ağırlığa ulaştığı kabul edilmektedir. Daha sonra etüv kurusu duruma gelen numuneler 23±1 °C sıcaklığında bulunan kür havuzuna yerleştirilmiştir ve sonra sudan çıkarılıp üzerindeki suyun havlu yardımıyla alınmasıyla tartılarak ıslak ağırlığı belirlenmiştir. Sudan çıkarılan numuneler tekrar 24 saat süre boyunca içinde kalmak üzere kür havuzuna yerleştirilmiştir. Bu sürenin sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler yüzey ıslaklığı alınıp tartılmıştır. Birbirini izleyen iki tartım arasındaki fark büyük olan ağırlığın %0.2’sinden az olana kadar bu döngüye devam edilmektedir ve %0.2’sinden az olduğu takdirde numunelerin doygun kuru yüzey ağırlığına geldiği kabul edilmektedir.

Sıva harcı numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki su emme oranı belirlenirken yukarıda açıklanan yöntem kullanılmıştır. Yalnızca fırından çıkarılan numuneler tekrar etüvde kuru ağırlığına gelmesi yerine oda sıcaklığına getirilerek ağırlıkları ölçülmüştür. Bağıntı 3.2’de numunenin ağırlıkça su emme oranı denklemi verilmektedir.

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

m_1 : Ağırlıkça su emme oranı, (%)

A: Etüv kurusu ağırlık, (gr)

B: Doygun kuru yüzey ağırlık, (gr).

3.2.5.3 Ultrases geçiş hızının (UPV) belirlenmesi

ASTM C597’e göre numunelere ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Numune ölçümleri yapılmadan önce UPV cihazı kalibrasyonu yapılmıştır ve sonrasında numuneye ait ölçülecek yüzeyler arası mesafe cihaza girilmiştir. Ölçüm yapmadan önce ultrason jeli, cihazın uçları ile numunenin yüzeyi arasında kalacak şekilde sürülmüştür. UPV cihazında ses dalga hızı, betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ile hesaplanmaktadır. Her bir numune için üçer defa ölçüm yapılmış ve bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Yapılan hesaplamalar bağıntı 3.3’te gösterilmektedir.

$$v = \frac{l}{t} \quad (3.3)$$

Burada;

v: Ses dalga hızı, (m/s)

l: Pundit yüzeyleri arası mesafe, (m)

t: Geçiş süresi, (s).

3.2.5.4 Ağırlık kaybı oranı tayini

Üretilen numunelerin, yüksek sıcaklık etkisinde meydana gelen deformasyonları belirlemek için numunelerin ağırlık kayıpları tayin edilmiştir. 1 g hassasiyetli terazide yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları tartılıp aralarındaki farkın 100'e oranlanmasıyla ölçümler yapılmıştır. Ağırlık kaybı tayinleri her 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır ve bu hesaplama bağıntı 3.4'te gösterilmektedir.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \left(\frac{W - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Burada;

W_0 : Numunenin yüksek sıcaklık etkisinden önceki ağırlığı, (g)

W : Numunenin yüksek sıcaklık etkisinden sonraki ağırlığı, (g).

3.2.5.5 Birim hacim ağırlık (BHA) tayini

Numunelerin birim hacim ağırlıklarının tayini, numunelerin kuru ağırlıklarının numune hacimlerine bölünmesiyle hesaplama işlemi yapılmıştır. Her bir karışım için elde edilen 3 adet numunenin birim hacim ağırlığının aritmetik ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

3.2.5.6 Yangın dayanımı deneyi

Üretilen numuneler 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin sonunda yüksek sıcaklık dayanımları belirlemek için yüksek sıcaklık fırınında hedeflenen sıcaklığa (100, 300, 500 ve 700 °C) ulaştıktan sonra bir saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra fırından çıkarılan numuneler, soğutma şekli olarak havada soğutma uygulanmıştır. Havada soğutma, numunelerin yüzeylerinin hava ile temasını sağlamak amacıyla fırından çıkarılıp dışarıda soğumaya bırakacak şekilde soğutma işlemidir. Çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin tamamı havada soğutma yapıldıktan sonra deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.13'te yüksek sıcaklık dayanımı için yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmiş numuneler gösterilmektedir.

3.2.5.8 XRD analizi

X-Işınları kırınım tekniği malzemenin içerdiği fazları belirlemek amacıyla kontrol beton ve iç beton numuneleri çok ince taneli boyutlar haline getirilmiş ve numunelerin analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Şekil 3.15'te numunelerin XRD analizinin yapıldığı cihaz gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : XRD cihazı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Kontrol betonların hazırlanmasında hem ince hem de iri agregada olarak kırmataş agregaları ve sıva harçlarının hazırlanmasında ise dere agregaları kullanılmış olup kullanılan bu agregaların özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde kuru yüzey doygun ağırlık, kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri ince agregada (0-4 mm) ve iri agregada (4-8 mm) için ayrı ayrı hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri.

Özellik	Kırmataş Agregası		Dere Agregası
	(0-4) mm	(4-8) mm	(0-4) mm
Kuru Yüzey Doygun Ağırlık, g/cm ³	2.50	2.62	2.46
Kuru Özgül Ağırlık, g/cm ³	2.43	2.58	2.40
Görünür Özgül Ağırlık, g/cm ³	2.60	2.69	2.55
Su Emme, (%)	2.80	1.60	2.40

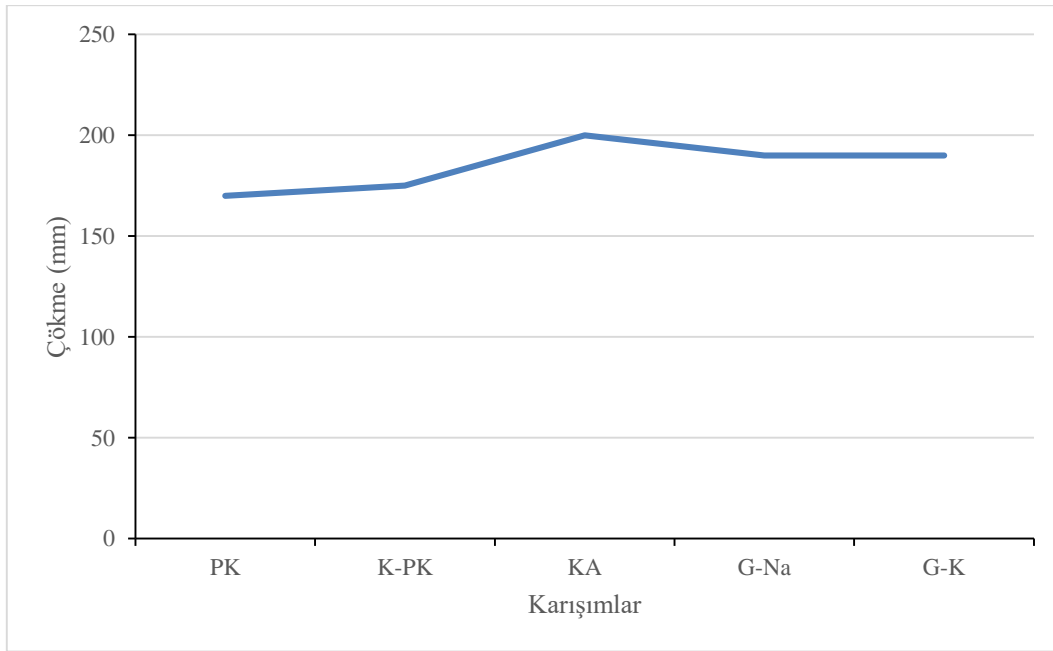
4.2 Taze Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

4.2.1 Sıva harçlarının çökme değerleri

150x150x150 mm boyutlu plastik kalıplara bir ayrıtı 100 mm olan kontrol beton numuneler ortalanarak yerleştirildiğinde sıva harçlarının sıkıştırılması için 2.5 cm’lik boşluk kalacağından işlenebilirliği yüksek bir sıva elde edilmesi gerekmektedir. Sıva harçlarının işlenebilirliği göz önüne alınarak su veya çözelti içeriği S4 kıvam sınıfında (160-210 mm) olacak şekilde ayarlanmıştır. Farklı bağlayıcı malzeme tipine sahip 5 farklı grupta (PK, K-PK, KA, G-Na ve G-K) değerlendirilen sıva harçlarına çökme deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Sıva harcı karışım gruplarında çökme değerleri.

Karışımlar	Çökme (mm)
PK	170
K-PK	175
KA	200
G-Na	190
G-K	190



Şekil 4.1 : Sıva harcı karışım gruplarında çökme değerleri.

4.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

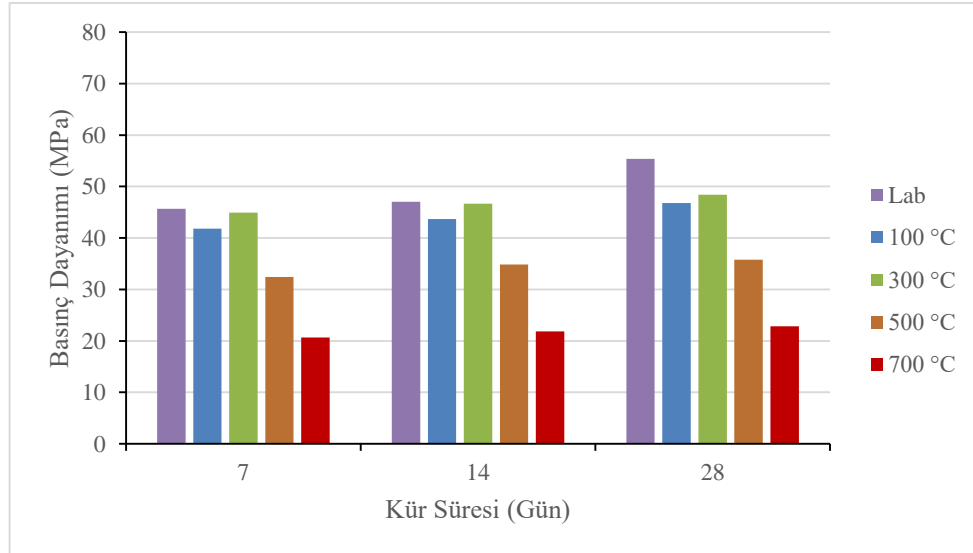
Hazırlanan kontrol beton, iç beton ve sıva harç numuneleri yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımı, UPV, su emme oranları, ağırlık kaybı oranları ve birim hacim ağırlık gibi betonun mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda sertleşmiş betonun mikroyapı analizleri de incelenmiştir.

4.3.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı

Sıva uygulanmamış beton numuneler kontrol grubu olarak seçilmiştir. Bu numuneler 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından laboratuvar sıcaklığında ve 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Sıcaklıklar	Basınç Dayanımı, (MPa)		
	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
Lab	45.65	47.05	55.38
100 °C	41.83	43.65	46.80
300 °C	44.90	46.68	48.44
500 °C	32.43	34.83	35.76
700 °C	20.65	21.85	22.83



Şekil 4.2 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Kontrol grubu numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde kür sürelerinin artmasıyla her sıcaklık aralığı için basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Genel olarak her kür süresi için numunelerin basınç dayanımlarında, 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde laboratuvar ortamına göre bir düşüş olsa da 300 °C sıcaklığa ulaşan numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir ve bu artışın otoklav etkisiyle oluştuğu düşünülmektedir. 300 °C'yi aşan sıcaklıklarda, sıcaklık arttıkça kontrol beton numunelerin dayanımında önemli bir azalma olduğu saptanmıştır. 28 günlük beton dayanımları ele alındığında laboratuvar ortamındaki numunelerin basınç dayanımına (55.38 MPa) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz kalan numunelerin dayanımlarında sırasıyla %15.49, %12.53, %35.43 ve %58.78 oranlarında kayıplar meydana gelmiştir.

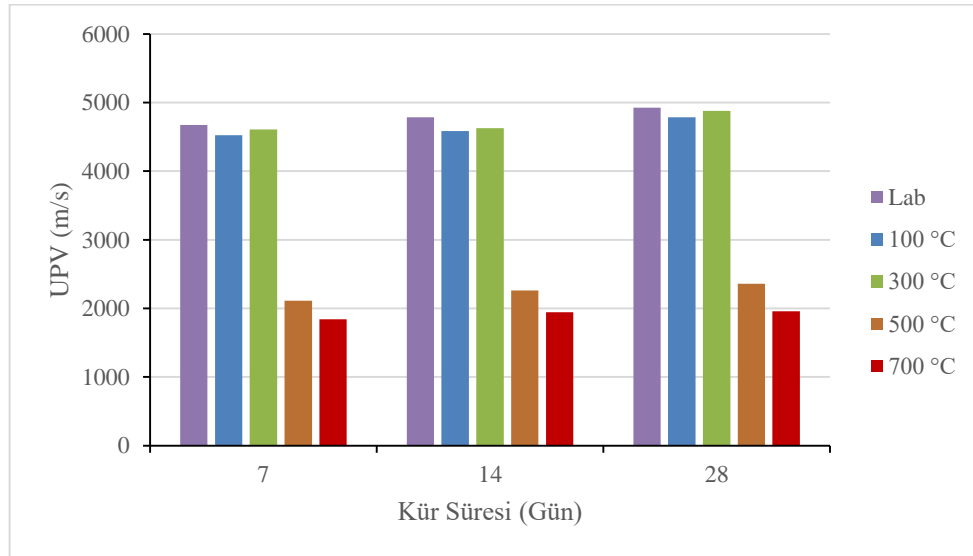
Demirel ve Keleştemur (2011) yaptıkları çalışmada, 800 °C'de sıcaklığa maruz kalan seride diğer 800 °C'nin altındaki sıcaklıklara maruz kalan serilere göre basınç dayanımlarında büyük bir düşüş olduğuna dikkat çekmiştir. Bu sıcaklık derecesinde kristal suyu kaybının yol açtığı Ca(OH)_2 miktarının azalması, betonun morfolojisinin değişimi ve çatlakların oluşumu basınç dayanımının düşmesine neden olduğunu belirtilmiştir. Orhan ve Şahin (2016) yaptıkları bir çalışmada, 90 günlük kontrol beton numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Elde edilen değerlere göre 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunenin basınç dayanımı 48.25 N/mm² değerinde iken 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunenin basınç dayanımı 52.08 N/mm² değerine çıkmıştır. Kantarcı (2013) yaptığı bir çalışmada, normal Portland çimento ile ürettiği beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri için basınç dayanımlarını ölçmüştür. Elde edilen sonuçlara göre kür süresinin artmasıyla basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Aynı zamanda normal Portland çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanım değerleri incelendiğinde 100 °C sıcaklıkta yangına maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı 32.32 MPa değerinde iken 300 °C sıcaklıkta maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı 33.76 MPa değerine çıkarak bir miktar artış olduğu saptanmıştır.

4.3.2 Kontrol numunelerinin UPV değerleri

Kontrol numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kr sürelerinin ardından laboratuvar sıcaklığında ve 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra UPV cihazı ile ultrases geçiş hızı değerleri llmştir. Elde edilen değerler izelge 4.4 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.

Sıcaklıklar	UPV lm değerleri, (m/s)		
	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
Lab	4672	4784	4926
100 °C	4524	4587	4784
300 °C	4608	4629	4878
500 °C	2114	2262	2358
700 °C	1841	1946	1956



Şekil 4.3 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.

Elde edilen UPV değerleri kr süresinin artmasıyla beraber artış gösterirken sıcaklığın artmasıyla beraber de 300 °C hariç azalış gösterdiği saptanmıştır. Bu azalmanın sebebi olarak sıcaklık arttıka betonda oluşan gözenekli yapı gelişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. UPV lçm değerleri 28 günlük beton numuneler için en yüksek değeri laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde 4926 m/s iken 700 °C sıcaklıkta yangına maruz kalmış numunelerde 1956 m/s olarak lçlmştir. UPV sonuçlarının basınç dayanımı ile paralellik gösteridiği saptanmıştır. Beton basınç dayanımının azalmasıyla beraber UPV değerlerinin de azaldığı tespit edilmiştir.

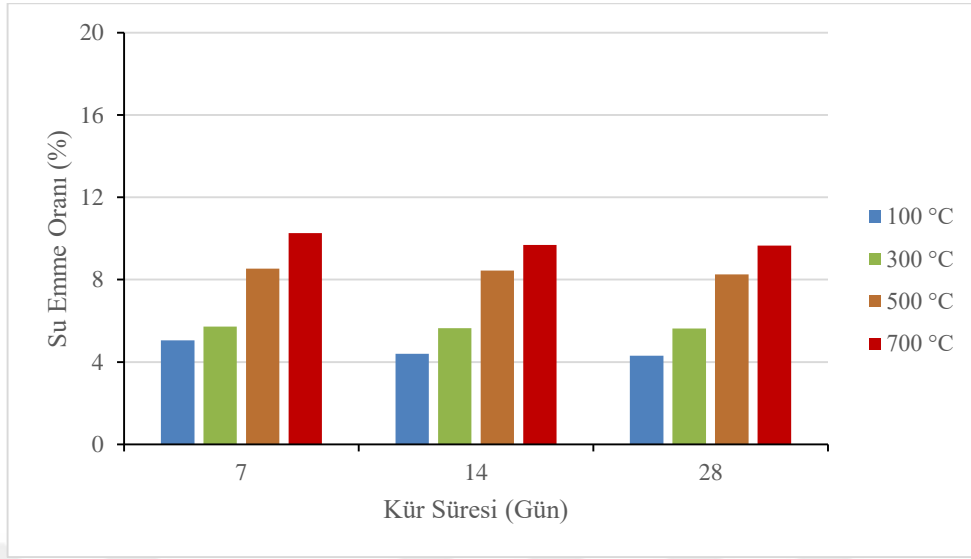
Hwang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz kalan beton numunede sürekli olarak ölçülen ultrasonik darbe hızında göreceli bir azalma yoluyla betondaki hasarın tespitinin mümkün kılındığını belirtmişlerdir. Kirchhof ve diğ. (2015), yangından zarar gören betonda gözenek ve geçirgenliğin artması nedeniyle UPV değerlerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalarda üretilen beton numunelerin UPV değerlerinin, numunelerin maruz kaldığı sıcaklığın artması ile azaldığı belirtilmiştir (Yang ve diğ, 2009; Arioz, 2009).

4.3.3 Kontrol numunelerinin su emme oranları

Kontrol numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kr sürelerinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra su kr uygulanarak su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler izelge 4.5 ve Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük su emme oranları.

Sıcaklıklar	Su emme oranı, (%)		
	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
100 °C	5.06	4.40	4.30
300 °C	5.71	5.64	5.62
500 °C	8.54	8.45	8.25
700 °C	10.27	9.68	9.66



Şekil 4.4 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük su emme oranları.

Elde edilen su emme değerleri kür süresinin artmasıyla düşüş gösterirken ve sıcaklığın artmasıyla beraber artış göstermektedir. 28 günlük 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde su emme oranları sırasıyla %4.30, %5.62, %8.25 ve %9.66 olarak bulunmuştur.

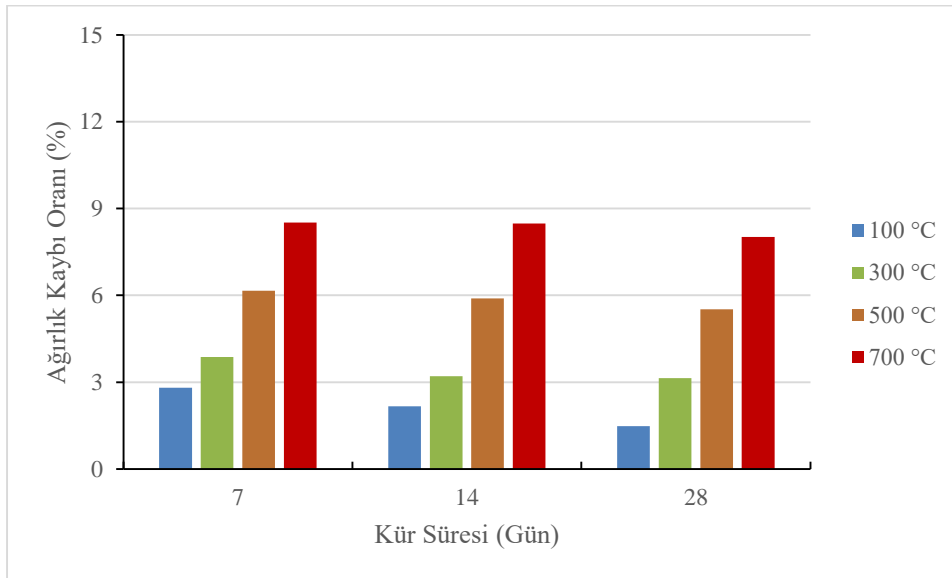
Chen ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, ürettikleri tüm beton karışımları için hedef sıcaklığın artması ile kütle kaybının arttığını belirtmişlerdir. Artan kütle kaybının nedeni olarak beton bünyesindeki jel suyunun, C-S-H içinde bulunan kimyasal bağlı suyun, kılcal ve fiziksel emilen suyun buharlaşması yoluyla betondan dışarı çıkmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Kantarcı (2013) yaptığı çalışmada, normal Portland çimentosu ile ürettiği beton numuneleri 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık derecesi arttıkça su emme oranlarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklığın neden olduğu hidrasyon ürünlerinin bozulmasına bağlı olarak numunelerin boşluk oranının arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda artan sıcaklıkla numunelerin su emme oranlarının da artış gösterdiği belirtilmiştir (Ulu, 2016; Zhang ve diğ, 2020).

4.3.4 Kontrol numunelerinin ağırlık kaybı oranları

Kontrol numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranı.

Sıcaklıklar	Ağırlık kaybı oranı, (%)		
	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
100 °C	2.81	2.17	1.48
300 °C	3.87	3.20	3.14
500 °C	6.15	5.90	5.52
700 °C	8.52	8.48	8.02



Şekil 4.5 : Kontrol grubunun 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranı.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin hesaplanan ağırlık kaybı oranlarına göre kür süresinin artmasıyla beraber ağırlık kayıplarında düşüş yaşanırken her kür süresi için

sıcaklığın artması ağırlık kaybı oranını artırmıştır. Sıcaklığın artması ile ağırlık kaybı oranının artmasının nedeni beton bünyesindeki bağlı suyun buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 28 günlük kür süresi için 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı oranları sırası ile %1.48, %3.14, %5.52 ve %8.02 oranlarında belirlenmiştir.

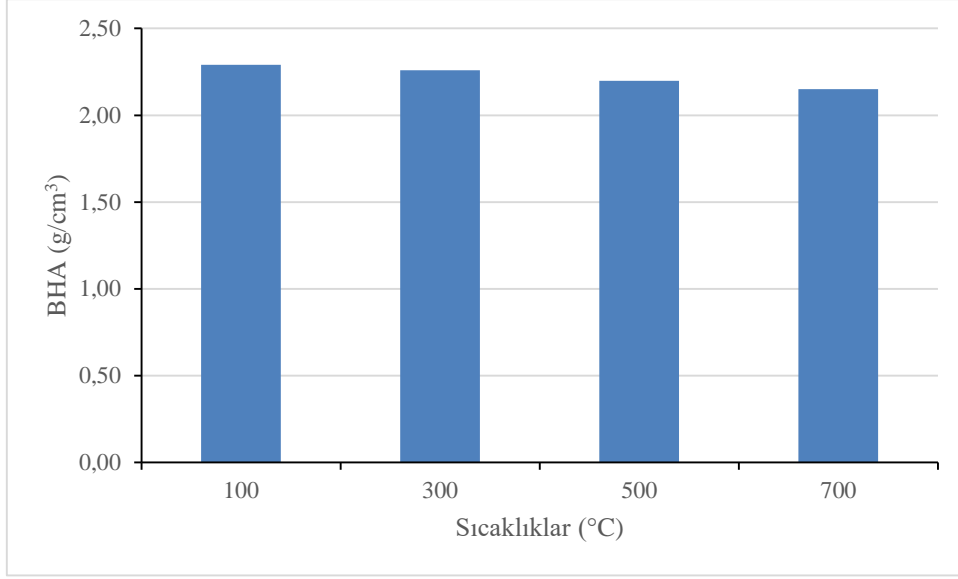
Binici ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, bims, gazbeton ve alüminyum talaşı kullanarak ürettikleri 10x10x10 cm boyutundaki betonları 100 °C'den 800 °C'ye kadar 5 farklı sıcaklığa maruz bırakmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla kütle kaybında arttığı belirtilmiştir ve 800 °C'ye kadar malzemelerin %6.38'nin kaybolduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, numunelere uygulanan yüksek sıcaklık derecelerinin artması ile numunelerde ağırlık kaybı oranı artış göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda numunelerin iç yapısındaki suyun buharlaşması ve bütünlüğünün bozulması ağırlık kaybına yol açmaktadır. Düşük sıcaklıklardaki ağırlık kaybına sebep olarak kılcal gözeneklerde bulunan serbest suyun ayrılmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Ulu, 2016; Demirel ve Keleştemur, 2010; Uysal ve diğ, 2012)

4.3.5 Kontrol numunelerinin BHA değerleri

Kontrol numuneleri 28 günlük havada kür sürelerinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra birim hacim ağırlık (BHA) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 : Kontrol grubunun 28 günlük BHA değerleri.

Sıcaklıklar	BHA, (g/cm ³)
100 °C	2.29
300 °C	2.26
500 °C	2.20
700 °C	2.15



Şekil 4.6 : Kontrol grubunun 28 günlük BHA değerleri.

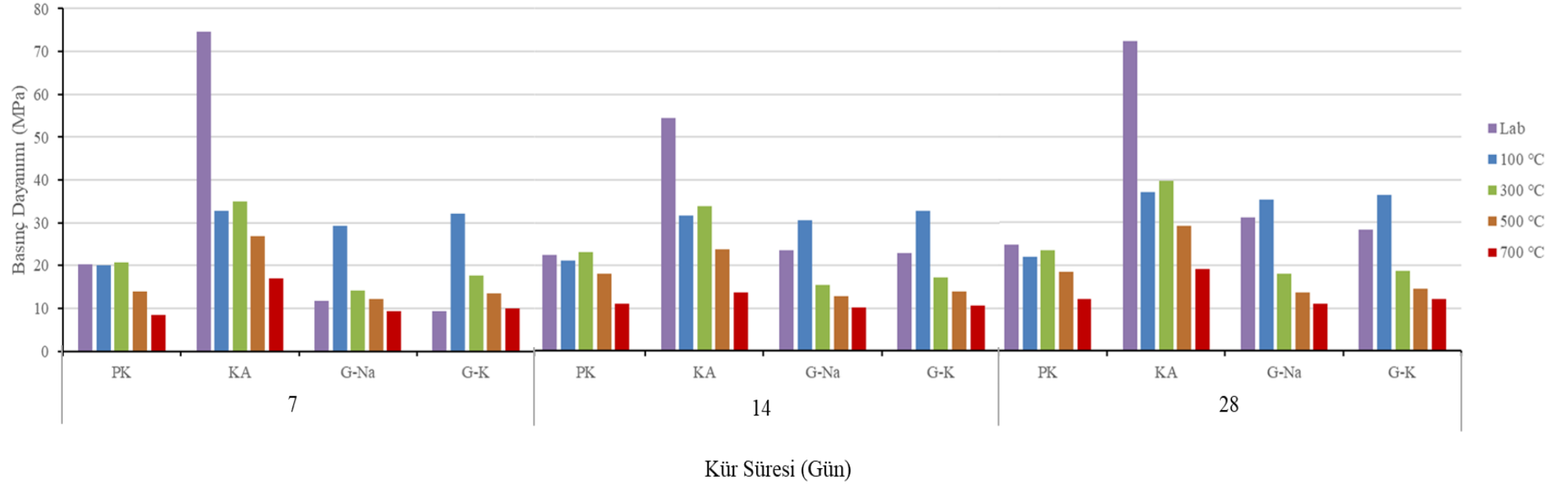
Elde edilen BHA değerlerine göre sıcaklığın artmasıyla hesaplanan BHA değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınında 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklara maruz kalmış numunelerde BHA değerleri sırası ile 2.29, 2.26, 2.20 ve 2.15 g/cm³ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ağırlık kaybı oranları ile paralellik göstermektedir.

4.3.6 Sıva harç numunelerinin basınç dayanımı

Farklı tipte karışım malzemeleri kullanılarak hazırlanan 5 grup sıva harç numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından laboratuvar sıcaklığına ve 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.8 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Kür Süresi (gün)	Sıcaklıklar	Basınç Dayanımı, (MPa)				
		PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
7	Lab	20.36	-	74.56	11.63	9.26
	100 °C	20.04	-	32.83	29.17	32.04
	300 °C	20.75	-	34.92	14.16	17.66
	500 °C	13.88	-	26.84	12.10	13.44
	700 °C	8.46	-	16.95	9.42	9.96
	14	Lab	22.40	-	54.36	23.63
100 °C		21.12	-	31.65	30.48	32.80
300 °C		23.16	-	33.76	15.35	17.20
500 °C		18.16	-	23.72	12.85	13.83
700 °C		11.14	-	13.75	10.20	10.65
28		Lab	24.87	-	72.32	31.20
	100 °C	21.96	-	37.15	35.45	36.50
	300 °C	23.48	-	39.72	18.15	18.80
	500 °C	18.45	-	29.24	13.73	14.48
	700 °C	12.16	-	19.20	11.00	12.22



Şekil 4.7 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Farklı tipte harçlarla üretilen sıva harçlarının basınç dayanım sonuçları incelendiğinde PK grubu numuneler için kür süresinin artmasıyla dayanımda artış görülmüştür ve her kür süresi için basınç dayanımlarında 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde laboratuvar ortamına göre bir düşüş olsa da 300 °C sıcaklığa ulaşan numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. PK grubu numunelerde 300 °C'yi aşan sıcaklıklarda, sıcaklık arttıkça numunelerin dayanımında önemli bir azalış olduğu saptanmıştır. 28 günlük beton dayanımları ele alındığında laboratuvar ortamındaki numunelerin basınç dayanımına (24.87 MPa) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz kalan numunelerin dayanımlarında sırasıyla %11.70, %5.59, %25.81 ve %51.11 oranlarında kayıplar meydana gelmiştir.

K-PK grubu laboratuvar ortamında bekletilen ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler yeterli basınç dayanımına sahip olmadığı için basınç dayanımları ölçülememiştir.

KA grubu numuneler incelendiğinde, her kür süresi için laboratuvar ortamında bekletilen numuneler en yüksek basınç dayanım değerine sahiptir ve kür süreleri arasında erken dayanım kazanmasından dolayı 7 günlük harç numuneleri en yüksek dayanıma sahip numuneleri oluşturmaktadır. Aynı zamanda KA grubu numuneler sıcaklık aralıklarında diğer gruplardaki numunelerin basınç dayanımlarına göre en yüksek dayanıma sahip sıva harç numuneleridir. KA grubu numuneler 100 °C sıcaklığa maruz kalarak ciddi bir dayanım kaybına uğramıştır ve bu dayanım kaybının nedeni dönüşüm reaksiyonları olduğu düşünülmektedir. 28 günlük KA grubu numunelerde, 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanım değerine göre 300 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımında %6.92 oranında bir artış gözlenirken 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %21.29 ve %48.32 oranında düşüş tespit edilmiştir.

G-Na grubu numuneler incelendiğinde, kür süresinin artmasıyla dayanımında artış olduğu saptanmıştır. 28 günlük G-Na grubu numunelerde, laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin basınç dayanım değerine göre 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde %13.62 oranında bir artış gözlenirken 300, 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %41.83, %55.99 ve %64.74 oranında düşüş tespit edilmiştir.

G-K grubu numuneler incelendiğinde, genel olarak kür süresinin artması ile birlikte basınç dayanımlarında artış tespit edilmiştir. Her kür süresi için laboratuvar ortamında bekletilen numuneler ele alındığında G-K grubu numunelerin basınç dayanımları G-Na grubu numunelere göre düşüktür fakat 100 °C sıcaklıkta ve bu sıcaklığı aşan her sıcaklık aralığında G-K grubu numunelerin basınç dayanımları G-Na grubu numunelere göre daha yüksektir. 28 günlük G-K grubu numunelerde, laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin basınç dayanım değerine göre 100 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde %28.70 oranında bir artış gözlenirken 300, 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %33.71, %48.94 ve %56.91 oranında düşüş tespit edilmiştir.

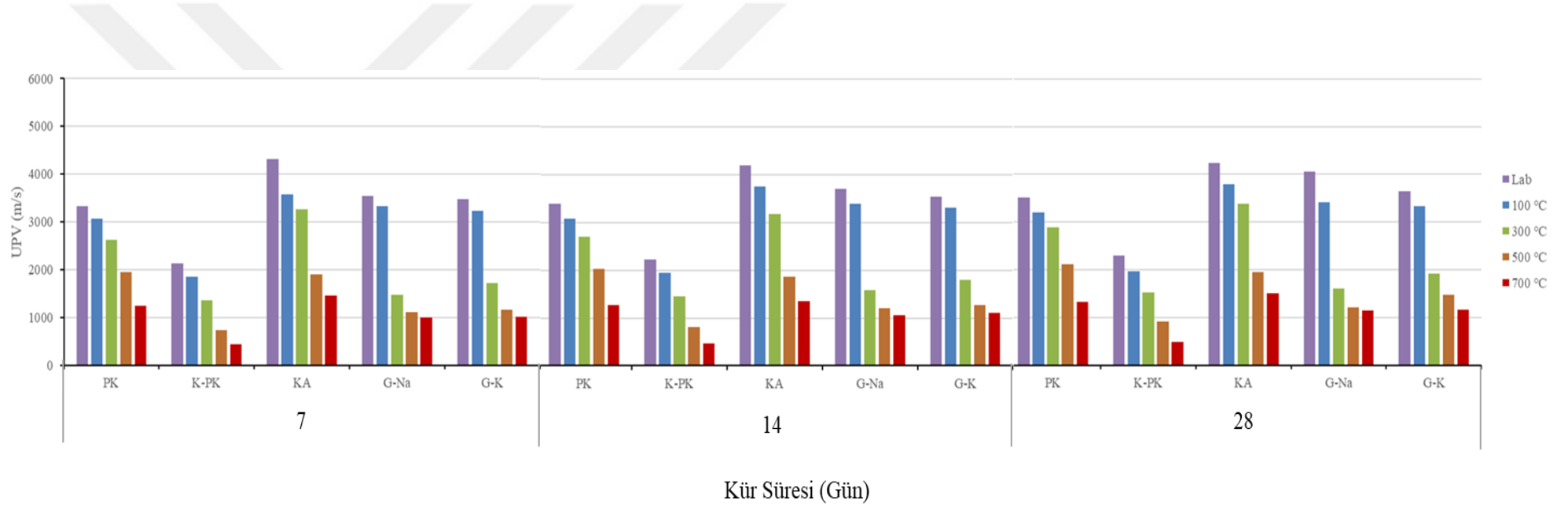
Tuyan ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, KAÇ malzemesi ile ürettikleri numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarına göre 28 günlük basınç dayanımlarında ciddi bir azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda 150 °C sıcaklığa maruz bırakılan numuneye göre 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunenin basınç dayanımında bir miktar artış meydana gelmiştir. Xu ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada, numuneleri yüksek sıcaklığa maruz bırakarak basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Numuneler 250 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımında meydana gelen artışın çimento hamurunun kurumadan kaynaklanan sertleşmesinden ve çimentolu malzemelerin daha fazla hidrasyonundan kaynaklanabileceği belirtilmiştir.

4.3.7 Sıva harç numunelerinin UPV değerleri

Farklı tipte karışım malzemeleri kullanılarak hazırlanan 5 grup sıva harç numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından laboratuvar sıcaklığına ve 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra UPV cihazı ile ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.9 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.

Kür Süresi (gün)	Sıcaklıklar	UPV ölçüm değerleri, (m/s)				
		PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
7	Lab	3333	2136	4310	3546	3472
	100 °C	3067	1851	3571	3333	3225
	300 °C	2617	1355	3267	1474	1724
	500 °C	1945	730	1893	1111	1152
	700 °C	1246	438	1453	994	1018
14	Lab	3401	2222	4201	3703	3546
	100 °C	3086	1945	3759	3401	3311
	300 °C	2702	1461	3184	1592	1792
	500 °C	2024	807	1872	1207	1278
	700 °C	1269	465	1362	1052	1101
28	Lab	3521	2293	4237	4065	3649
	100 °C	3205	1968	3787	3424	3333
	300 °C	2890	1533	3378	1602	1915
	500 °C	2118	922	1960	1213	1474
	700 °C	1329	487	1510	1146	1168



Şekil 4.8 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük UPV değerleri.

Elde edilen UPV değerlerine göre genel olarak kür sürelerinin artmasıyla UPV değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklığın artmasıyla UPV değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde 28 günlük UPV değerleri ele alındığında en yüksek değerden en düşük değere sahip numune grubuna göre KA (4237 m/s), G-Na (4065 m/s), G-K (3649 m/s), PK (3521 m/s) ve K-PK (2293 m/s) şeklinde sıralanır. 700 °C sıcaklığa maruz kalan 28 günlük sıva harç numunelerinin UPV değerleri ele alındığında en fazla değerden en az değere sahip numune grubuna göre KA (1510 m/s), PK (1329 m/s), G-K (1168 m/s), G-Na (1146 m/s) ve K-PK (487 m/s) şeklinde sıralanır. Sıralamaya bakıldığında en yüksek UPV değerlerine KA numune grubu sahipken en düşük UPV değerlerine K-PK numune grubu sahiptir.

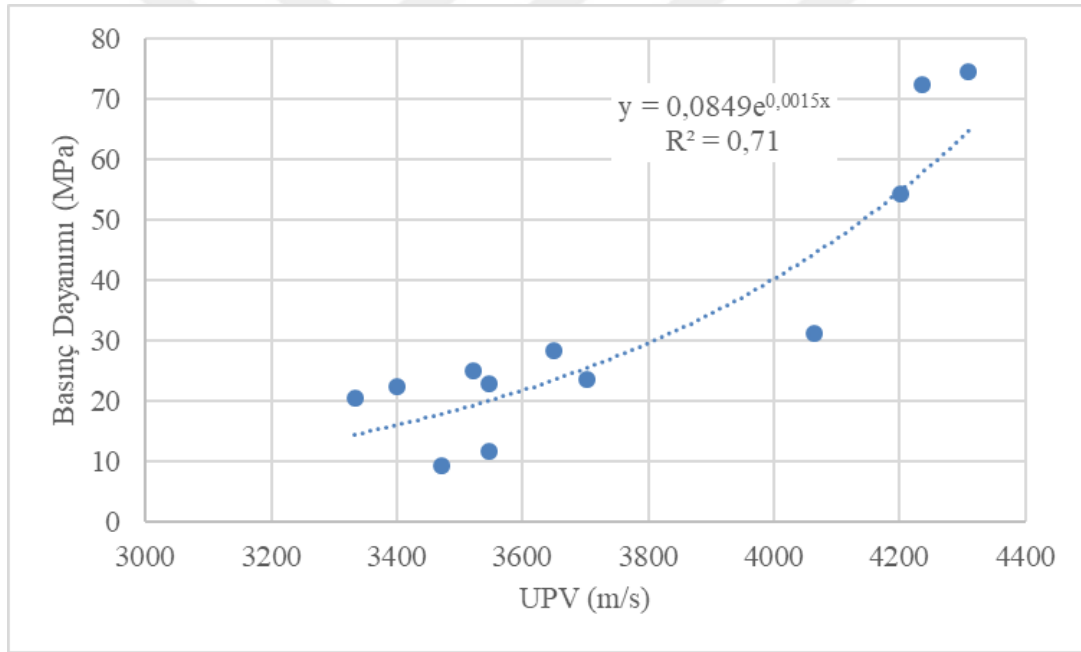
Uysal ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, ürettikleri numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklığın artması ile UPV değerlerinde azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. 400 °C sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda ise UPV değerlerinde dikkate değer azalma olduğunu ve bu azalma betonun mikro çatlamasından büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Omer ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklıklara maruz bıraktıkları numunelerin UPV değerlerinin tüm karışımlar için azaldığını ve basınç dayanımı eğimine benzer şekilde daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmanın daha yüksek UPV değerinde düşümlere yol açtığını belirtmişlerdir.

4.3.8 Sıva harç numunelerinin basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişkisi

Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri ile UPV değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. Elde edilen basınç dayanım değerleri ve UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.10 : Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki.

Kür Süresi (gün)		PK	KA	G-Na	G-K
7	Basınç Dayanımı (MPa)	20.36	74.56	11.63	9.26
	UPV (m/s)	3333	4310	3546	3472
14	Basınç Dayanımı (MPa)	22.40	54.36	23.63	22.84
	UPV (m/s)	3401	4201	3703	3546
28	Basınç Dayanımı (MPa)	24.87	72.32	31.20	28.36
	UPV (m/s)	3521	4237	4065	3649



Şekil 4.9 : Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki.

Sonuçlar incelendiğinde sıva harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri ile UPV değerleri arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki Şekil 4.9’da verilmektedir ve değeri 0.71’dir. Aynı zamanda K-PK grubu numunelerin yeterli basınç dayanımı olmadığından basınç dayanımı ölçülemediği ve dolayısıyla tabloda yer almamaktadır.

Demirboğa ve diğ. (2004) yaptıkları bir çalışmada, UPV ile basınç beton dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Kütleme süresinin artmasıyla üretilen tüm numunelerin

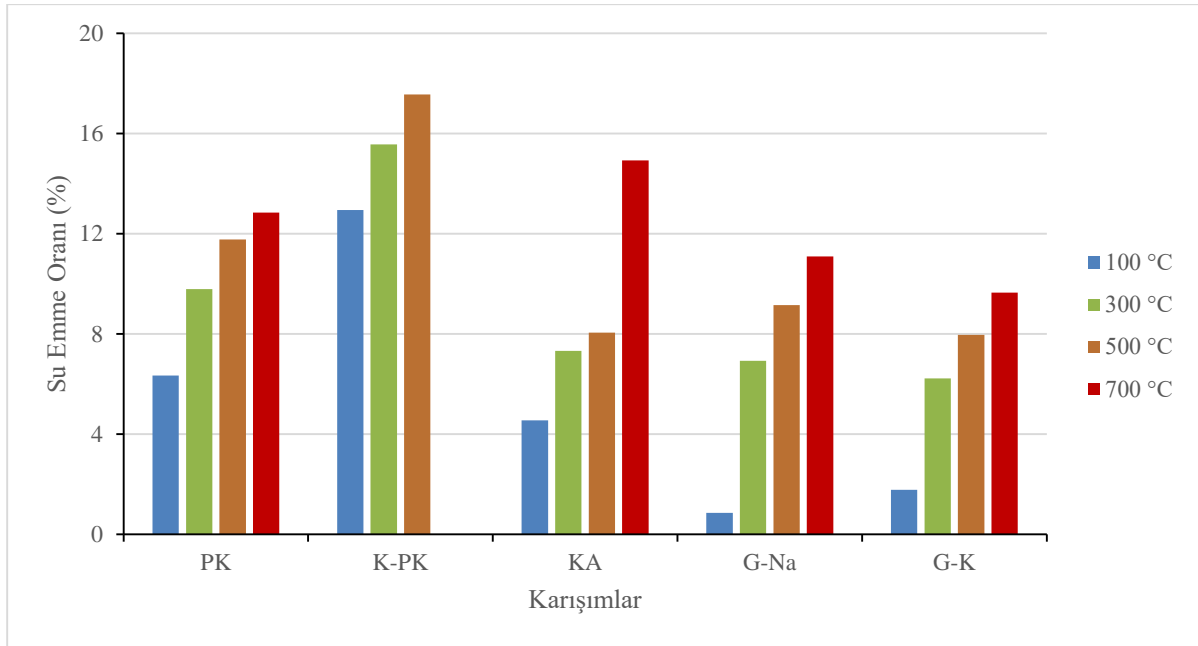
hem basınç dayanımlarının hem de UPV değerlerinin arttığı belirtilmiştir. UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişki UK, YFC ve UK + YFC için üstel şekilde olmuştur. Tüm sonuçlar bir araya getirildiğinde UPV ile basınç dayanımı arasında çok iyi bir üstel ilişki olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda beton numuneler için basınç dayanımı ve UPV arasında bir ilişki kurulmuştur. Bu genel ilişkinin yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun dayanımının tahmin edilmesi için uygun olduğunu belirtmişlerdir (Yang ve diğ, 2009; Lin ve diğ, 2011; Kirchhof ve diğ, 2015; Abed ve de Brito, 2020).

4.3.9 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası su emme oranları

Farklı tipte karışım malzemeleri kullanılarak hazırlanan 5 grup sıva harç numuneleri 28 günlük havada kür süresinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılıp havada soğutma yapıldıktan sonra su kürü uygulanarak numunelerin su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.11 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.11 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük su emme oranları.

Sıcaklıklar	Su emme oranı, (%)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	6.35	12.95	4.55	0.86	1.78
300 °C	9.79	15.57	7.32	6.93	6.22
500 °C	11.78	17.57	8.05	9.15	7.97
700 °C	12.85	-	14.94	11.09	9.66



Şekil 4.10 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük su emme oranları.

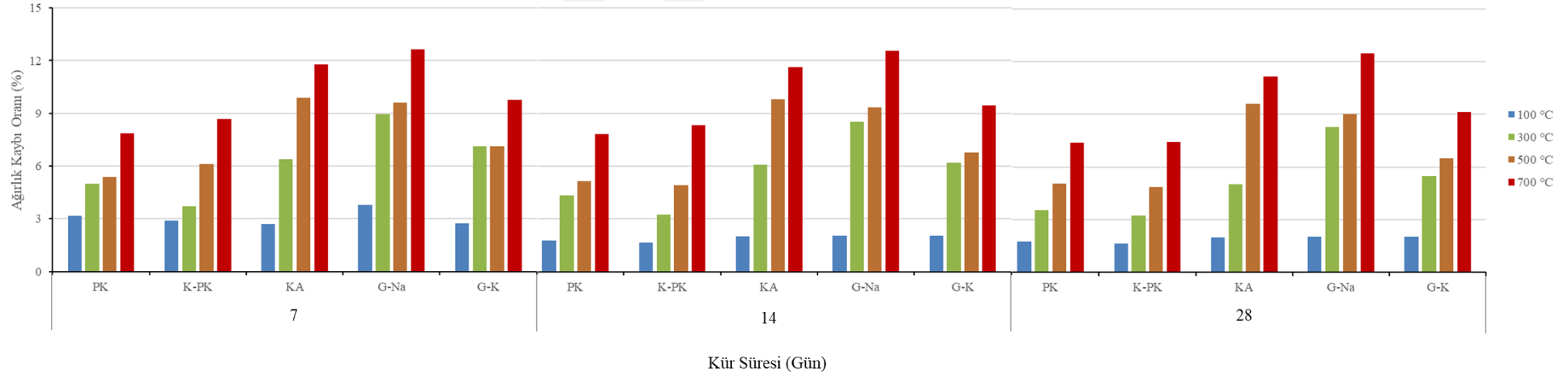
Elde edilen değerlere bakıldığında, 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en düşük su emme oranına sahip numune grubundan en yüksek su emme oranına sahip numune grubuna göre G-Na (%0.86), G-K (%1.78), KA (%4.55), PK (%6.35) ve K-PK (%12.95) şeklinde sıralanır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en düşük su emme oranına sahip numune grubundan en yüksek su emme oranına sahip numune grubuna göre G-K (%9.66), G-Na (%11.09), PK (%12.85) ve KA (%14.94) şeklinde sıralanır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan K-PK grubu numune yüksek sıcaklık etkisiyle parçalandığı için su emme oranı hesaplanamamıştır.

4.3.10 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı oranları

Farklı tipte karışım malzemeleri kullanılarak hazırlanan 5 grup sıva harç numuneleri 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.12 ve Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.12 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranları.

Kür Süresi (gün)	Sıcaklıklar	Ağırlık kaybı oranı, (%)				
		PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
7	100 °C	3.15	2.90	2.68	3.79	2.72
	300 °C	4.98	3.72	6.38	8.97	7.12
	500 °C	5.40	6.12	9.87	9.62	7.14
	700 °C	7.86	8.68	11.80	12.63	9.76
14	100 °C	1.76	1.64	1.99	2.04	2.05
	300 °C	4.32	3.24	6.06	8.53	6.21
	500 °C	5.15	4.92	9.80	9.34	6.77
	700 °C	7.82	8.33	11.63	12.54	9.46
28	100 °C	1.76	1.64	1.99	2.04	2.04
	300 °C	3.53	3.23	5.00	8.28	5.48
	500 °C	5.07	4.86	9.60	9.03	6.48
	700 °C	7.37	7.41	11.15	12.46	9.12



Şekil 4.11 : Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranları.

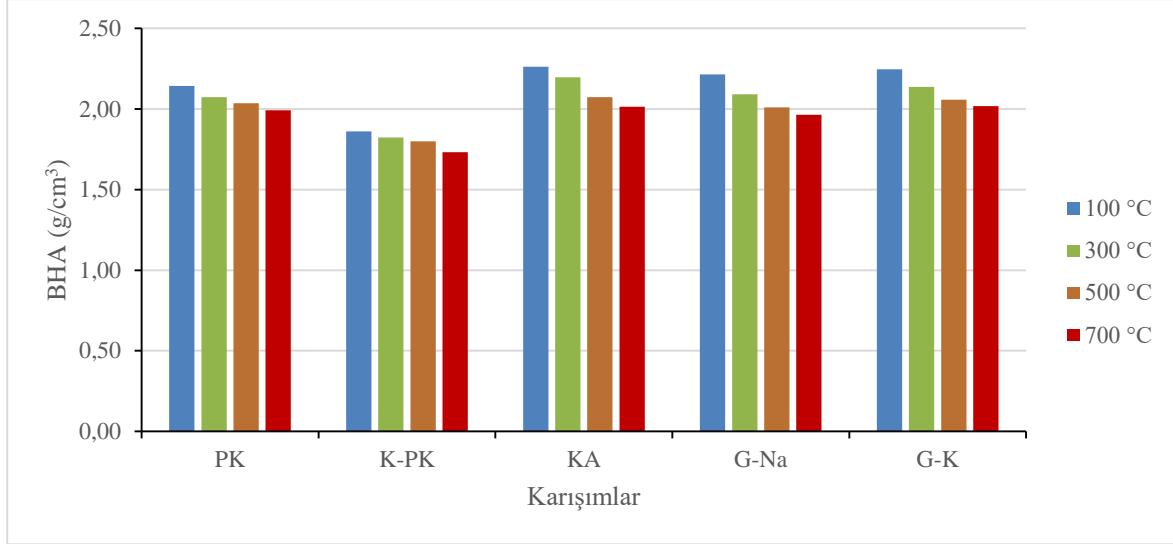
Sıva harç numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük ağırlık kaybı oranlarına göre yapılan incelemede, genellikle kür süresinin artmasıyla ağırlık kaybı oranlarında düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. 5 sıva harç grubunun ağırlık kaybı oranları sıcaklıkların artmasıyla artış göstermektedir. 28 günlük kür sürelerine sahip grup incelendiğinde 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en düşük ağırlık kaybı oranına sahip numune grubundan en yüksek ağırlık kaybı oranına sahip numune grubuna göre K-PK (%1.64), PK (%1.76), KA (%1.99), G-Na (%2.04) ve G-K (%2.04) oranlarında ağırlık kayıpları olacak şekilde sıralanır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en düşük ağırlık kaybı oranına sahip numune grubundan en yüksek ağırlık kaybı oranına sahip numune grubuna göre PK (%7.37), K-PK (%7.41), G-K (%9.12), KA (%11.15) ve G-Na (%12.46) oranlarında ağırlık kayıpları olacak şekilde sıralanır.

4.3.11 Sıva harç numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası BHA değerleri

Farklı tipte karışım malzemeleri kullanılarak hazırlanan 5 grup sıva harç numuneleri 28 günlük havada kür süresinin ardından 1 saat süreyle 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra birim hacim ağırlık değerleri (BHA) hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.13 ve Şekil 4.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.13 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük BHA değerleri.

Sıcaklıklar	BHA, (g/cm ³)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	2.14	1.86	2.26	2.21	2.25
300 °C	2.07	1.82	2.20	2.09	2.14
500 °C	2.04	1.80	2.07	2.01	2.06
700 °C	1.99	1.73	2.02	1.97	2.02



Şekil 4.12 : Sıva harç numunelerinin 28 günlük BHA değerleri.

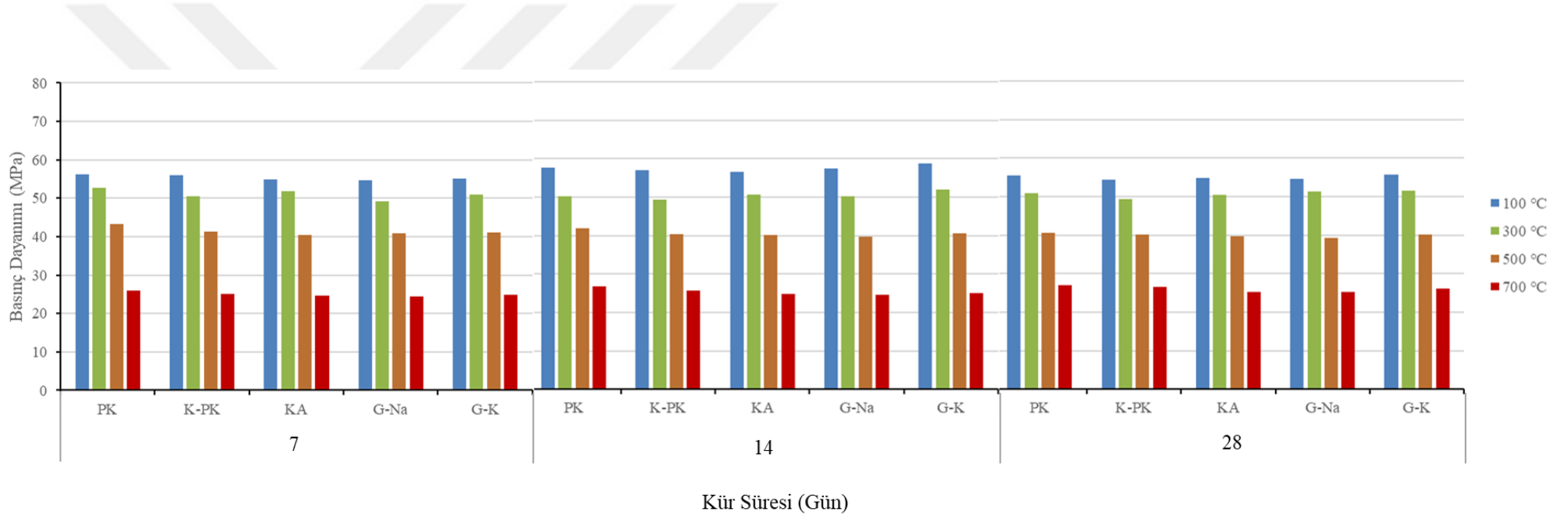
Elde edilen BHA değerlerine göre sıcaklığın artmasıyla hesaplanan BHA değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en yüksek BHA değerine sahip numune grubundan en düşük BHA değerine sahip numunelere göre KA (2.26 g/cm³), G-K (2.25 g/cm³), G-Na (2.21 g/cm³), PK (2.14 g/cm³) ve K-PK (1.86 g/cm³) şeklinde sıralanır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin en yüksek BHA değerine sahip numune grubundan en düşük BHA değerine sahip numune grubuna göre KA (2.02 g/cm³), G-K (2.02 g/cm³), PK (1.99 g/cm³), G-Na (1.97 g/cm³) ve K-PK (1.73 g/cm³) şeklinde sıralanır.

4.3.12 Sıvası kesilen iç betonların basınç dayanımı

Sıva harçları ile kaplanan beton numuneler 7, 14 ve 28 günlük havada kür sürelerinin ardından 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra beton kesim yerinde sıvası kesilen betonların iç betonlarına ulaşılmıştır ve ulaşılan iç beton numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.14 ve Şekil 4.13'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.14 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin basınç dayanımları.

Kür Süresi (gün)	Sıcaklıklar	Basınç Dayanımı, (MPa)				
		PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
7	100 °C	56.29	55.90	54.94	54.69	55.17
	300 °C	52.60	50.59	51.74	49.15	50.94
	500 °C	43.26	41.24	40.45	40.76	41.13
	700 °C	25.93	25.10	24.70	24.51	24.85
14	100 °C	57.73	57.03	56.58	57.47	58.84
	300 °C	50.25	49.30	50.66	50.19	52.07
	500 °C	41.86	40.42	40.24	39.71	40.67
	700 °C	26.76	25.80	24.83	24.62	25.07
28	100 °C	55.50	54.35	54.75	54.64	55.76
	300 °C	50.80	49.35	50.48	51.43	51.65
	500 °C	40.51	40.20	39.63	39.25	40.20
	700 °C	26.95	26.49	25.29	25.21	26.04



Şekil 4.13 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Basınç dayanım sonuçları incelendiğinde 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 14 günlük kür süresine sahip numune gruplarının basınç dayanımları 7 ve 28 günlük kür sürelerine sahip numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde ise kür süresinin artmasıyla basınç dayanımlarında artış tespit edilmiştir.

Havada kür edilen 28 günlük sıvalı beton numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra sıvaları kesilerek elde edilen iç beton numunelerin basınç dayanımları ile 28 günlük kontrol beton numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımları her grup için aşağıda kıyaslanmıştır.

PK grubu iç beton numunelerin basınç dayanımları (Çizelge 4.14) ele alındığında kontrol beton numunelere (Çizelge 4.3) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda sırasıyla %18.59, %4.87, %13.28 ve %18.05 oranında basınç dayanımlarında artış olduğu hesaplanmıştır.

K-PK grubu iç beton numunelerin basınç dayanımları (Çizelge 4.14) ele alındığında sıva yapılmamış kontrol beton numunelere (Çizelge 4.3) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda sırasıyla %16.13, %1.88, %12.42 ve %16.03 oranında basınç dayanımlarında artış olduğu hesaplanmıştır.

KA grubu iç beton numunelerin basınç dayanımları (Çizelge 4.14) ele alındığında sıva yapılmamış kontrol beton numunelere (Çizelge 4.3) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda sırasıyla %16.99, %4.21, %10.82 ve %10.78 oranında basınç dayanımlarında artış olduğu hesaplanmıştır.

G-Na grubu iç beton numunelerin basınç dayanımları (Çizelge 4.14) ele alındığında sıva yapılmamış kontrol beton numunelere (Çizelge 4.3) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda sırasıyla %16.75, %6.17, %9.76 ve %10.42 oranında basınç dayanımlarında artış olduğu hesaplanmıştır.

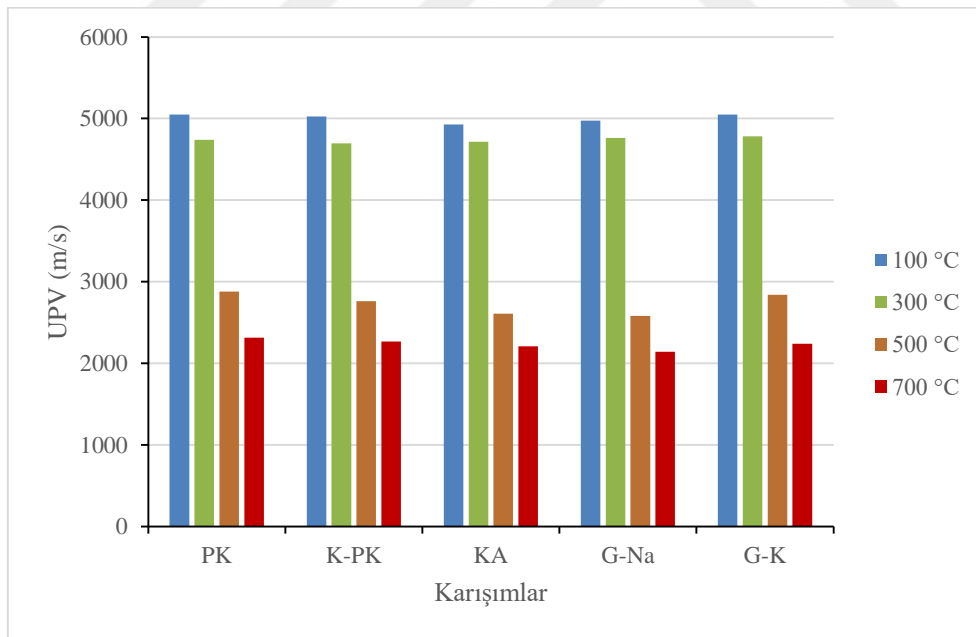
G-K grubu iç beton numunelerin basınç dayanımları (Çizelge 4.14) ele alındığında sıva yapılmamış kontrol beton numunelere (Çizelge 4.3) göre 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda sırasıyla %19.15, %6.63, %12.42 ve %14.06 oranında basınç dayanımlarında artış olduğu hesaplanmıştır.

4.3.13 Sıvası kesilen iç betonların UPV değerleri

Sıva harçları ile kaplanan beton numuneler 28 günlük havada kür süresinin ardından 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra beton kesim yerinde sıvası kesilen betonların iç betonlarına ulaşılmıştır ve ulaşılan iç beton numunelerin UPV cihazı ile ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.15 ve Şekil 4.14’te gösterilmektedir.

Çizelge 4.15 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük UPV değerleri.

Sıcaklıklar	UPV ölçüm değerleri, (m/s)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	5050	5025	4926	4975	5050
300 °C	4739	4694	4716	4761	4784
500 °C	2881	2762	2610	2583	2840
700 °C	2314	2267	2207	2141	2242



Şekil 4.14 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük UPV değerleri.

Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla UPV değerleri azalmıştır. Sıvalı halde 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin yüksek UPV değerine sahip numune grubundan düşük UPV değerine sahip numune grubuna göre PK (5050 m/s), G-K (5050

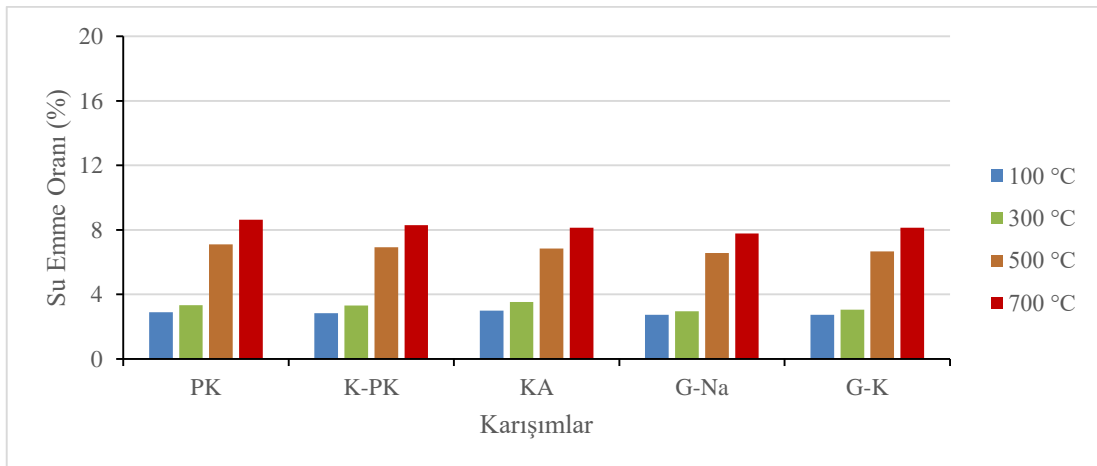
m/s), K-PK (5025 m/s), G-Na (4975 m/s) ve KA (4926 m/s) şeklinde sıralanır. Sıvalı halde 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin yüksek UPV değerine sahip numune grubundan düşük UPV değerine sahip numune grubuna göre PK (2314 m/s), K-PK (2267 m/s), G-K (2242 m/s), KA (2207 m/s) ve G-Na (2141 m/s) şeklinde sıralanır.

4.3.14 Sıvası kesilen iç betonların su emme oranları

Sıva harçları ile kaplanan beton numuneler 28 günlük havada kür süresinin ardından 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra beton kesim yerinde sıvası kesilen betonların iç betonlarına ulaşılmıştır ve ulaşılan iç beton numunelere su kürü uygulanarak su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.16 ve Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.16 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük su emme oranları.

Sıcaklıklar	Su emme oranı, (%)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	2.89	2.83	2.98	2.73	2.74
300 °C	3.32	3.30	3.52	2.96	3.05
500 °C	7.09	6.92	6.84	6.56	6.65
700 °C	8.63	8.30	8.14	7.78	8.13



Şekil 4.15 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük su emme oranları.

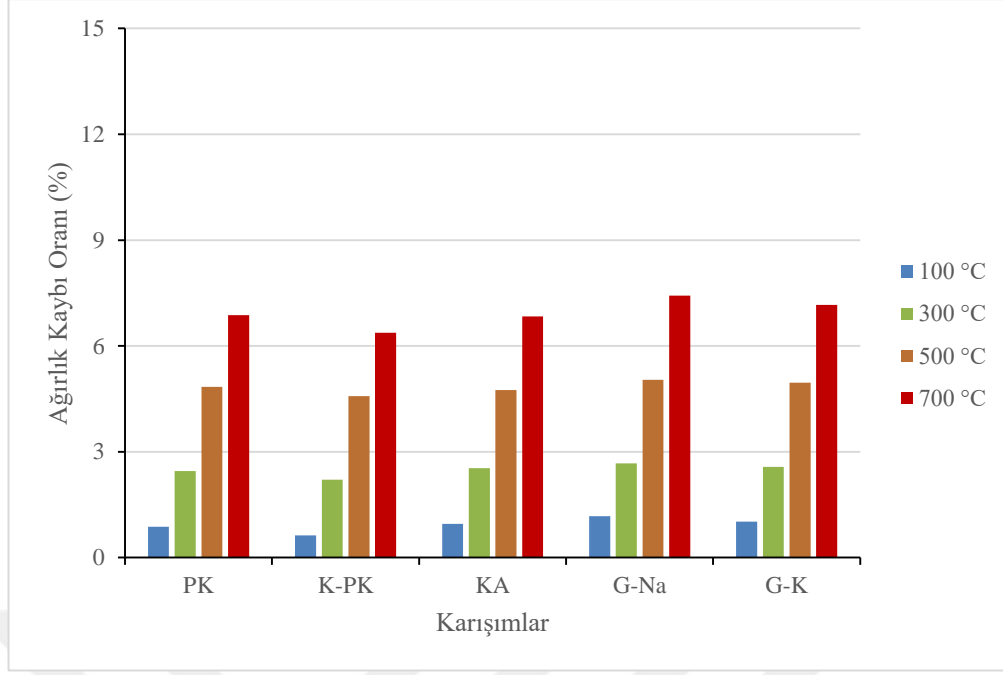
Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla su emme oranları artmıştır. Sıvalı halde 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin düşük su emme oranı değerine sahip numune grubundan yüksek su emme oranı değerine sahip numune grubuna göre G-Na (%2.73), G-K (%2.74), K-PK (%2.83), PK (%2.89) ve KA (%2.98) şeklinde sıralanır. Sıvalı halde 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin düşük su emme oranı değerine sahip numune grubundan yüksek su emme oranına sahip numune grubuna göre G-Na (%7.78), G-K (%8.13), KA (%8.14), K-PK (%8.30) ve PK (%8.63) şeklinde sıralanır.

4.3.15 Sıvası kesilen iç betonların ağırlık kaybı oranları

Sıva harçları ile kaplanan beton numuneler 28 günlük havada kür süresinin ardından 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra beton kesim yerinde sıvası kesilen betonların iç betonlarına ulaşılmıştır ve ulaşılan iç beton numunelerin ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.17 ve Şekil 4.16’da gösterilmektedir.

Çizelge 4.17 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük ağırlık kaybı oranları.

Sıcaklıklar	Ağırlık kaybı oranı, (%)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	0.87	0.63	0.96	1.17	1.02
300 °C	2.45	2.21	2.53	2.68	2.57
500 °C	4.84	4.58	4.75	5.04	4.96
700 °C	6.88	6.38	6.83	7.43	7.17



Şekil 4.16 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük ağırlık kaybı oranları

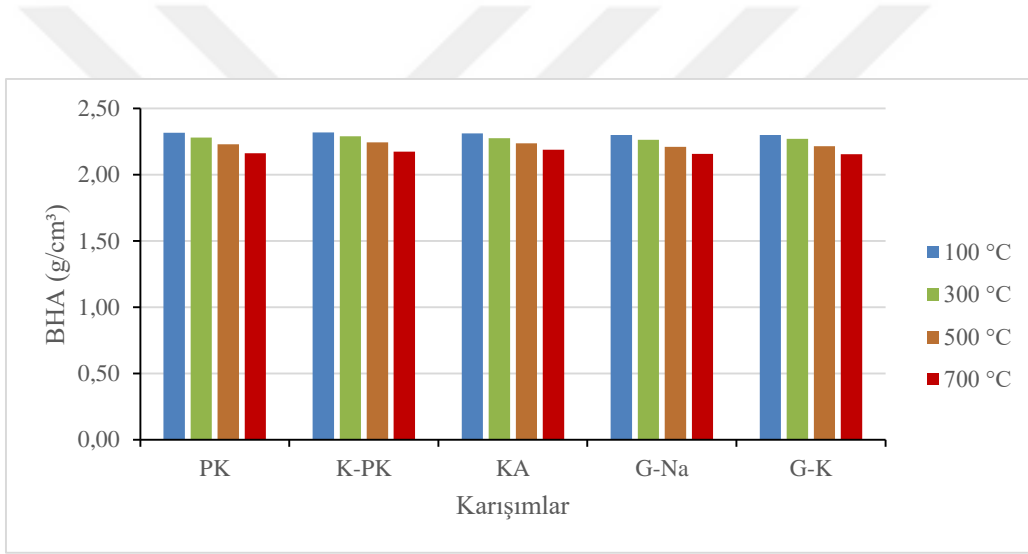
Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla ağırlık kaybı oranları artmıştır. Sıvalı halde 100 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin en düşük ağırlık kaybı oranına sahip numune grubundan en yüksek ağırlık kaybı oranına sahip numune grubuna göre K-PK (%0.63), PK (%0.87), KA (%0.96), G-K (%1.02) ve G-Na (%1.17) oranlarında ağırlık kayıpları olacak şekilde sıralanır. Sıvalı halde 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin en düşük ağırlık kaybı oranına sahip numune grubundan en yüksek ağırlık kaybı oranına sahip numune grubuna göre K-PK (%6.38), KA (%6.83), PK (%6.88), G-K (%7.17) ve G-Na (%7.43) oranlarında ağırlık kayıpları olacak şekilde sıralanır.

4.3.16 Sıvası kesilen iç betonların BHA değerleri

Sıva harçları ile kaplanan beton numuneler 28 günlük havada kür süresinin ardından 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra beton kesim yerinde sıvası kesilen betonların iç betonlarına ulaşılmıştır ve ulaşılan iç beton numunelerin birim hacim ağırlık (BHA) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.18 ve Şekil 4.17’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.18 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük BHA değerleri.

Sıcaklıklar	BHA, (g/cm ³)				
	PK	K-PK	KA	G-Na	G-K
100 °C	2.32	2.32	2.31	2.30	2.30
300 °C	2.28	2.29	2.28	2.26	2.27
500 °C	2.23	2.25	2.24	2.21	2.22
700 °C	2.16	2.18	2.19	2.16	2.16



Şekil 4.17 : Sıvası kesilen iç beton numunelerin 28 günlük BHA değerleri.

Elde edilen BHA değerlerine göre sıcaklığın artmasıyla hesaplanan BHA değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Sıvalı halde 100°C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin en yüksek BHA değerine sahip numune grubundan en düşük BHA değerine sahip numune grubuna göre K-PK (2.32 g/cm³), PK (2.32 g/cm³), KA (2.31 g/cm³), G-K (2.30 g/cm³) ve G-Na (2.30 g/cm³) şeklinde sıralanır. Sıvalı halde 700°C sıcaklığa maruz bırakılan iç beton numunelerin en yüksek BHA değerine sahip numune grubundan en düşük BHA değerine sahip numune grubuna göre KA (2.19 g/cm³), K-PK (2.18 g/cm³), G-K (2.16 g/cm³), PK (2.16 g/cm³) ve G-Na (2.16 g/cm³) şeklinde sıralanır.

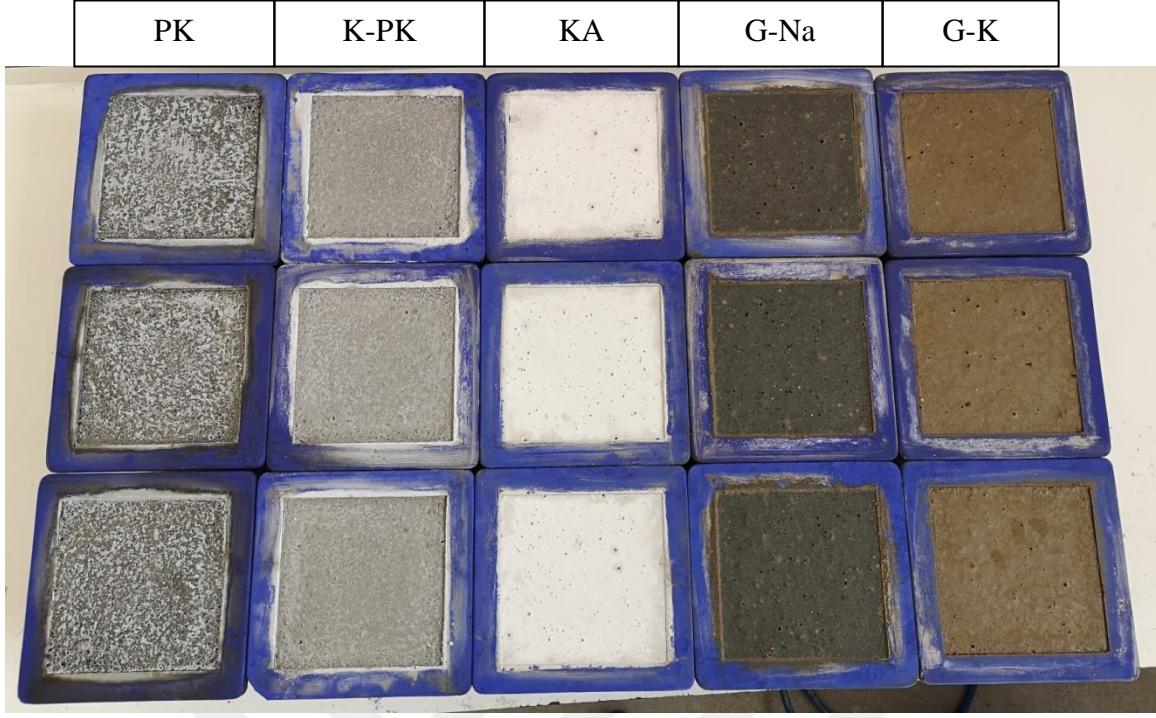
4.3.17 Numunelerde görsel incelemeler

4.3.17.1 Sıvalı numunelerin üretim aşamalarının görsel incelenmesi

Ahşap aparatlar ile 15x15x15 cm plastik kalıplara ortalanmış kontrol beton numunelerinin kaplaması yapıldıktan sonra ahşap aparatlar ile birlikte kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıplar ile birlikte çıkan ahşap aparatlar betondan ayrılmıştır. Ahşap aparatlarından ayrılan betonun, ahşap aparat gelen kısımları boş kalacağından dolayı 15x15x15 cm çelik kalıplara tekrar yerleştirilen sıvalı beton numunenin ahşap aparat gelen kısımları kendi grubundaki sıva harçları ile doldurulmuştur. Ertesi gün çelik kalıplardan da çıkarılmıştır ve kür süresi dolan numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Şekil 4.18’de ahşap aparat ile kalıptan çıkarılan sıvalı numuneler, ahşap aparat betondan ayrılmış sıvalı numuneler ve ahşap aparatın oluşturduğu boşluğun doldurulduğu sıvalı numuneler gösterilmektedir. Şekil 4.19’da plastik kalıptaki sıvalı numuneler, Şekil 4.20’de plastik kalıptan çıkarılan sıvalı numuneler, Şekil 4.21’de ahşap aparatları ayrılan sıvalı numuneler, Şekil 4.22’de boşlukların doldurulması için çelik kalıplara yerleştirilen sıvalı numuneler ve Şekil 4.23’te boşlukları sıva harçları ile doldurulan sıvalı numuneler gösterilmektedir.



Şekil 4.18 : Ahşap aparatın oluşturduğu boşlukların doldurulma aşamaları.



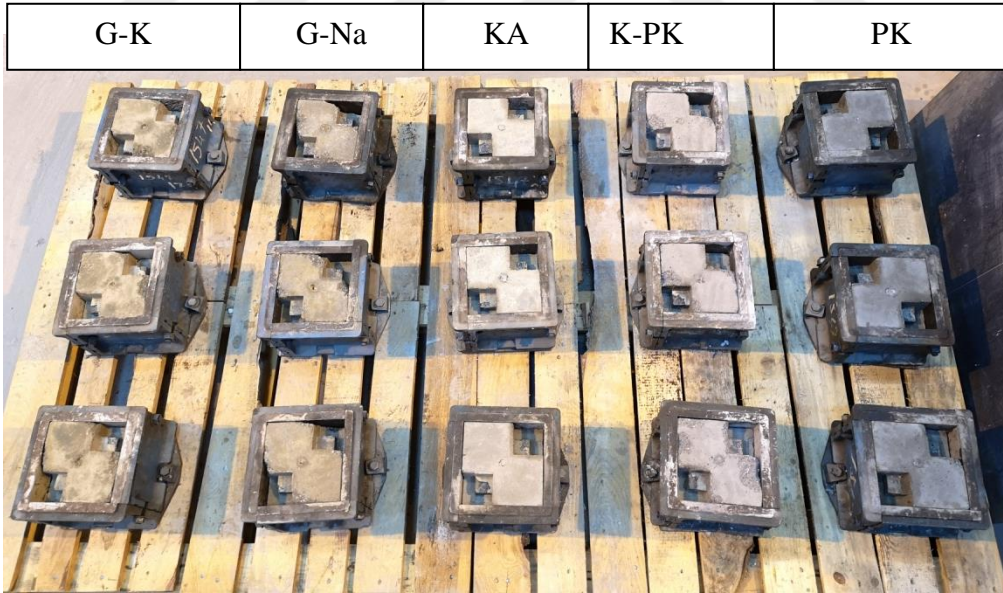
Şekil 4.19 : Plastik kalıptaki sıvalı numuneler.



Şekil 4.20 : Plastik kalıptan çıkarılan sıvalı numuneler.



Şekil 4.21 : Ahşap aparatları ayrılan sıvalı numuneler.



Şekil 4.22 : Boşlukların doldurulması için çelik kalıplara yerleştirilen numuneler.



Şekil 4.23 : Boşlukları sıva harçları ile doldurulan numuneler.

4.3.17.2 Sıvalı numunelerde farklı sıcaklıklardaki görsel incelemeler

Laboratuvar koşullarında ve 1 saat süresince 100, 300, 500 ve 700 °C sıcaklık etkisine bırakılan sıvalı numunelerin yüzeylerinde görsel olarak incelemelerde bulunuldu. Sıcaklık etkisinde kalan numunelerde, sıcaklığın artmasıyla beraber renginde ve çatlak gelişiminde önemli farklılıklar tespit edildi. Şekillerde bu farklılıklar görsel olarak gösterilmektedir. Şekil 4.24'te PK, K-PK, KA, G-Na ve G-K grubu numunelerinin farklı sıcaklıklar etkisi altındaki görünüşleri verilmiştir.



Şekil 4.24 : Sıvalı numunelerin farklı sıcaklıklar etkisi altındaki görünüşleri.

PK grubu sıvalı numunelerde yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası numune yüzeylerinin görselleri incelendiğinde, 500 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde çatlak oluşumu başlamıştır ve 700 °C sıcaklığa maruz kaldığında ise oluşan çatlaklar giderek genişleyerek sayılarında artış olduğu gözlenmiştir. PK grubu sıvalı numunelerde 500 °C sıcaklığa kadar ciddi bir renk değişimi gözlenmezken bu dereceden sonra grimsi renkten açık griye doğru bir renk geçişi söz konusudur.

K-PK grubu sıvalı numunelerde yapılan görsel incelemelerde, çatlak oluşumu 100 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra başlarken, bu sıcaklık sonrası çatlakların genişliği ve sayısı önemli oranda artmıştır. 700 °C sıcaklığa maruz kalan K-PK grubu sıvalı numunelerde ise kontrol betona yapılan sıva kaplaması dağılma noktasına gelmiştir. Ayrıca maruz kaldığı sıcaklıklarda ciddi bir renk değişimi meydana gelmemiştir.

KA grubu sıvalı numunelerde yapılan görsel incelemelerde, kaplama yüzeylerinde yüksek sıcaklıklar sonucu geniş ve sayıca fazla çatlaklar oluşmazken 500 ve 700 °C sıcaklıklara maruz kalan numunelerde ince ve sayıca az çatlak oluşumu gözlenmiştir. KA grubu sıvalı numunelerde yüksek sıcaklıklar sonrası renk değişimlerinde önemli farklılıklar meydana gelmiştir. 500 °C sıcaklığa kadar koyu griye doğru renk değişimi gösteren kaplamalar 700 °C ise deve tüyü rengine renk geçişi yapmıştır.

G-Na grubu sıvalı numunelerde yapılan görsel incelemelerde, kaplama yüzeylerinde yüksek sıcaklıklar sonucu önemli bir çatlak gelişimi gözlenmezken sadece 700 °C sıcaklığında çok ince ve sayıca az çatlak oluşumu gözlenmiştir. G-Na grubu sıvalı numunelerde yüksek sıcaklıklar sonrası renk değişimleri incelendiğinde, laboratuvar ortamındaki kaplama yüzeyinden 300 °C sıcaklıktaki kaplama yüzeyine doğru koyu sarıdan açık sarıya dönüşecek şekilde renk değişimi gözlenirken 500 ve 700 °C sıcaklığa maruz kalan kaplama yüzeylerinde pembe tonlarında renk değişimi vardır.

G-K grubu sıvalı numunelerde yapılan görsel incelemerde, kaplama yüzeylerinde yüksek sıcaklıklar sonucu önemli bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir. G-K grubu sıvalı numunelerde yüksek sıcaklıklar sonrası renk değişimleri incelendiğinde, laboratuvar ortamındaki kaplama yüzeyinden 500 °C sıcaklıktaki kaplama yüzeyine doğru koyu sarıdan açık sarıya dönüşecek şekilde renk değişimi gözlenirken 700 °C sıcaklıkta renkte tekrar koyulaşma meydana gelmiştir.

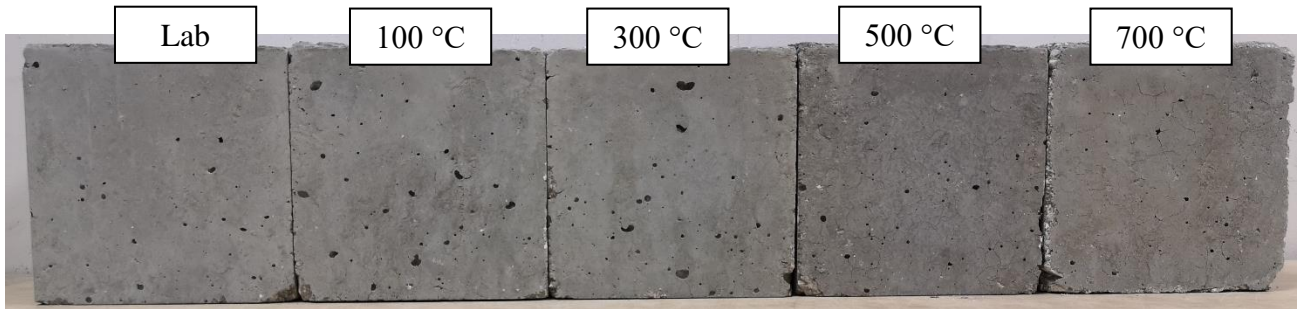
K-PK grubu sıvalı numuneler 700 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra iki gün içerisinde numunelerde dağılmalar ve parçalanmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.25'te 700 °C sıcaklık etkisi sonrası dağılan ve parçalanan K-PK grubu numune gösterilmektedir.



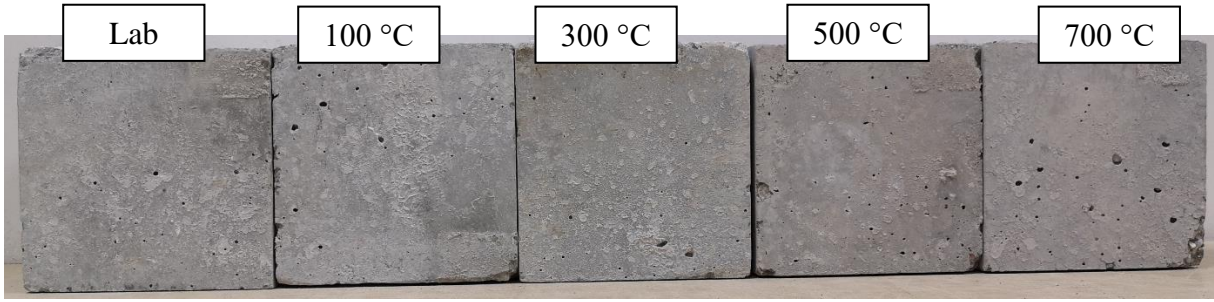
Şekil 4.25 : 700 °C sıcaklığa maruz kalan K-PK grubu sıvalı numune.

4.3.17.3 Beton numunelerde farklı sıcaklıklardaki görsel incelemeler

Kontrol beton numunelerin ve iç beton numunelerin farklı sıcaklıklardaki görselleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilmektedir.



Şekil 4.26 : Kontrol beton numunelerin farklı sıcaklıklardaki görünüşleri.

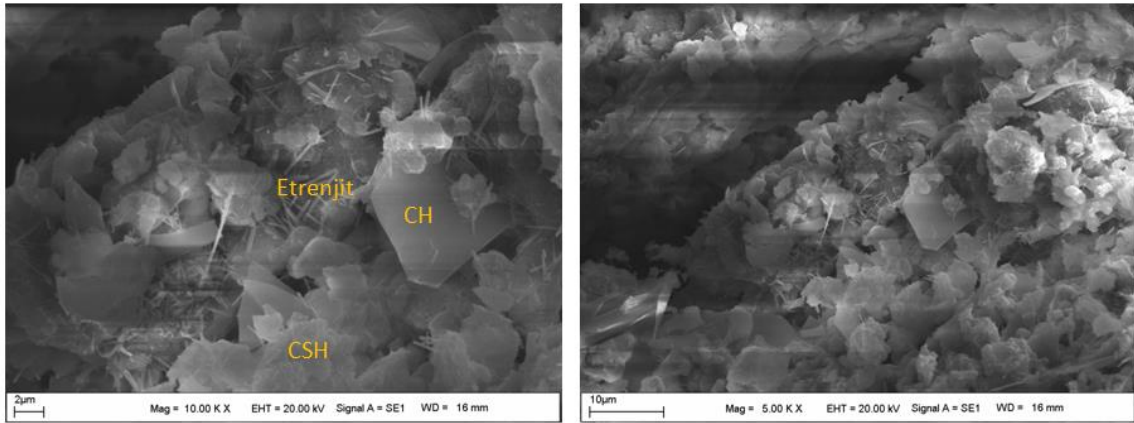


Şekil 4.27 : Sıvası kesilen iç beton numunelerinin farklı sıcaklıklardaki görünüşleri.

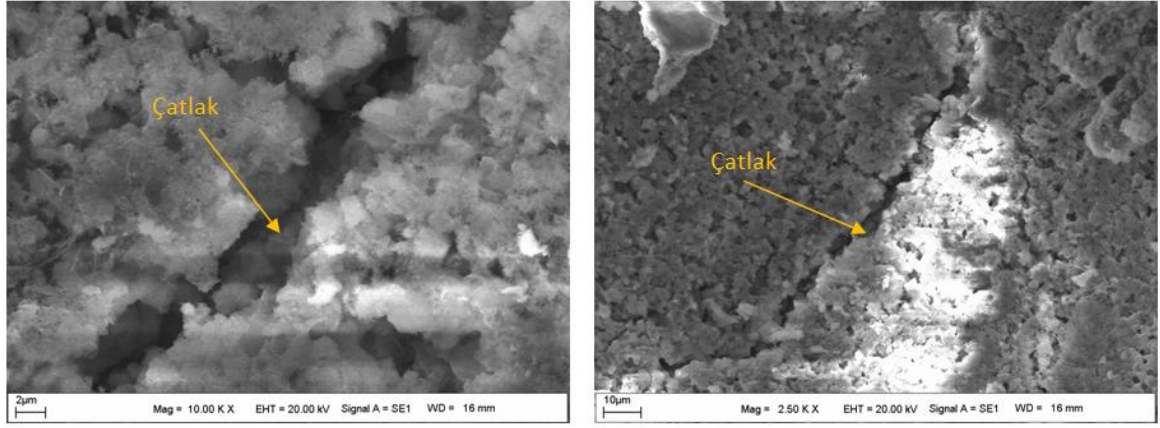
4.4 Mikroyapı Analizi

4.4.1 SEM analizi

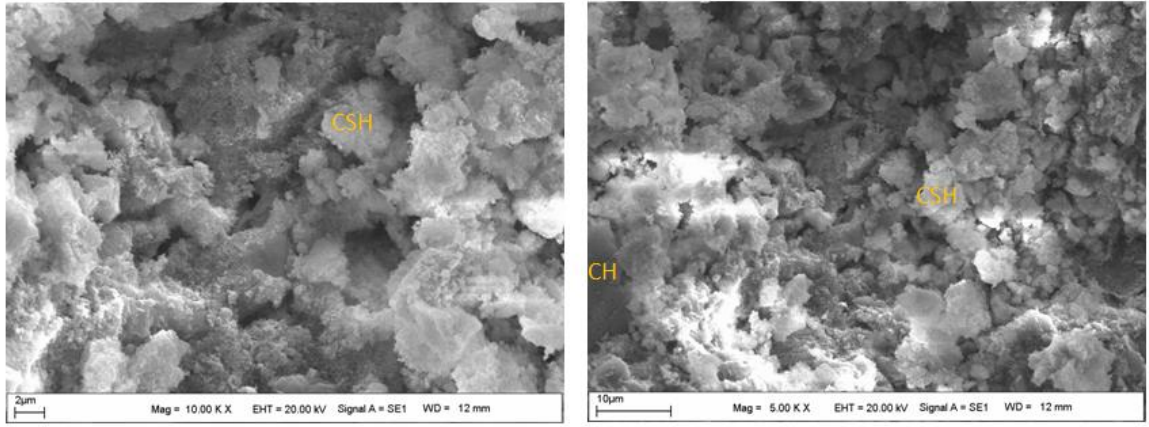
Yüksek sıcaklık etkisi öncesi (laboratuvar sıcaklığı) ve sonrası (700 °C) kontrol beton numunelerinden ve iç beton numunelerinden örnekler alınıp SEM cihazına yerleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.28-4.34'te verilmektedir.



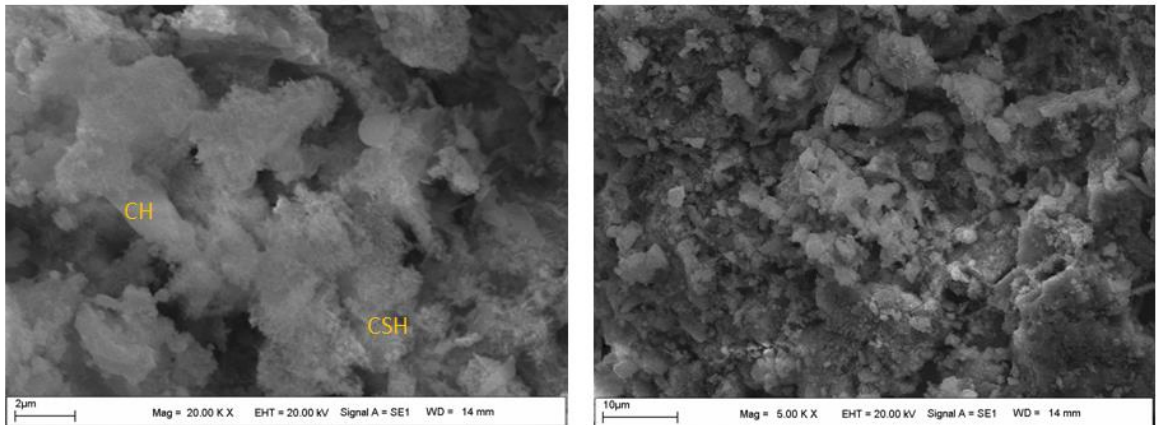
Şekil 4.28 : Lab ortamında bekletilmiş kontrol beton numuneleri.



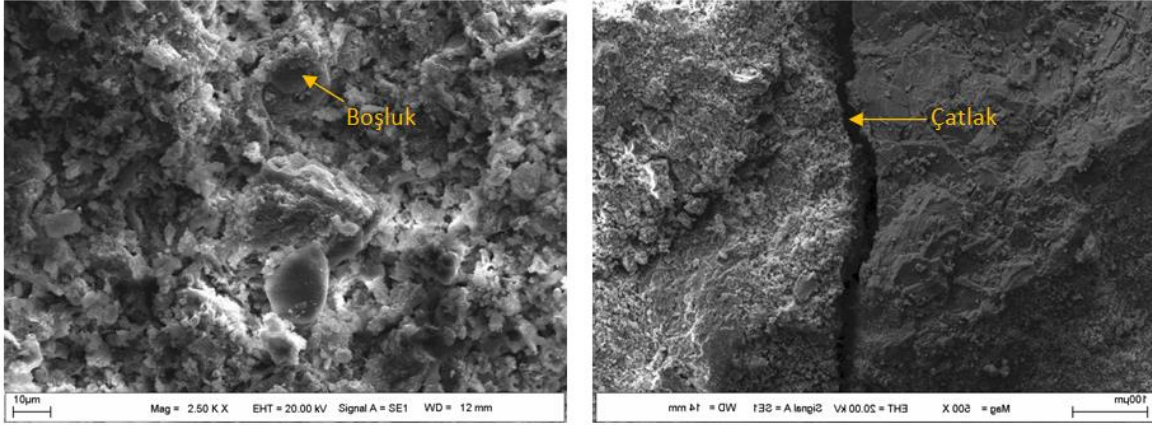
Şekil 4.29 : 700 °C sıcaklık sonrası kontrol beton numuneleri.



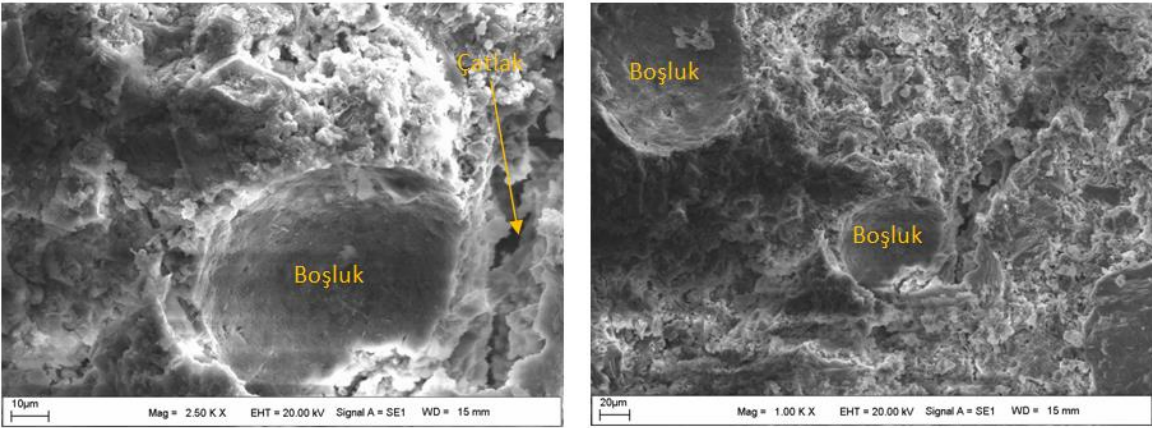
Şekil 4.30 : 700 °C sıcaklık sonrası PK grubu iç beton numuneler.



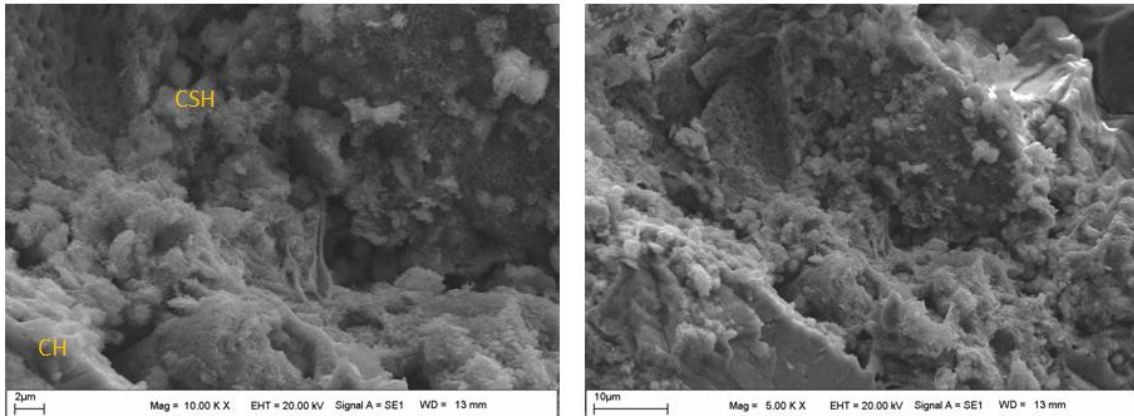
Şekil 4.31 : 700 °C sıcaklık sonrası K-PK grubu iç beton numuneler.



Şekil 4.32 : 700 °C sıcaklık sonrası KA grubu iç beton numuneler.



Şekil 4.33 : 700 °C sıcaklık sonrası G-Na grubu iç beton numuneler.



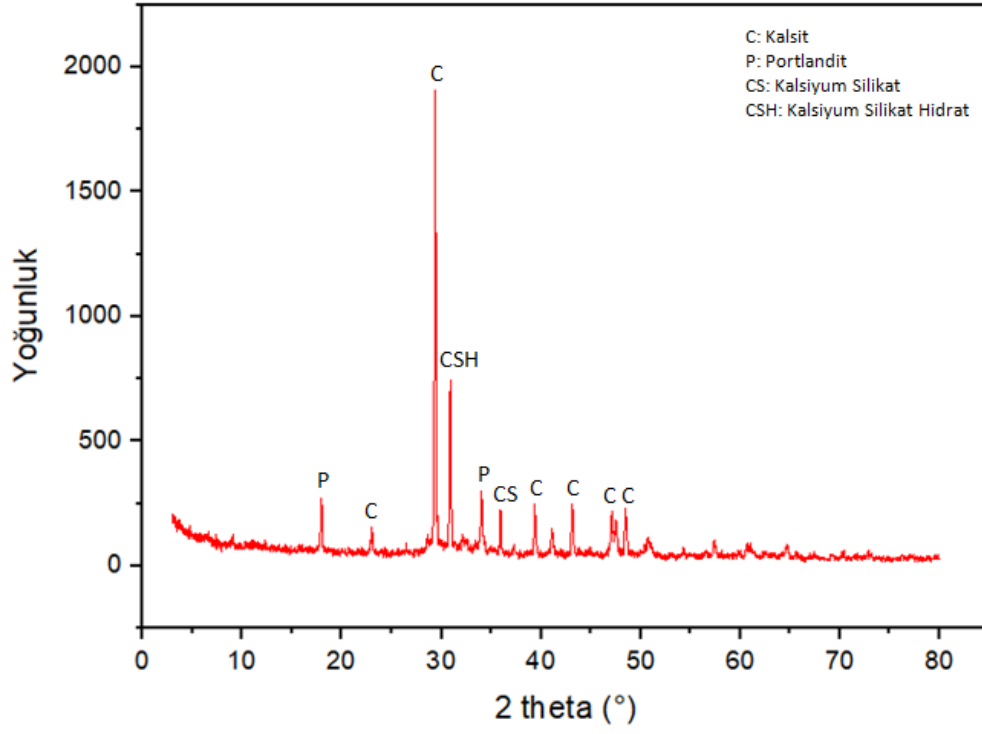
Şekil 4.34 : 700 °C sıcaklık sonrası G-K grubu iç beton numuneler.

Sıvası kesilen iç beton numunelerin ve kontrol beton numunelerin SEM görüntülerinde, tespit edilebilen CSH, CH, etrenjit, boşluk ve çatlaklar belirtilmiştir. 700 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde mikro çatlaklar oluşmuştur. Oluşan bu mikro çatlaklar numunelerdeki basınç dayanım değerlerinde gözlenen azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

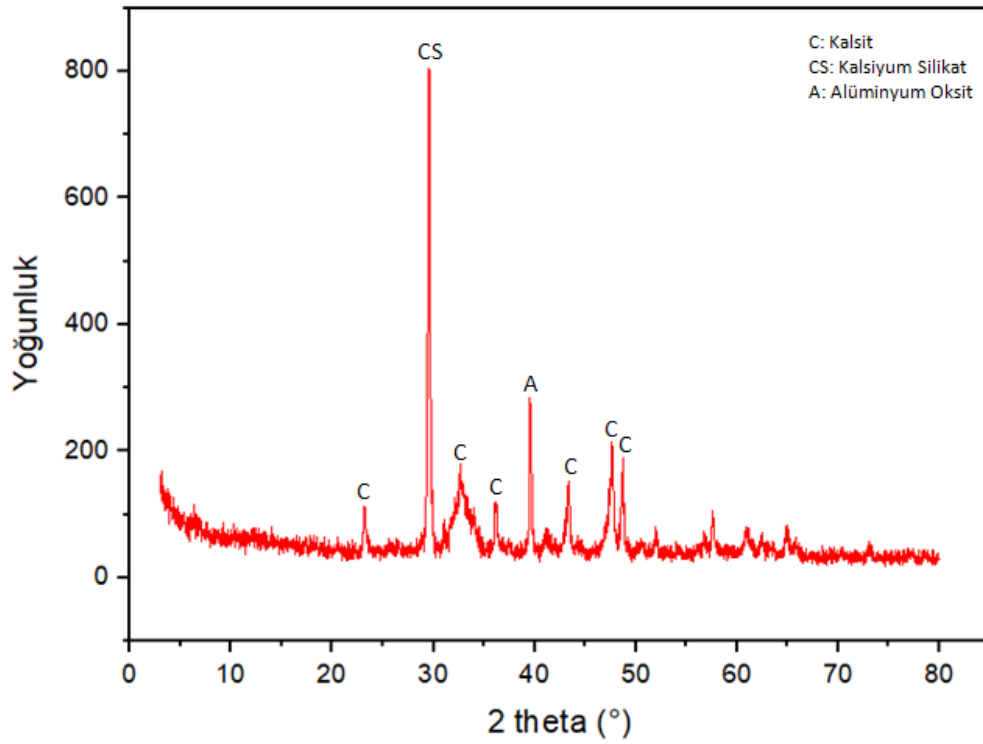
Arioz (2009) yaptığı çalışmada, 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelere yaptığı SEM analizine göre mikro çatlaklar, boşluklar, kısmen bozulmuş CSH jelleri ve deforme olmuş CH (Ca(OH)₂) kristalleri nedeniyle betonun mikroyapısında önemli değişiklikler oluştuğunu belirtmiştir. Dakman (2017) yaptığı çalışmada, katkısız olarak üretilmiş olduğu beton numunelerde SEM görüntüleri incelediğinde, 100 °C'de hidratasyona katılmayan suların buharlaşmaya başlaması sonucunda betonda kuruma olduğunu belirtmiştir. Betondaki buharlaşma sonucu artan boşluklu yapıya dikkat çekmiştir. Büyütme ölçütünün artması ile C-S-H yapısındaki kuruma ve etrenjit yapılarının görüldüğü belirtilmiştir. 700 °C'de ise betondaki boşluk yapısında tamamen kuruma olduğuna ve artan mikro çatlaklara dikkat çekilmiştir ve aynı zamanda CSH yapıları ve aralarındaki mikro boşlukların seçilebildiği belirtilmiştir. Cingi (2017) yaptığı çalışmada, 1000 °C sıcaklıkta yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış referans numunesinin mikroyapısını incelediğinde çatlakların meydana geldiğini, bu çatlakların dallanarak ve büyüyerek yayılması sonucunda dayanım kayıplarının olduğu belirtilmiştir.

4.4.2 XRD analizi

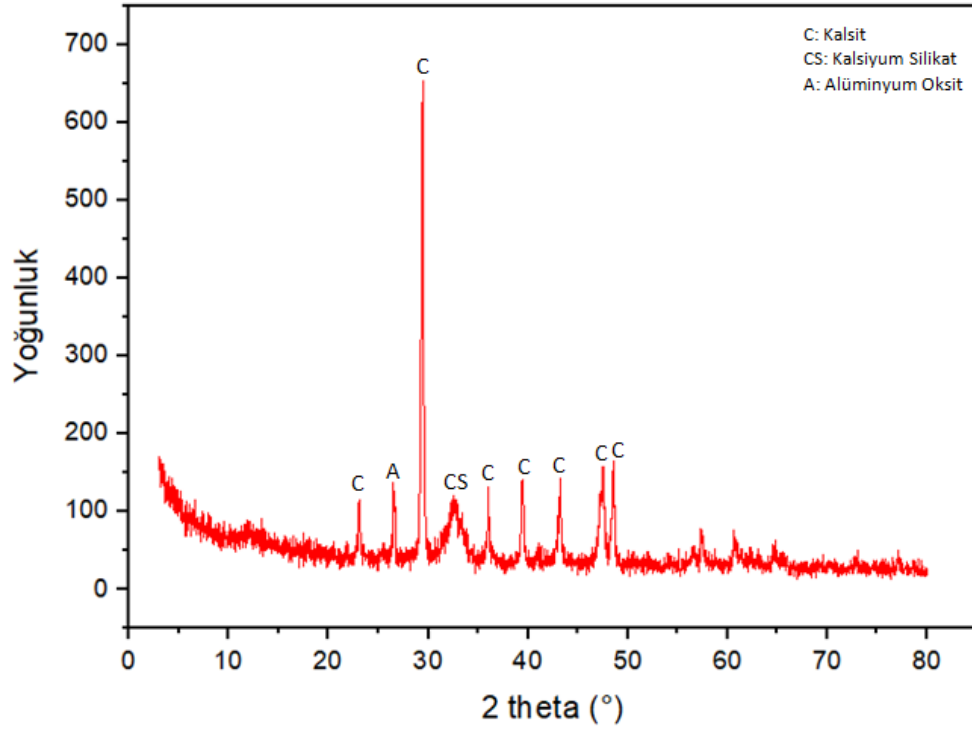
Yüksek sıcaklık etkisi öncesi (laboratuvar sıcaklığı) ve sonrası (700 °C) kontrol beton numunelerinden ve iç beton numunelerinden örnekler alınıp XRD cihazında analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.35-4.41'de verilmektedir.



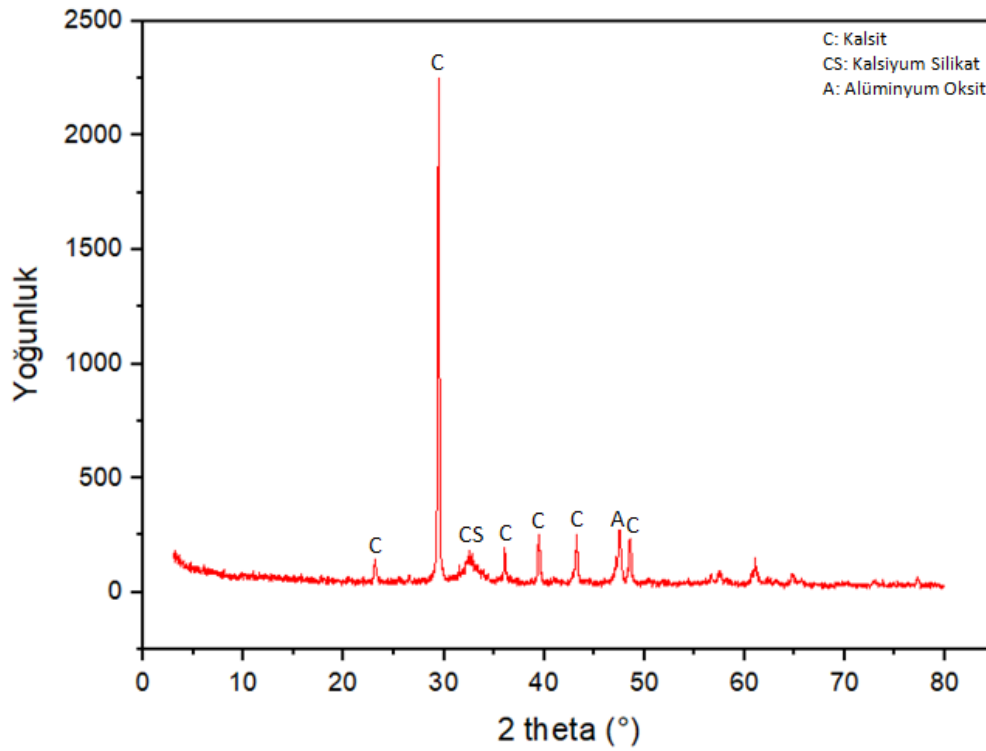
Şekil 4.35 : Lab ortamında bekletilmiş kontrol beton numuneleri.



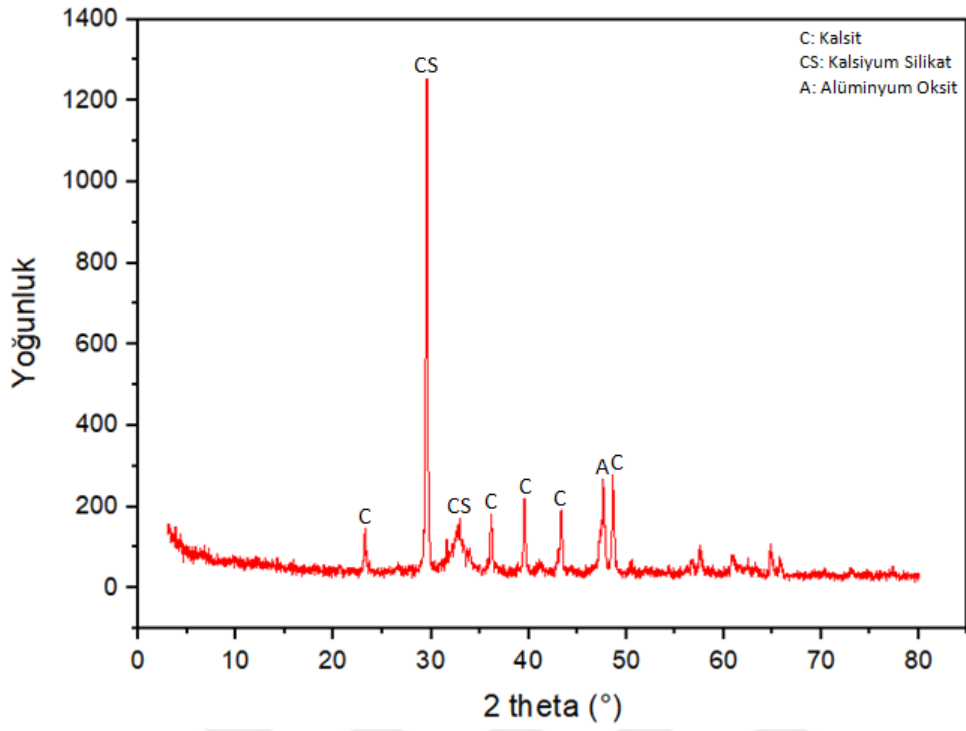
Şekil 4.36 : 700 °C sıcaklık sonrası kontrol beton numuneleri.



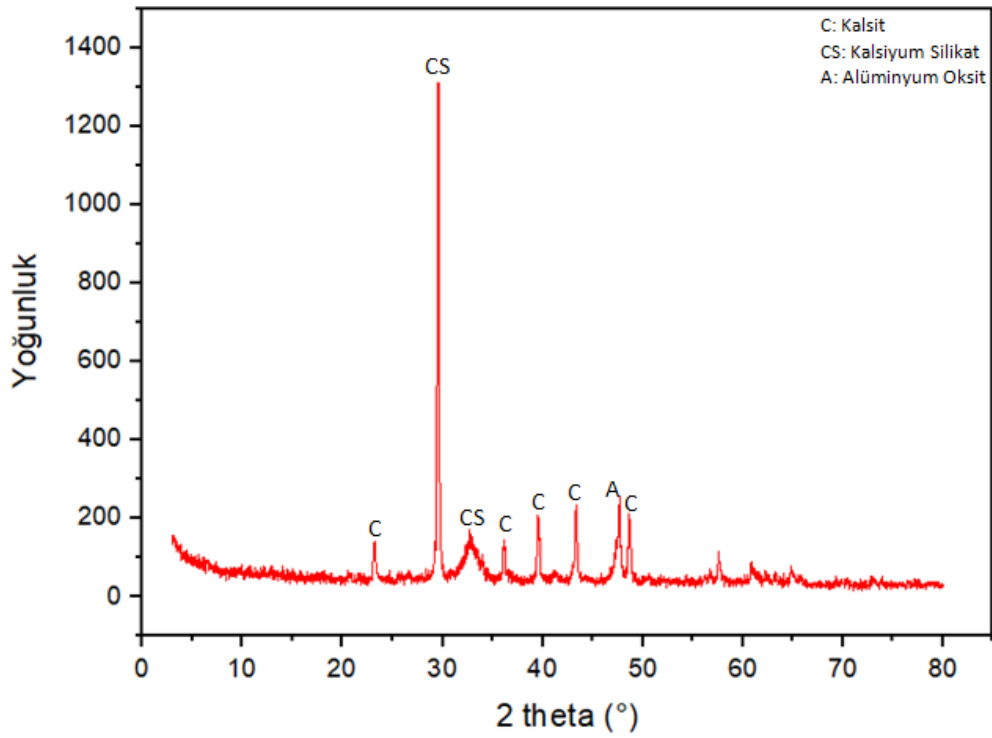
Şekil 4.37 : 700 °C sıcaklık sonrası PK grubu iç beton numuneler.



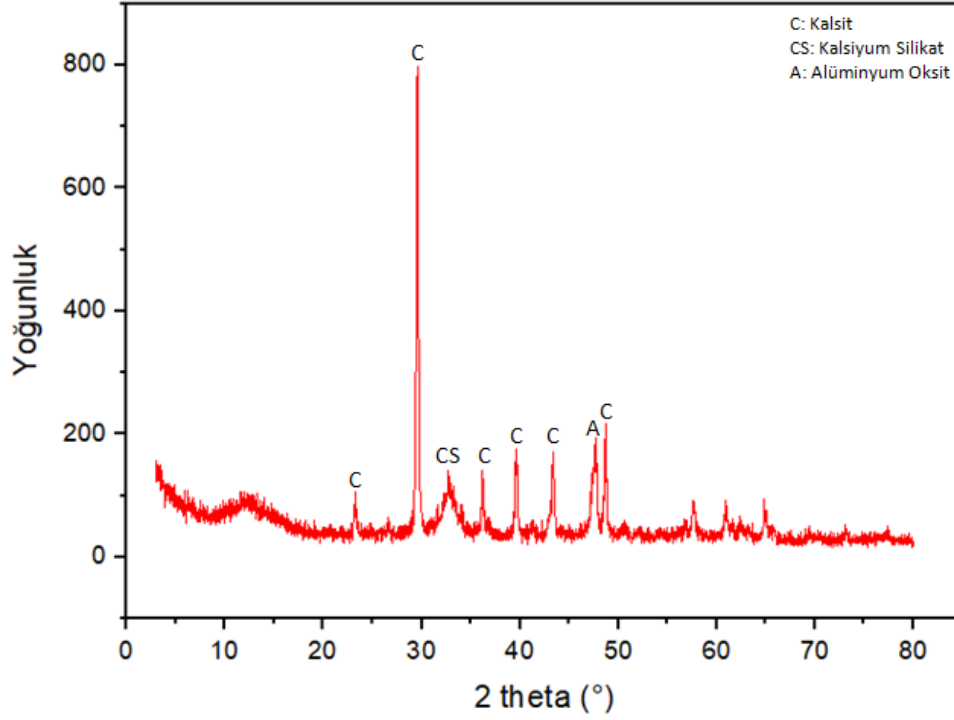
Şekil 4.38 : 700 °C sıcaklık sonrası K-PK grubu iç beton numuneler.



Şekil 4.39 : 700 °C sıcaklık sonrası KA grubu iç beton numuneler.



Şekil 4.40 : 700 °C sıcaklık sonrası G-Na grubu iç beton numuneler.



Şekil 4.41 : 700 °C sıcaklık sonrası G-K grubu iç beton numuneler.

Yapılan analiz neticesinde, laboratuvar ortamında bekletilmiş kontrol ve iç beton numunelerinde kalsit (CaCO_3), portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kalsiyum silikat (CaSiO_5) ve kalsiyum silikat hidrat mineralleri, 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıvası kesilmiş iç beton numunelerinde kalsit (CaCO_3), kalsiyum silikat (CaSiO_5) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) mineralleri tespit edilmiştir.

Kara ve Arslan (2018) yaptıkları çalışmada, referans ve antifriz katkılı C20 sınıfı iki farklı tip beton üretimi yapmışlardır ve üretimini yaptıkları numuneleri 3 saat süresince 20, 200, 400, 550 ve 700 °C sıcaklığa maruz bırakarak havada ve su püskürtme yoluyla soğutmuşlardır. 20 ve 700 °C beton örneklerini X ışını kırınım yöntemiyle mikroyapı analizi incelenmiştir. Elde edilen XRD sonuçlarına göre her iki beton türünde de 700 °C sıcaklık etkisi ve koşulları ile portlandit pikinin azaldığı belirtilmiştir. Peng ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada, sertleşmiş çimento hamurunun hem niteliksel hem niceliksel olarak anlaşılmasını sağlamak için 400 ile 800 °C arasındaki çeşitli tepe sıcaklıklarına maruz kaldıktan sonra numunelere XRD testi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre 400 °C'de kalsiyum silikat hidratın (CSH), kalsiyum hidroksitin (CH) ve kalsiyum karbonatın (CC) ayrışmadığı, 500 °C'de ise hem CH hem de CC'nin ayrıştığı tespit edilmiştir. 600, 700 ve 800 °C sıcaklıklarda CSH'nin önemli ölçüde ayrıştığı ve CC ve

CH'in daha hızlı şekilde ayrıştığı saptanmıştır. CSH'in ayrışmasıyla ana ürünler olarak C₃S ve β-C₂S oluştuğu belirtilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, standart olarak üretilen kontrol beton numunelerin ve 5 grup harç sıvası (PK, K-PK, KA, G-Na, G-K) ile kaplanarak yüksek sıcaklık etkisine (100, 300, 500 ve 700 °C) maruz bırakılan sıva ile kaplanmış iç beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Betonlarda sıva uygulanmamış kontrol beton numunelerle kıyas yapabilmek için yüksek sıcaklığa maruz bırakılan sıvalı numunelerin sıvası kesilerek iç beton numuneleri elde edilmiştir. Çalışmada sıva yapılmamış kontrol numunelere, sıva harç numunelere ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası sıvası kesilen iç beton numunelere yapılan deneyler basınç dayanımı, UPV, su emme oranı, ağırlık kaybı oranı ve BHA şeklindedir. Ayrıca numunelerde kür süresinin de (7, 14 ve 28 gün) etkisi incelenmiştir. Üretilen numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kontrol grubu numunelerin basınç dayanımı ve UPV değerlerinde 300 °C hariç sıcaklığın artması ile bu değerlerde azalmalar tespit edilmiştir. Ayrıca kür süresinin artmasıyla her sıcaklık aralığı için basınç dayanımı ve UPV değerleri artmıştır.
- Kontrol grubu numunelerde su emme oranları ve ağırlık kaybı oranları kür süresinin artmasıyla her sıcaklık aralığı için azalmıştır ve numunelerin maruz kaldığı sıcaklık derecelerinin artmasıyla bu oranlar artmıştır. Aynı zamanda kontrol grubu numunelerin maruz kaldığı sıcaklık derecesi artmasıyla BHA değerleri azalmıştır.
- K-PK grubunda üretilen sıva harç numunelerin basınç dayanım değerleri düşük olmasından dolayı basınç dayanımları ölçülemedi. Bu gruptaki incelemeler basınç dayanımı elde edilen 4 grup için değerlendirilmiştir. Kullanılan sıva harçları ile üretilen numunelerin KA grubu hariç kür süresi artmasıyla basınç dayanımları artmıştır. KA grubu ise 7 günlük basınç dayanımına göre 14 günlük basınç dayanımında düşüş meydana gelirken 28 günlük basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan 28 günlük sıva harç numunelerinin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı KA grubu olarak tespit edilirken, en düşük basınç dayanımı G-Na grubu olarak tespit edilmiştir.

- 5 grup sıva harcı ile üretilen numunelerin KA grubu hariç kür süresi artmasıyla UPV değerleri artmıştır. KA grubu ise 7 günlük UPV değerlerine göre 14 günlük UPV değerlerinde düşüş meydana gelirken 28 günlük UPV değerlerinde artış meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan 28 günlük sıva harç numunelerinin UPV değerleri incelendiğinde en yüksek UPV değeri KA grubu olarak tespit edilirken, en düşük UPV değeri K-PK grubu olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar basınç dayanım değerleri ile paralellik göstermiştir ve sıva harç grupları arası basınç dayanımı-UPV ilişki değeri 0.71 olarak elde edilmiştir.
- 5 grup sıva harcı ile üretilen numunelerin maruz kaldığı sıcaklık derecesinin artmasıyla su emme oranı değerleri artmıştır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan sıva harç numunelerinin su emme oranı değerleri incelendiğinde en düşük su emme oranı değeri G-K grubu olarak gözlenirken, en yüksek su emme oranı değeri ise 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan K-PK grubunun parçalanmasından dolayı 500 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelere bakılmıştır ve 500 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin su emme oranı bakımından en yüksek değere sahip K-PK grubu olarak tespit edilmiştir.
- 5 grup sıva harcı ile üretilen numunelerin maruz kaldığı sıcaklık derecesinin artmasıyla genelde ağırlık kaybı oranı değerleri artmıştır. 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan 28 günlük sıva harç numunelerinin ağırlık kaybı oranı değerleri incelendiğinde en düşük ağırlık kaybı oranı PK grubu olarak tespit edilirken, en yüksek ağırlık kaybı oranı G-Na grubu olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda 700 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin BHA değerleri incelendiğinde en yüksek BHA değeri KA ve G-K grupları olarak tespit edilirken, en düşük BHA değerleri K-PK grubu olarak belirlenmiştir.
- Sıvası kesilen iç beton numunelerin sıcaklık değerlerinin artmasıyla dayanımda azalmalar meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sıvası kesilen iç betonların basınç dayanımları incelendiğinde, kür sürelerinin artmasıyla dayanımda artış tespit edilmiştir ve kontrol beton numunelere göre her grup numune için basınç dayanımında artış görülmüştür. 700 °C sıcaklık referans olarak seçildiği takdirde, sıva yapılmamış kontrol beton numunelere göre en yüksek basınç dayanım artışı PK grubu olarak tespit edilirken, en düşük basınç dayanımı artışı G-Na grubu olarak tespit edilmiştir.

- Sıvası kesilen iç beton numunelerin UPV değerleri incelendiğinde, sıcaklık değerlerinin artmasıyla UPV değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklık referans olarak seçildiği takdirde iç beton numunelerin, kontrol beton numunelere göre en yüksek UPV değer artışı PK grubu olarak tespit edilirken, en düşük UPV değer artışı G-Na grubu olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer artışları sıvası kesilen iç beton numunelerin basınç dayanımı ile paralellik göstermektedir.
- Sıvası kesilen iç beton numunelerin su emme oranı değerleri incelendiğinde, sıcaklık değerlerinin artmasıyla su emme oranı değerlerinde artış meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklık referans olarak seçildiği takdirde iç beton numunelerin, kontrol beton numunelere göre en düşük su emme oranı değer artışı G-Na grubu olarak tespit edilirken, en yüksek su emme oranı değer artışı PK grubu olarak tespit edilmiştir.
- Sıvası kesilen iç beton numunelerin ağırlık kaybı oranı değerleri incelendiğinde, sıcaklık değerlerinin artmasıyla ağırlık kaybı oranı değerlerinde artış meydana gelmiştir. 700 °C sıcaklık referans olarak seçildiği takdirde iç beton numunelerin, kontrol beton numunelere göre en düşük ağırlık kaybı oranı değer artışı K-PK grubu olarak tespit edilirken, en yüksek ağırlık kaybı oranı değer artışı G-Na grubu olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda sıvası kesilen iç beton numunelerde sıcaklık değerlerinin artmasıyla BHA değerleri azalmıştır. 700 °C sıcaklık referans olarak seçildiği takdirde iç beton numunelerin, kontrol beton numunelere göre en yüksek BHA değer artışı KA grubu olarak tespit edilirken, en düşük BHA değer artışı G-Na, G-K ve PK grupları olarak tespit edilmiştir.
- 5 farklı grup harç karışımı ile kaplama yapılmış sıvalı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görselleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile çatlak gelişimi artmıştır ve renk dönüşümleri meydana gelmiştir. Numunelerin maruz kaldığı yüksek sıcaklık etkisi sonucunda çatlak oluşumu bakımından en çok etkilenen grup K-PK numune grubu olurken, sıcaklığın etkisiyle meydana gelen renk değişiminin en bariz olduğu grup KA numune grubu olmuştur.
- Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, beton numunelere kaplama yapılması betonun maruz kalabileceği yüksek sıcaklıklar etkisine karşı beton numunelerde dayanıklılığını etkileyebilecek olumsuz sonuçları azaltmıştır. Ayrıca yüksek

sıcaklık etkisindeki kaplamalı betonlarda bağlayıcı tipine göre meydana gelebilecek renk değişimi, betonun maruz kaldığı sıcaklık aralığı tespitinde yardımcı olabilir.

Yapılan tez çalışmasında uygulanan deneyler ve elde edilen sonuçlara göre beton numunelerin yüksek sıcaklık dayanıklılığını araştırmak için farklı bağlayıcı tipleri, farklı aktivatör konsantrasyonları, farklı kür koşulları, farklı soğutma şekilleri gibi parametreler belirlenerek farklı metotlar geliştirilip, yeni çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Abed, M., & de Brito, J.** (2020). Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing, *Journal of Building Engineering*, 32, 101720.
- Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S., & Castel, A.** (2015). Recycling of geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 101, 152–158.
- Akbulut, F.** (2020). Kırmızı Çamur ve Yüksek Fırın Cürufunun Perlit Esaslı Geopolimer Beton Özelliklerine Etkisi (Yüksek lisans tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akbulut, M. A.** (2018). Hazır Isı Yalıtımlı Sıvaların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Uygunluk Değerlendirmesi (Yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Akcan, M.** (2015). Harran Bölgesi Tarihi Harçların Fiziko-Kimyasal ve Minerolojik Özelliklerinin Araştırılması (Yüksek lisans tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Aktaş, H.** (2019). Tarihi Çeçen Süleyman Efendi Konağındaki Sıvaların İncelenmesi (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akyürek, M.** (2019). Yüksek Sıcaklığa Maruz FRP Donatılı Betonlarda Paspayı ve Beton Dayanımının Etkisi (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Albitar, M., Ali, M. M., Visintin, P., & Drechsler, M.** (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Construction and Building Materials*, 136, 374–385.
- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D.** (2012). Geopolymer concrete—a review, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1 (2), 118–122.
- Alıyev, M.** (2019). Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Cam Tozu ve Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Etkisi (Yüksek lisans tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Angulo-Ramírez, D. E., de Gutiérrez, R. M., & Puertas, F.** (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration, *Construction and Building Materials*, 140, 119–128.
- Arioz, O.** (2009). Retained properties of concrete exposed to high temperatures: Size effect, *Fire and Materials: An International Journal*, 33 (5), 211–222.
- ASTM C597** (2002). *Standart test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydın, S., Yazıcı, H., & Baradan, B.** (2008). High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 22 (4), 504–512.
- Aytaç, A. H.** (2006). Portland Çimentosu Kompozisyonunun Akışkanlaştırıcı Katkı Performansına Etkisi (Yüksek lisans tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Babadağ, Y.** (2009). Kimyasal Katkıların Sıva Harçları Üzerindeki Etkileri (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayraktar, O. Y.** (2012). Alternatif Sıva Harçlarının Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılığı (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bensted, J.**, (2002). *Calcium Aluminate Cements*. In Bensted, J., Barnes, P. (Eds.), *Structure and Performance of Cement* (2nd Edition) (114–138), Oxfordshire.
- Bingöl, A. F. & Gül, R.** (2009). Donatı-beton aderansı, yüksek sıcaklıkların beton dayanımına ve aderansa etkileri konusunda bir derleme, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2 (2), 211–230.
- Bingöl, Ş.** (2018). Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması (Doktora tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A. H., Eken, M., Kara, M., & Şayir, Z.** (2013). Alüminyum talaşı, bims ve gazbeton tozu içeren betonların yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi, *Electronic Journal of Construction Technologies*, 9 (1), 1–15.
- Bodnarova, L., Valek, J., Sitek, L., & Foldyna, J.** (2013). Effect of high temperatures on cement composite materials in concrete structures, *Acta Geodynamica Geomaterialia*, 10 (2), 173–180.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K.** (2017). *Structural Design For Fire Safety*. John Wiley & Sons.
- Burnaz, O.** (2010). Betonarme Yapılarda Yangın Ve Bu Yapıların Yangın Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Burnaz, O., & Durmuş, A.** (2004). Betonarme Yapı Elamanlarının Yangın Başarımları. *Türkiye inşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongresi*, (s. 100–102).
- Çakır, K.** (2010). Doğal Puzolan Katkılı Kireç Harcı ile Toprak Karışımının Kerpiç Yapılarda Dış Sıva Olarak Kullanılabilirliği Üzerine Deneysel Bir Araştırma (Yüksek lisans tezi), Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, M.** (2019). Yangın ve Yüksek Sıcaklığın Farklı Dayanım Sınıflarındaki Genleştirilmiş Perlit Agregası Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkileri (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J. F., & Guo, Y. C.** (2014). Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 71, 1–15.
- Cheng, T. W., & Chiu, J. P.** (2003). Fire-resistant geopolimer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16 (3), 205–210.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V.** (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolimer, *Cement and concrete composites*, 29 (3), 224–229.

- Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. M.** (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 213, 100–108.
- Chore, H. S., & Joshi, M. P.** (2015). Strength evaluation of concrete with fly ash and GGBFS as cement replacing materials, *Advances in Concrete Construction*, 3 (3), 223.
- Chotard, T., Gimet-Breart, N., Smith, A., Fargeot, D., Bonnet, J. P., & Gault, C.** (2001). Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age, *Cement and Concrete Research*, 31 (3), 405–412.
- Çiftçi, M.** (2020). Nano Boyutlu Taneciklerin Kullanımıyla Yüksek Hacimde Yüksek Fırın Cürufu İçeren Katkılı Çimento Tasarımı (Yüksek lisans tezi), Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Cingi, R.** (2017). Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı (Yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Crook, D. N., & Murray, M. J.** (1970). Regain of strength after firing of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 22 (72), 149–154.
- Cruz, C. R., & Gillen, M.** (1980). Thermal expansion of Portland cement paste, mortar and concrete at high temperatures, *Fire and Materials*, 4 (2), 66–70.
- Dakman, M. H.** (2017). Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi (Yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Davidovits, J.** (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37 (8), 1633–1656.
- De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C., Vilela, A. C., Da Silva, F. J., Pavao, B., & Veit, H.** (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, 33 (6), 653–660.
- DeJong, M. J.** (2005). Sources of high temperature degradation of cement-based materials: nanoindentation and microporoelastic analysis (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Delhomme, F., Ambroise, J., & Limam, A.** (2012). Effects of high temperatures on mortar specimens containing Portland cement and GGBFS, *Materials and Structures*, 45 (11), 1685–1692.
- Demir, A.** (2008). Kiremit Kırığı Agregalı Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi (Doktora tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., & Karakoç, M. B.** (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (12), 2329–2336.
- Demirel, B., & Keleştemur, O.** (2010). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, *Fire Safety Journal*, 45 (6-8), 385–391.

- Demirel, B., & Keleştemur, O.** (2011). Yüksek Sıcaklığa Maruz Pomza Ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Kür Yaşının Etkisi. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1).
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., & Shen, C.** (2015). An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure, *Materials & Design*, 74, 125–137.
- Durmuş, G.** (2008). Çimentolu Harç Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisinin Belirlenmesi ve Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi (Doktora tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S.** (2007). Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42 (9), 2917–2933.
- Erdem, H.** (2010). Yüksek sıcaklığa maruz T-kesitli betonarme kirişlerin eğilme taşıma gücü, *Teknik Dergi*, 21 (102), 5023–5036.
- Erdoğan, T.S. Erdoğan, T.Y.** (2007). Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, (ss. 263–275), Ankara, 12-13 Nisan.
- Eren, M. E.** (1998). Dolmabahçe Sarayı Yapı Taşlarının Bozulma Nedenlerinin Saptanması ve Korunması Üzerine Bir Araştırma (Doktora tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Felicetti, R., & Gambarova, P. G.** (1998). Effects of high temperature on the residual compressive strength of high-strength siliceous concretes, *ACI Materials Journal*, 95, 395–406.
- Georgali, B., & Tsakiridis, P. E.** (2005). Microstructure of fire-damaged concrete, A case study, *Cement and Concrete Composites*, 27 (2), 255–259.
- Gökdemir, A.** (2010). İklim Parametreleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Dış Düz Sıva Performansının Tahmini (Doktora tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Guirado, F., & Galí, S.** (2006). Quantitative Rietveld analysis of CAC clinker phases using synchrotron radiation, *Cement and Concrete Research*, 36 (11), 2021–2032.
- Gülce, C.** (2009). Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Özellikleri (Yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Gürkan, M. Ş. & Türkmen, İ.** (2020). Investigation of the Compressive Strength of Geopolymer Concretes Produced at Constant Solution / Binder Ratio in Different Alkali Activators and Molarity, V. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, (pp. 251–257). Malatya, 18-20 Aralık.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V.** (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research Report GC 1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.

- Hiremath, P. N., & Yaragal, S. C.** (2017). Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 154, 72–87.
- Hossain, K. M. A.** (2006). Macro-and microstructural investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (4), 527–536.
- Hossein Eskandani, A.** (2020). Eksenel Yüklü Betonarme Kolonların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N., & Nam, J.** (2018). Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity, *Construction and Building Materials*, 171, 511–520.
- Idrees, M., Sonyal, M. S., & Ekincioglu, Ö.** (2019). Calorimetric investigation of supplementary cementitious material incorporated calcium aluminate mortars, *10. International Concrete Congress*, May 2-4, 373–382.
- Industry, C.** (2008). *Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures*, The Concrete Society.
- ISO, I.** (1975). Fire resistance tests-elements of building construction. ISO 834.
- Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K.** (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers, *Construction and Building Materials*, 50, 169–176.
- Kan, Y., Pei, K., Cheng, M.,** (2017). A Study of Fracture Properties of High Alumina Shielding Concrete (HASC), 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 20-25, Busan, Division I: 10p.
- Kantarcı, F.** (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması (Yüksek lisans tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kaptan, M.** (2020). Sıva Olarak Kullanılacak Farklı Yöntem ve Türde Üretilen Harçların İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize.
- Kara, İ. B., & Arslan, M.** (2018). Investigation of high temperature effects on concrete additive antifreeze, *Journal of Science and Engineering*, Aksaray.
- Karakoç, M. B., Türkmen, İ., Maraş, M. M., Kantarcı, F., Demirboğa, R., & Toprak, M. U.** (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar, *Construction and Building Materials*, 72, 283–292.
- Kaya, T., & Yazıcıoğlu, S.** (2015). Farklı tip sıvalarla kaplı betonun mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık etkisi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 43–52.
- Kaya, T., Yazıcıoğlu, S., & Çerçevik, A. E.** (2016). Kaplamalı Beton Basınç Dayanımına Donma-Çözülmenin Etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4 (2), 59–65.

- Kayacı, H.** (2014). Betonarme Yüksek Binalarda Yangın Güvenliği ve Yangın Senaryoları Üzerinde İncelemeler (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khaliq, W., & Khan, H. A.** (2015). High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete, *Construction and Building Materials*, 94, 475–487.
- Khoury, G. A.** (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research*, 44 (161), 291–309.
- Kirchhof, L. D., Lorenzi, A., & Silva Filho, L. C. P.** (2015). Assessment of concrete residual strength at high temperatures using ultrasonic pulse velocity, *The e-Journal of Nondestructive Testing*, 20 (7), 1–9.
- Kızıllkanat, A. B.** (2010). Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonun Basınç Dayanımı Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması (Doktora tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kızıllkanat, A. B., & Yüzer, N.** (2008). Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi. *İMO Teknik Dergi*, 19 (92), 4381–4392.
- Kızıllkanat, A. B., Yüzer, N., & Kabay, N.** (2013). Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 45, 157–161.
- Klaus, S., Buhr, A., Schmidtmeier, D., Kuiper, S., & Goetz-Neunhoeffler, F.** (2015). Hydration of Calcium Aluminate Cement Phases CA and CA₂ in Refractory Applications, In *The Unified International Technical Conference on Refractories*, At Vienna, Austria.
- Kodur, V. K. R., & Phan, L.** (2007). Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems, *Fire Safety Journal*, 42 (6-7), 482–488.
- Komljenović, M., Bašcarević, Z., & Bradić, V.** (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 35–42.
- Lee, N. K., Koh, K. T., Park, S. H., & Ryu, G. S.** (2017). Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (UHPC) exposed to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 102, 109–118.
- Li, Y., & Ren, S.** (2011). *Building Decorative Materials*. Elsevier.
- Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y.** (2004). *Development of sustainable cementitious materials*. In Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China (pp. 55–76).
- Lin, Y., Hsiao, C., Yang, H., & Lin, Y. F.** (2011). The effect of post-fire-curing on strength–velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength, *Fire Safety Journal*, 46 (4), 178–185.
- Lloyd, N., & Rangan, V.** (2010). Geopolymer concrete with fly ash, In *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, (pp. 1493–1504).

- Luga, E.** (2015). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri (Doctoral dissertation (Doktora tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Mahsanlar, N.** (2006). Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı (Yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Malhotra, H. L.** (1956). The effect of temperature on the compressive strength of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 8 (23), 85–94.
- Mavi, Ö.** (2000). Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J.** (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, And Materials*, McGraw-Hill Education.
- Midgley, H. G., & Midgley, A.** (1975). The conversion of high alumina cement, *Magazine of Concrete Research*, 27 (91), 59–77.
- Mollaismailoğlu, A.** (2020). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Yüksek Oranda Ögütülmüş Yüksek fırın Cürufu Kullanımının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi (Yüksek lisans tezi), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Morsy, M. S., Galal, A. F., & Abo-El-Enein, S. A.** (1998). Effect of temperature on phase composition and microstructure of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay, *Cement and Concrete Research*, 28 (8), 1157–1163.
- Neville, A. M.** (1995). *Properties of Concrete*, Longman Scientific and Technical, New York.
- Newman, J. ve Choo, B.S.** (2003). *Advanced Concrete Technology 2 -Concrete Properties*, Elsevier.
- Ng, G. B. S.** (2013). Interactions of Polycarboxylate based Superplasticizers with Montmorillonite Clay in Portland Cement and with Calcium Aluminate Cement (Doctoral dissertation), Technische Universität München.
- Noumowe, A. N., Siddique, R., & Debicki, G.** (2009). Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C), *Construction and Building Materials*, 23 (5), 1855–1861.
- Odler, I.** (2000). Special Inorganic Cements, *Modern Concrete Technology* 8, E&FN.
- Oktay, B. M., Odabaş, E., & Kurnaz, M.** (2017). Fosfojips ve perlit katkılı sıvaların su emme miktarlarının 24 deneysel tasarım yöntemiyle belirlenmesi, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 1 (1), 18–20.
- Omer, S. A., Demirboğa, R., & Khushefati, W. H.** (2015). Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 94, 189–195.
- Orhan, E., & Şahin, M.** (2016). Ögütülmüş atık cam tozu katkılı betonun basınç dayanımına yüksek sıcaklığın etkisi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(1).

- Özbey, S.** (2009). Farklı Çimento Tipleri ile Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdemir, O. A.** (2019). Sentetik Lif, Çelik Lif, Çelik Hasır, Burgu Çelik İçeren Betonların Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özer, M.** (1982). *Yapılarda Isı-Su Yalıtımları: Yapı Fiziksel Tanım Hesaplama Esasları*, Özer Yayınları.
- Öztürk, H.** (2008). Kalsiyum Alüminatlı Çimentonun Isıl dayanımı ve Monolitik Refrakter Olarak Kullanılması (Yüksek lisans tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Park, S. M., Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K.** (2016). Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 89, 72–79.
- Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B.** (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, 77, 370–395.
- Peng, G. F., Chan, S. Y. N., & Anson, M.** (2001). Chemical kinetics of CSH decomposition in hardened cement paste subjected to elevated temperatures up to 800 °C, *Advances in Cement Research*, 13 (2), 47–52.
- Peng, G. F., Chan, S. Y. N., Song, Q. M., & Yi, Q. X.** (2006). Effect of high temperature on concrete: a literature review, *Key Engineering Materials*, 302, 138–149.
- Piasta, J., Sawicz, Z., & Rudzinski, L.** (1984). Changes in the structure of hardened cement paste due to high temperature, *Matériaux et Construction*, 17 (4), 291–296.
- Pöllmann, H.** (2012). Calcium aluminate cements—raw materials, differences, hydration and properties, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74 (1), 1–82.
- Qassab, H. F. S.** (2019). Bina Yıkıntı Atıklarının Harç Karışımında Agregat Olarak Kullanılabilirliği (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rangan B.V.** (2008). Fly ash-based geopolymer concrete, Research Report, No.4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z.** (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar, *Materials & Design*, 59, 532-539.
- Richardson, D. N.** (2006). *Strength and durability characteristics of a 70% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete mix*, Missouri Department of Transportation Organizational Results, University of Missouri-Rolla.
- Riley, M. A.** (1991). Possible new method for the assessment of fire-damaged concrete, *Magazine of Concrete Research*, 43 (155), 87–92.
- Sağsöz, A. E.** (2013). Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri ile Renk Değişiminin İncelenmesi (Doktora tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Sarshar, R., & Khoury, G. A.** (1993). Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 45 (162), 51–61.
- Scheinherrová, L., & Trník, A.** (2017). Hydration of calcium aluminate cement determined by thermal analysis, *In AIP Conference Proceedings*, 1866 (1) : 040034.
- Scrivener, K. L.** (2003). *Calcium aluminate cements*. J. Newman ve B. S. Choo, (Ed.), Advanced Concrete Technology, Oxford: Elsevier Ltd.
- Şengül, K.** (2018). Perlit İlavesinin Kalsiyum Alüminat Çimentosu Pastalarının Dayanımının Gelişimine ve Termal Stabilesine Etkisi (Yüksek lisans tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Şenkaya, A.** (2019). Farklı Çimento Tipleri ile Oluşturulmuş Jet Grout Kolonların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ultra Ses Yöntemiyle İncelenmesi (Yüksek lisans tezi), Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Shi, X. S., Collins, F. G., Zhao, X. L., & Wang, Q. Y.** (2012). Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete, *Journal of Hazardous Materials*, 237, 20–29.
- Siddique, R.** (2007). *Waste materials and by-products in concrete*, Springer Science & Business Media.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K.** (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments, *Construction and building materials*, 85, 78–90.
- Siyal, A. A., Azizli, K. A., Man, Z., & Ullah, H.** (2016). Effects of parameters on the setting time of fly ash based geopolymers using Taguchi method, *Procedia Engineering*, 148, 302–307.
- Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ.** (2011). Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi, *Politeknik Dergisi*, 14 (2), 141–148.
- Sucu, M., & Delibaş, T.** (2015). Kalsiyum alüminat çimentosu bazlı tamir betonları, *Hazır Beton*, 88–94.
- Swallow, P., & Carrington, D.** (1995). Limes and lime mortars—part one, *Journal of Architectural Conservation*, 1 (3), 7–25.
- Swift, P. D.** (2013). The development of calcium aluminate phosphate cement for radioactive waste encapsulation (Doctoral dissertation), University of Sheffield.
- Taylor, H. F. W.** (1990). *Cement Chemistry*, London, England: Academic Press.
- Tekin, D.** (2014). Farklı İnceliklerdeki Mineral Katkılı Çimentoların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Yüksek lisans tezi), Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S.** (2009). Effect of Na₂O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 3, 508–513.

- Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindaprasirt, P., & Chaysuwan, D.** (2016). Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 104, 293–297.
- Topal, Ö.** (2020). Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Yangın Dayanımına Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisinin Araştırılması (Yüksek lisans tezi), İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Topal, Ö., Karakoç, M. B., & Özcan, A.** (2021). Effects of elevated temperatures on the properties of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) based geopolymer concretes containing recycled concrete aggregate, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–15.
- Topçu, İ. B., & Canbaz, M.** (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlarda donma çözümü, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (2), 1–16.
- Topçu, İ. B., & Demir, A.** (2005). Uçucu kül katkılı harçlarda yüksek sıcaklık etkisi, *İMO İstanbul Şubesi*, 6, 101–115.
- Topçu, İ. B., & Demir, A.** (2007). Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi, *7. Ulusal Beton Kongresi*, 455–463.
- TS 802** (2016). *Beton karışım tasarımı hesap esasları*. TSE, Ankara.
- TS EN 1097-6.** (2013). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2** (2019). *Beton, Taze Beton Deneyleri, Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3** (2019). *Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7** (2019). *Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 13501-2** (2009). *Yapı mamulleri ve bina elemanları – Yangın sınıflandırılması Bölüm 2: Yangın dayanım deneylerinden elde edilen verileri kullanarak sınıflandırma (Havalandırma tesisatları hariç)*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1** (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 1–40.
- TS EN 206-1** (2014). *Beton-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-2** (1999). *Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu*. TSE, Ankara.
- TS ISO 3310-2** (2015). *Deney elekleri – Teknik özellikler ve deneyler – Bölüm 2: Delikli metal plakalı deney elekleri*. TSE, Ankara.
- Tuyan, M., Soykan, K. S., Namal, İ., & Çakır, Ö. A.** (2020). Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 23 (2), 311–320.

- Uçarkoşar, B.** (2013). Prinç Kabuğu Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonun Yüksek Sıcaklık Performansı (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uğurlu, A. İ.** (2020). Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme ve Sülfat Direncine Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisi (Yüksek lisans tezi), İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Ulu, C.** (2016) Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Metakaolinli Harçlarda Atık Pet Agrega Kullanımının Araştırılması (Yüksek lisans tezi), Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ulus, İ.** (2007). Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması (Doktora tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Uysal, A.** (2004). Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uysal, M., Yılmaz, K., & İpek, M.** (2012). Properties and behavior of self-compacting concrete produced with GBFS and FA additives subjected to high temperatures, *Construction and Building Materials*, 28 (1), 321–326.
- Van Chanh, N., Trung, B. D., & Van Tuan, D.** (2008). Recent research geopolymer concrete, *In The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA*, Vietnam, 235–241.
- Vergül, K.** (2019). Silis Dumanı ve Hidrofobik Malzemelerin Kil Sıvaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi (Yüksek lisans tezi), Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Xu, Y., Wong, Y. L., Poon, C. S., & Anson, M.** (2001). Impact of high temperature on PFA concrete, *Cement and Concrete Research*, 31 (7), 1065–1073.
- Yamazaki, N., Yamazaki, M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T., Ueda, M., ... & Saito, K.** (1995). Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures, *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1-2), 121–138.
- Yanardağ, B.** (2020). Kalsiyum Alüminat Çimentolu Köpük Beton Tasarımı ve Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi (Yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., & Liu, J. Y.** (2009). Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity, *Fire Safety Journal*, 44 (1), 121–130.
- Yiğiter, M.** (2014). Kısa Saplı Lif Karakterli Endüstriyel Atıklardan Sıva Malzemesi Üretimi (Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Yılmaz, C.** (2010). Portland Çimentosu Kullanımının Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yüzer, N., Akbaş, B., & Kızılkant, A. B.** (2007). Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonun Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Tahmini. *Ulusal Beton Kongresi*, (s. 271–280).
- Zhang, H.** (2011). *Building materials in Civil Engineering*. Elsevier.

Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Yan, J., & Yuan, Z. S. (2018). Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concret, *Construction and Building Materials*, 163, 277–285.

Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., & Yuan, Z. S. (2020). Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure, *Cement and Concrete Composites*, 106, 103483.



ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

YAYIN LİSTESİ

- **Bettemir, Ö.H., Gürkan, M.Ş., Özdemir, M.E., Mehteroğlu, A., & Doğandemir, K.** (2018). Automated Quantity Take-Off Preparation of Retaining Systems. Cilicia International Symposium on Engineering and Technology (CISSET2018), (pp. 42–47). Mersin, 26-27 October.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Gürkan, M. Ş. & Türkmen, İ.** (2020). Investigation of the Compressive Strength of Geopolymer Concretes produced at Constant Solution / Binder Ratio in Different Alkali Activators and Molarity, V. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, (pp. 251–257). Malatya, 18-20 Aralık.