



**YANGIN VE YÜKSEK SICAKLIĞIN FARKLI DAYANIM
SINIFLARINDAKİ GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASI KATKILI
BETONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Mehmet ÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2019

Mehmet ÇELİK tarafından hazırlanan “YANGIN VE YÜKSEK SICAKLIĞIN, FARKLI DAYANIM SINIFLARINDAKİ GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASI KATKILI BETONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Doç. Dr. Arzuhan Burcu GÜLTEKİN

Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÖKDEMİR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet ÇELİK

02/01/2019

YANGIN VE YÜKSEK SICAKLIĞIN, FARKLI DAYANIM SINIFLARINDAKİ GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASI KATKILI BETONLAR ÜZERİNDEKİ

ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak, 2019

ÖZET

Bu çalışmada 10x10x10 cm boyutlarında, 144 adet toplam beton hacminin %20'si kadar genleştirilmiş perlit agregası (GPA) katkılı ve 144 adet GPA katkısız olmak üzere toplam 288 adet beton numunesi üretilmiştir. Beton numuneler, basınç dayanım sınıfları C16/20, C20/25, C30/37 ve C40/50 olacak şekilde dört farklı su/çimento (s/ç) oranında üretilerek, 22 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C sıcaklık değerlerine maruz bırakılmışlardır. Belirtilen sıcaklık değerlerine maruz bırakılan numunelerin birim hacim ağırlık (BHA), hacimce su emme (HSE), kapiler su emme (KSE), ultrases geçiş hızı (UGH), aşınma dayanımı (AD) ve basınç dayanımı (BD) gibi fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini, numunelerin GPA'lı veya GPA'sız olmasının, s/ç oranlarının ve yüksek sıcaklık etkisini fırın veya yangın ile vermenin nasıl etkilediğini araştırmaktır. Yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verildiğinde GPA'lı numunelerin GPA'sız numunelere göre aşınma kayıplarında, HSE oranlarında ve KSE katsayılarında daha fazla artış meydana geldiği, UGH ve BHA kayıplarında ise daha fazla düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. AD deneyinde, BD arttıkça aşınma kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. 500 °C'deki fırın numunelerinin BD kayıpları ortalama %60 iken, yangın numunelerinin ise ortalama %10 çıkmıştır. BD deneyinde numunelerin GPA'lı olmasıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD kayıplarının büyüklükleri arasında herhangi bir bağlantı gözlemlenememiştir. Genel olarak numunelere ocak yardımıyla verilen yangın etkisinin yetersiz kaldığı düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : Genleştirilmiş Perlit Agregası, Beton, Yangın, Fırın, Yüksek Sıcaklık

Sayfa Adedi : 107

Danışman : Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

THE EFFECTS OF FIRE AND HIGH TEMPERATURE ON EXPANDED PERLITE
AGGREGATE ADDITIVE CONCRETES IN DIFFERENT RESISTANCE CLASSES

(M. Sc. Thesis)

Mehmet ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January, 2019

ABSTRACT

In this study, 288 pieces of concrete samples having dimensions of 10x10x10 cm are used as 144 pieces of containing expanded perlite aggregate (EPA) by an amount of 20 percent of its concrete volume and 144 pieces of not containing EPA. Manufactured concrete samples, which are having compressive strength classes of C16/20, C20/25, C30/37 and C40/50 and four different water cement ratios, are exposed to 22 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C temperature values. Physical and mechanical properties of samples, which are exposed to temperature, are investigated as weight per unit volume, water absorption by volume, capillary water absorption, ultrasonic pulse velocity, abrasive strength and compressive strength. The aim of this study to investigate the effects of addition of expanded perlite aggregate, water cement ratio and the application way of the high temperature effect such as oven and fire on the physical and mechanical properties of concrete samples. When the high temperature is applied by oven and fire to EPA containing and EPA free samples their loss in abrasive strength, rate of water absorption by volume and coefficient of capillary water absorption values increase, while ultrasonic pulse velocity and weight per unit volume values decrease. In abrasive strength test, it is observed that as compressive strength increases loss in abrasive strength decreases. Loss in compressive strength is approximately 60% for oven samples and it is for 10% for fire samples at 500 °C. In compressive strength test, a relationship is not observed between addition of EPA and loss in compressive strength. In general, it is thought that applying high temperature to samples with oven is not enough.

Science Code : 91127

Key Words : Expanded Perlite Aggregate, Concrete, Fire, Oven, High Temperature

Page Number : 107

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gökhan DURMUŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve önüme büyük ufuklar açan çok kıymetli hocam Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ'a, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüm başkanı Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı teknisyenlerine, tezin deneylerini yaparken benden hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen Salih ÖZCAN abime, dostum Murat AKAN'a, deney aletlerinin temininde ve tadilatında bana büyük yardımları dokunan Yente Yapı Ltd. Şti.'ye ve dostum Abdurrahman YAVUZ'a, teşekkür ederim. Ayrıca ömrüm boyunca beni her zaman iyiliğe, doğruluğa, güzelliğe, bilime ve kendimi geliştirmeye yönelten benden hiçbir zaman sevgisini ve yardımlarını esirgemeyen annem Nebahat ÇELİK'e, babam Seyfettin ÇELİK'e ablalarım Evren KOÇ'a ve Nuşin YILDIRIM'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım esnasında kendisini zaman zaman ihmal etmek zorunda kaldığım, hayatın zorluklarına karşı beraber göğüs gerdiğimiz biricik hayat arkadaşım Hazal Duyar ÇELİK'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Çimento	3
2.2. Uçucu Kül.....	11
2.3. Betonda Kullanılan Akışkanlaştırıcı Katkılar.....	16
2.4. Isı Yalıtım Malzemeleri ve Perlit	18
2.5. Yüksek Sıcaklığın Çimento ve Agregaya Etkileri.....	28
2.5.1. Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi.....	30
2.5.2. Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi	31
2.6. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri.....	32
2.6.1. Yüksek sıcaklığın betonun porozitesine etkisi	33
2.6.2. Yüksek sıcaklığın betonun ağırlık değişimine etkisi.....	33
2.6.3. Yüksek sıcaklığın betonun birim hacim ağırlığına (BHA) etkisi.....	34
2.6.4. Yüksek sıcaklığın betonun hacimce su emmesine (HSE) etkisi	34
2.6.5. Yüksek sıcaklığın betonun kapiler su emme (KSE) katsayısına etkisi	35
2.6.6. Yüksek sıcaklığın betonun ultra geçiş hızına (UGH) etkisi	35
2.6.7. Yüksek sıcaklığın betonun ısı iletkenlik katsayısına (λ) etkisi	36

Sayfa

2.7. Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	36
2.7.1. Yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımına etkisi.....	37
2.7.2. Yüksek sıcaklığın betonun çekme dayanımına etkisi	40
2.7.3. Yüksek sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi.....	41
3. MALZEME VE YÖNTEMLER	43
3.1. Malzemeler	43
3.1.1. Çimento	43
3.1.2. Su.....	44
3.1.3. Perlit	44
3.1.4. Uçucu kül	45
3.1.5. Agrega	46
3.1.6. Süper akışkanlaştırıcı katkı	47
3.2. Yöntemler	48
3.2.1. Numunelerin üretimi	50
3.2.2. Numunelere yüksek sıcaklık etkisinin verilmesi.....	54
3.2.3. Birim hacim ağırlık (BHA) deneyinin yapılması	58
3.2.4. Hacimce su emme (HSE) deneyinin yapılması.....	58
3.2.5. Kapiler su emme (KSE) deneyinin yapılması	59
3.2.6. Aşınma dayanımı (AD) deneyinin yapılması.....	60
3.2.7. Ultra geçiş hızı (UGH) deneyinin yapılması.....	61
3.2.8. Basınç dayanımı (BD) deneyinin yapılması.....	62
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1. BHA Deneyi Bulguları	63
4.1.1. Fırın numunelerinin BHA deneyi bulguları	64
4.1.2. Yangın numunelerinin BHA deneyi bulguları	66
4.2. HSE Deneyi Bulguları.....	69

	Sayfa
4.2.1. Fırın numunelerinin HSE deneyi bulguları	69
4.2.2. Yangın numunelerinin HSE deneyi bulguları	72
4.3. KSE Deneyi Bulguları	75
4.3.1. Fırın numunelerinin KSE deneyi bulguları	75
4.3.2. Yangın numunelerinin KSE deneyi bulguları	77
4.4. AD Deneyi Bulguları	79
4.4.1. Fırın numunelerinin AD deneyi bulguları	80
4.4.2. Yangın numunelerinin AD deneyi bulguları	82
4.5. UGH Deneyi Bulguları	85
4.5.1. Fırın numunelerinin UGH deneyi bulguları	86
4.5.2. Yangın numunelerinin UGH deneyi bulguları	88
4.6. BD Deneyi Bulguları	91
4.6.1. Fırın numunelerinin BD deneyi bulguları	91
4.6.2. Yangın numunelerinin BD deneyi bulguları	94
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. P.Ç. klinkerindeki dört ana bileşik ve bulunma yüzdeleri	4
Çizelge 2.2. Türkiye’deki bazı termik santrallerden elde edilen UK’lerin kimyasal özellikleri	12
Çizelge 2.3. Mevcut ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayısı değerleri ve yangın tepki sınıfları	19
Çizelge 2.4. Ham perlitin fiziksel özellikleri	22
Çizelge 2.5. GP’nin fiziksel özellikleri	22
Çizelge 2.6. Tipik bir perlitin kimyasal analizi	23
Çizelge 2.7. Türkiye’deki perlit rezervlerinin bölgelere göre dağılımları	23
Çizelge 2.8. Perlitin dünya üzerindeki görünür rezerv miktarları	24
Çizelge 2.9. Normal ve yüksek performanslı betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki bağlı basınç dayanımlarının değişimi	37
Çizelge 3.1. Numunelerin üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	43
Çizelge 3.2. Numunelerin üretiminde kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri	44
Çizelge 3.3. Numunelerin dökülmesinde kullanılan suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri	44
Çizelge 3.4. Numunelerde kullanılan GP’nin fiziksel özellikleri	45
Çizelge 3.5. Numunelerde kullanılan GP’nin elek analizi	45
Çizelge 3.6. Numunelerde kullanılan GP’nin kimyasal bileşimi	45
Çizelge 3.7. Numunelerde kullanılan UK’ ün kimyasal analizi	45
Çizelge 3.8. Numunelerde kullanılan UK’ ün fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.9. Numunelerde kullanılan agregaların tane yoğunluğu ve su emme değerleri	46
Çizelge 3.10. Numunelerde kullanılan agregaların elek analizi	47
Çizelge 3.11. Süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesine ait teknik özellikler	48
Çizelge 3.12. Üretilen numune gruplarının açıklaması ve adedi	49
Çizelge 3.13. NF, NY, PF, PY numune grupları	50

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.14. GPA' sız numunelerin s/ç gruplarının 1 m ³ 'ünde bulunan malzeme miktarları	51
Çizelge 3.15. GPA' lı numunelerin s/ç gruplarının 1 m ³ 'ünde bulunan malzeme miktarları	52
Çizelge 3.16. Beton numunelerin istenilen sıcaklık değerlerine ulaşma süreleri	58
Çizelge 4.1. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı değerlerinin varyans çözümlemesi	63
Çizelge 4.2. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri	64
Çizelge 4.3. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri	64
Çizelge 4.4. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri	66
Çizelge 4.5. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri	66
Çizelge 4.6. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin varyans çözümlemesi	69
Çizelge 4.7. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri	70
Çizelge 4.8. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri	70
Çizelge 4.9. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri	72
Çizelge 4.10. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri	72
Çizelge 4.11. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri	75
Çizelge 4.12. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri	75
Çizelge 4.13. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri	77
Çizelge 4.14. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri	77

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kayıpları değerlerinin varyans çözümlemesi	80
Çizelge 4.16. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri.....	80
Çizelge 4.17. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri.....	81
Çizelge 4.18. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri.....	82
Çizelge 4.19. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri.....	83
Çizelge 4.20. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin varyans çözümlemesi	85
Çizelge 4.21. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri	86
Çizelge 4.22. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri.....	86
Çizelge 4.23. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri	88
Çizelge 4.24. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri	88
Çizelge 4.25. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin varyans çözümlemesi	91
Çizelge 4.26. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri	92
Çizelge 4.27. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri	92
Çizelge 4.28. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri.....	94
Çizelge 4.29. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri.....	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İyi hidrate olmuş çimentoya ilişkin bir model	4
Şekil 2.2. Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon sırasında gösterdikleri dayanım artışı.....	5
Şekil 2.3. Çimentonun hidratasyonu aşamalarındaki ısı çıkışı hızı.....	6
Şekil 2.4. Çimento hidratasyonunun sertleşme (priz) ve soğuma aşamasında C-S-H ve CH oluşumu ile yoğunlaşma aşamasında ürünlerin yoğun bir yapı oluşturması	7
Şekil 2.5. Tipik bir F sınıfı UK'ün SEM görüntüsü	13
Şekil 2.6. Dağıtıcı katkıların çimento topaklanmasını önlemesi.....	16
Şekil 2.7. Yangın aşamalarını gösteren sıcaklık-zaman grafiği	28
Şekil 2.8. Gerçek yangın ile yüksek sıcaklık etkisi arasındaki ilişki	29
Şekil 2.9. Betonun içindeki boşluk suyunun hareketi	30
Şekil 2.10. Portland çimentosunun yüksek sıcaklık etkisi altındaki ağırlık kaybı.....	33
Şekil 2.11. Yüksek sıcaklık etkisi altındaki çimento yerine belli oranlarda uçucu kül ikame edilmiş beton numunelerin bağıl basınç dayanımları.....	38
Şekil 2.12. Normal dayanımlı betonda sıcaklık ve çekme dayanımındaki değişim ilişkisi	40
Şekil 2.13. Normal dayanımlı betonun sıcaklık ile elastisite modülündeki değişim ilişkisi	41
Şekil 3.1. Karışımda kullanılan agregaların TS 802'de verilen alt ve üst sınırlara göre granülometrisi	47
Şekil 4.1. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%)	65
Şekil 4.2. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%)	67
Şekil 4.3. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin grafiksel gösterimi.....	71
Şekil 4.4. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin grafiksel gösterimi.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi.....	76
Şekil 4.6. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi.....	78
Şekil 4.7. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerlerinin grafiksel gösterimi.....	81
Şekil 4.8. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerlerinin grafiksel gösterimi.....	83
Şekil 4.9. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin grafiksel gösterimi.....	87
Şekil 4.10. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin grafiksel gösterimi.....	89
Şekil 4.11. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin grafiksel gösterimi.....	93
Şekil 4.12. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin grafiksel gösterimi.....	95

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Cam yünü, taş yünü, XPS ve EPS	20
Resim 2.2. Kayaç halindeki Perlit (A), ham perlit (B), Genleştirilmiş Perlit (C).....	22
Resim 3.1. Numune gruplarının dökülmeden önce slump deneylerinin yapılması	51
Resim 3.2. Beton karışımının mikserde karışmış hali	53
Resim 3.3. Mikserdeki betonun metal kalıplara yerleştirilmesi	53
Resim 3.4. Betonun kalıplara yerleştirilmiş hali.....	53
Resim 3.5. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi	54
Resim 3.6. 28 günde bazı numunelerin kür havuzundan çıkarılmaları.....	54
Resim 3.7. Betonun sıcaklığını ölçme denemesi	56
Resim 3.8. Yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklığın uygulandığı deney cihazı	57
Resim 3.10. Aşınma deneyinin yapılması.....	61
Resim 3.11. UGH deneyinin yapılması	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

μm

Mikron

$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Kalsiyum Hidroksit

Kısaltmalar

Açıklamalar

AD

Aşınma Dayanımı

AK

Akışkanlaştırıcı Katkı

ASTM

American Society for Testing and Materials

BD

Basınç Dayanımı

BHA

Birim Hacim Ağırlık

DPT

Devlet Planlama Teşkilatı

GP

Genleştirilmiş Perlit

GPA

Genleştirilmiş Perlit Agregası

HSE

Hacimce Su Emme

KSE

Kapiler Su Emme

PA

Pomza Agregası

PÇ

Portland Çimentosu

S/Ç

Su/Çimento Oranı

UGH

Ultrases Geçiş Hızı

UK

Uçucu Kül

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan oluşan ve dünyada yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir (Bilgiç, 2009). Betondaki agregalar, betonun dayanımı, elastisitesi, ısı ve ses yalıtımı gibi birçok fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu ya da olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca, agregalar yerine belli oranlarda hafif agregaların ikame edilmesi betonun daha hafif olmasını, ısı ve ses yalıtımının daha iyi olmasını sağlamakla birlikte yapının ölü yüklerini azaltmakta ve dolayısıyla yapının depreme karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Günümüzde gelişen sanayi ile beraber artan nüfusa paralel olarak daha sık yaşanan yangın olaylarına karşı, hafif agregaların beton endüstrisindeki kullanılabilirliği de AR-GE çalışmalarında yerini almaya başlamıştır.

Bakanlar Kurulu'nun 27/11/2007 tarih ve 12937 sayılı kararı ile 19.12.2007 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanan "Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik"'in 23. maddesinin 2. fıkrasında "Bina taşıyıcı sistem ve elemanlarının, gerek bir bütün olarak ve gerekse her bir elemanı ile, bir yangında insanların tahliyesi veya söndürme süresinde korunmaları için yeterli bir zaman boyunca stabil kalmalarını sağlayacak şekilde hesaplanarak boyutlandırılması mecburidir." ifadesi yer almaktadır. Buna göre bir yapıyı oluşturan elemanların, yangından kaynaklanan yüksek sıcaklık etkisiyle deforme olup yapının stabilitesini bozarak can kaybına neden olmaması için yangına belirli bir süre dayanmaları gerektiği ifade edilmiştir. Yine aynı yönetmeliğin 23. maddesinin 5. fıkrasında betonarme yapıların yangına karşı 120 dakika dayanıklı kalabilmesi için kolonlarda en az 3.5 cm, döşemelerde en az 2 cm, kirişlerde ise en az 2.5 cm pas payının bulunması gerektiği belirtilmiştir. Diğer bir deyişle, betonarme elemanlarda yangın esnasında 1200 °C'lere çıkan yüksek sıcaklığın betonarme donatısının akmasına ve yapı elemanının deforme olmasına neden olmaması için pas payının kalınlığının önemi vurgulanmıştır.

Betonarme donatısını kaplayan betonun, yani paspayının, yangına karşı daha uzun süre dayanıklı kalabilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılacaktır. Bu araştırmalar daha çok yüksek sıcaklığa karşı ısı ve ses yalıtımı yüksek hafif agregaların betonlarda kullanılabilirliği üzerinedir. Bu hafif agregalardan birisi olan perlit, genleştirildiğinde hacmi 20 katına çıkan, hafifliği, yüksek ısı ve ses yalıtım özelliği ile ön plana çıkan bir yapı malzemesidir. Dünya üzerindeki olası perlit rezervlerinin yarısından çoğunun ülkemizde

bulunduğu bilinmektedir. Dolayısıyla  lkemizde bulunan perlit rezervlerinin değerlendirilmesi, ülke ekonomisine büyük katkılar sağlayacaktır.

Genleştirilmiş perlit (GP) gibi hafif agregaların betonda kullanılması, yapıların sadece yangına karşı değil, depreme karşı dayanıklılığını da arttıracaktır. Aktif fay hattı üzerinde bulunan ülkemizde çok büyük can ve mal kaybına neden olan depremler yaşanmıştır.  lkemiz gibi aktif fay hattı üzerinde bulunan gelişmiş ülkelerde şiddetli depremler sonucu oluşan can ve mal kayıplarının ülkemizden çok daha az olmasının sebebi, bu ülkelerde depreme karşı yeni inşaat teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasıdır. şiddetli depremlerden çok küçük can ve mal kaybıyla çıkmayı başarabilmiş olan ülkelerde, pomza, perlit, gazbeton vb. hafif malzemeler binalarda yaygın olarak kullanılmakta, yapıların  l  yüklerini azaltmasıyla, kendi yükü altında ezilmesini önleyerek depremin yıkıcı etkilerini asgariye indirmeyi sağlamaktadır. Pomza, perlit, gazbeton gibi hafif yapı malzemelerinin binalarda kullanılması depreme karşı dayanıklılığın yanında ısı ve ses yalıtımını da %50 oranlarında arttırmaktadır. Hafif yapı malzemelerinin kullanılması, büyük oranlarda enerji tasarrufu sağlayarak, cari açığın büyük bir kısmının enerji üretiminden kaynaklandığı ülkemize ekonomik olarak katkı sağlayacaktır (Doğan ve şener, 2004).

GPA'lı ve GPA'sız betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklık etkisine karşı gösterdikleri değişimi inceleyen çalışmalarda beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi fırınlar yardımıyla verilmektedir. Bu çalışmadaki amaç, yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış GPA'lı ve GPA'sız beton numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi deneysel olarak incelemek ve sonuçları birbirleriyle karşılaştırmaktır.

Tezin ikinci bölümünde deneylerde kullanılan malzemeler ile, yüksek sıcaklık ve yüksek sıcaklığın betondaki malzemelere olan etkileriyle ilgili olarak teorik bilgiler verilmiş, her konuyla alakalı olarak yapılmış olan çalışmalar anlatılmıştır.    nc  bölümünde deneylerde kullanılan malzemelerin nereden ve nasıl temin edildiği, fiziksel ve kimyasal özellikleri, deneylerin ilgili standartlara göre nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Dördüncü bölümünde deneysel bulgular, ilgili grafik ve tablolarla birlikte aktarılarak ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Beşinci bölümünde yapılan tüm çalışmalarla ilgili sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çimento, perlit, uçucu kül, betonda kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasallar ile ilgili genel bilgiler ve yüksek sıcaklığın betona ve betonda kullanılan malzemelere olan etkileri araştırılmıştır.

2.1. Çimento

TS EN 197-1 standardında, su ile temasında geçirdiği hidratasyon reaksiyonları sonucu sertleşen ve sertleşmiş halinin suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcı olarak tanımlanmaktadır. Hidrolik bağlayıcı, su ile temasıyla meydana gelen hidratasyon sonucu sertleşen, su içinde çözünmeyerek sertliğini koruyan, dayanıklılığını koruyan veya arttıran maddelere çimento denilmektedir (Türk Standartları Enstitüsü [TSE], 2012: 1-29).

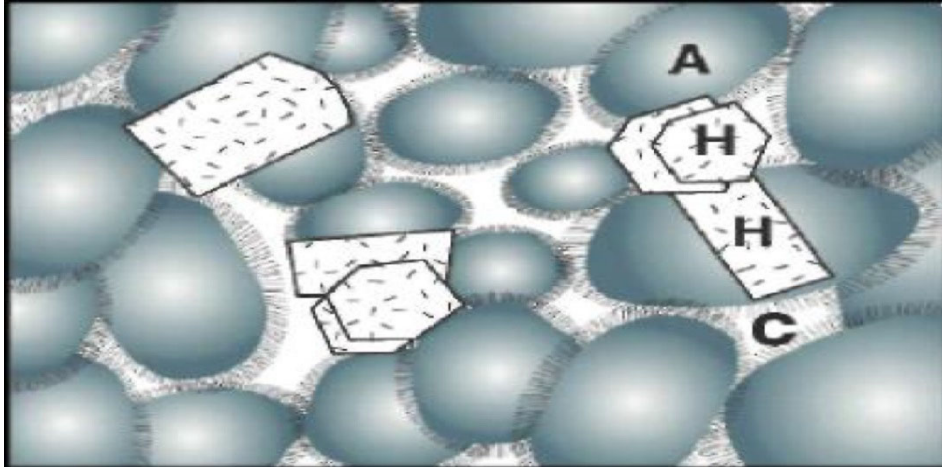
Çimento, Latince yontulmuş anlamına gelen “caementum” kelimesinden türemiştir. İnsanoğlu ateşi keşfettikten sonra alçı ve kireç gibi malzemeleri bağlayıcı olarak kullanmaya başlamışlardır. Kireç ve puzolan karışımlarının suyla temas ettiğinde sertleşip dayanımını koruması özelliği eski Yunanlılar ve Romalılar zamanında keşfedilmiştir. Bağlayıcıların geliştirilmesi ile ilgili yenilikler 18. yüzyılda meydana gelmiş, yani bağlayıcılar bilimsel olarak 18. Yüzyılda incelenmeye ve geliştirilmeye başlanmış ve yüksek dayanımlı çimentoya 21.10.1824 tarihinde “Portland Çimentosu” adıyla patent alınmıştır (Şafak, 2014).

Çimento üretimi sırasında kalsiyum silikatlar döner fırında silisin kireçle birleşmesi sonucu oluşurken kalsiyum alüminatlar ise döner fırında alüminin yine kireçle birleşmesi sonucu PÇ (Portland Çimentosu)’da dört ana oluşur. Bu bileşiklerin simgeleri, isimleri ve klinkerde bulunma yüzdeleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Dündar, 2016).

Çizelge 2.1. P.Ç. klinkerindeki dört ana bileşik ve bulunma yüzdeleri

Bileşiğin Kimyasal Gösterimi	Bileşiğin Adı	% Miktarı	% Ortalaması
C_3S ($3CaO.SiO_2$) (Alit)	Trikalsiyum silikat	%50-75	55
C_2S ($2CaOSiO_2$) (Belit)	Dikalsiyum silikat	%7-30	23
C_3A ($3CaO.Al_2O_3$)	Trikalsiyum alüminat	%0-16	10
C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)	Tetrakalsiyum alüminoferrit	%4-20	12

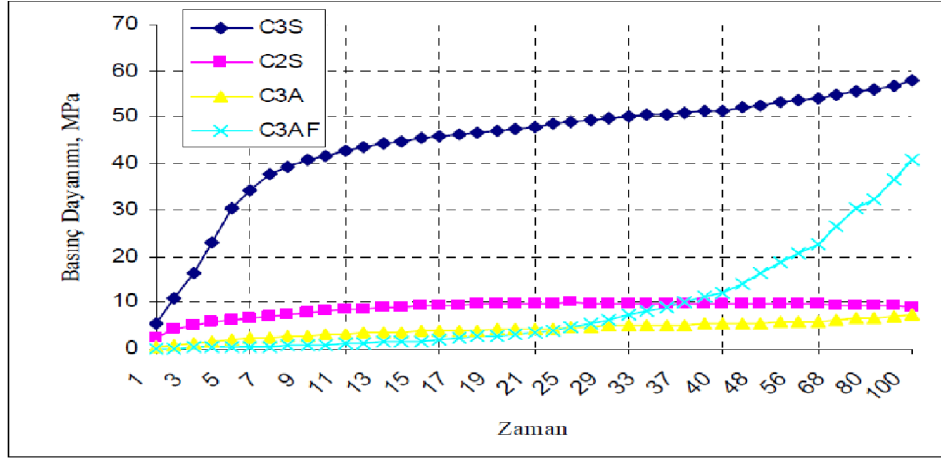
Hidratasyon, bir maddenin su ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. Anhidro kristallerin su ile birleşmesi sonucu hidrate kristallere dönüşümü olarak da tanımlanabilir. Çimentonun hidratasyonu sonucunda suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı niteliğinde ve katı bir madde oluşma süreci priz (katılaşma) ve sertleşme olmak üzere iki aşamada oluşur. Çimento önce prizini alır, daha sonra sertleşir. Çimentonun asıl dayanımı sertleşme aşamasında oluşur. Klinkerdeki kireç oranının fazla olması ve çimentonun ince olması, çimentonun daha çabuk priz almasını sağlar (Ertün ve Türker, 2004: 39-43). Şekil 2.1’de iyi hidrate olmuş bir PÇ’na ilişkin bir model bulunmaktadır (Durmuş, 2008).



Şekil 2.1. İyi hidrate olmuş çimentoya ilişkin bir model

Çimentonun dayanımına etki eden bileşikler C_2S ve C_3S 'dir. C_3S ilk dayanıma, C_2S ise son dayanıma etki eder. Hidratasyon sırasında C_3S 'in açığa çıkardığı ısı C_2S 'den daha fazladır. C_3S 'in yüksek olması yüksek ilk dayanıma, C_2S 'in az olması ise yüksek ısı yayılmasına neden olur (Taylor, 1997: 113-225). Bir başka deyişle, çimentonun ilk dayanımı ve hidratasyonu sırasında açığa çıkan ısı miktarı gibi özellikleri kullanılan çimentonun tipine

ve kullanılan katkıların oranına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.2.'de çimentonun hidratasyonu sırasında ana bileşenlerin gösterdiği dayanım artışına ilişkin bir grafik bulunmaktadır (Durmuş, 2008).

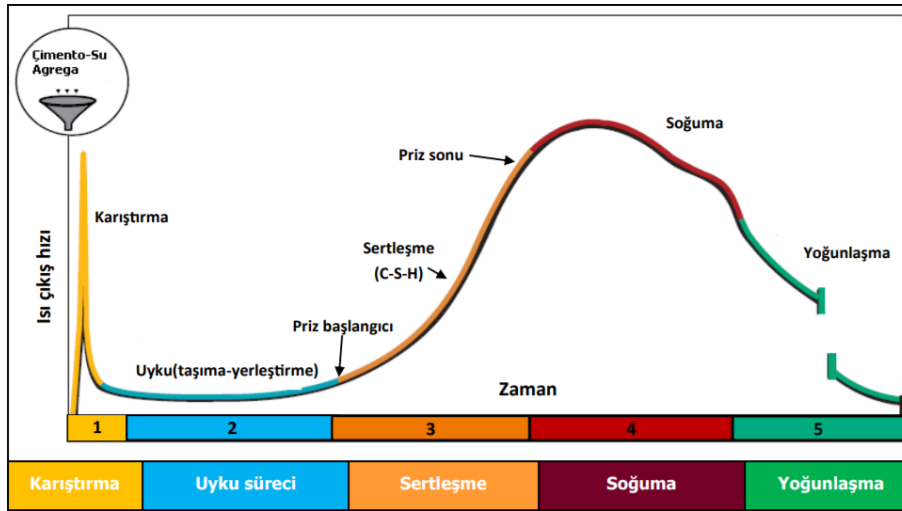


Şekil 2.2. Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon sırasında gösterdikleri dayanım artışı

C₃S'in hidratasyonu sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) miktarı, C₂S'e göre üç kat daha fazladır. C₃S ve C₂S'in hidratasyonu sonucunda Ca(OH)₂'in açığa çıkmasının iki tane dezavantajı vardır. Bunlardan birisi Ca(OH)₂'in suda eriyebilen bir bileşik olması ve erimesi sonucu betonun gittikçe boşluklu bir hal almasıdır. Bu durum betonun mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır. Diğer dezavantajı ise Ca(OH)₂'in mukavemetinin düşük olmasıdır. C₃A hidratasyonu en hızlı olan bileşiktir ve hidratasyonu sonucu açığa çıkardığı ısı miktarı çok yüksektir. Kısa zamanda prizini alır ve sertleşir. Bunların yanında kimyasal etkilerin bulunduğu sulara karşı dayanıklı değildir. Sülfatlı su ve zeminlerde kullanılması sakıncalıdır. Bu nedenle sülfata karşı dayanıklı olarak üretilen çimentolarda C₃A oranı en fazla %5 ile sınırlı tutulmuştur. C₄AF ilk dayanıma etki eder, hidratasyonu sonucu yüksek ısı meydana getirir ve C₃A'ya yakın bir hızda hidratasyon yapar (Dündar, 2016).

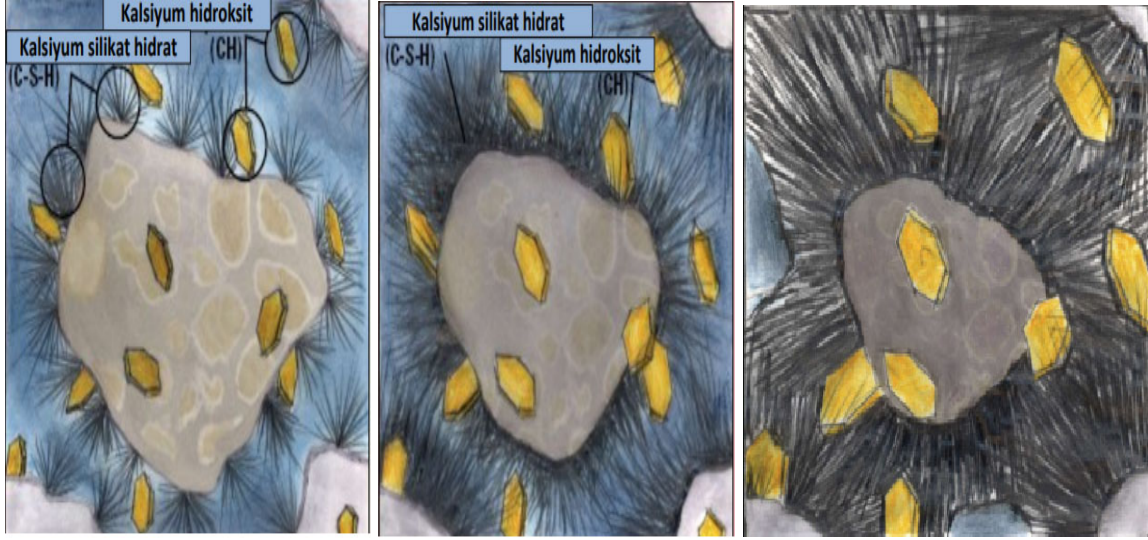
Çimentonun hidratasyonu karıştırma, uyku süreci, sertleşme, soğuma ve yoğunlaşma olmak üzere 5 aşamadan meydana gelir. Karıştırma süreci 10-15 dk civarında sürer, ısı çıkışı aniden gerçekleşir ve geri düşer. Karıştırma sürecinde karışım tasarımı önemlidir. Uyku süreci 2-4 saat arasında sürer. Uyku sürecinde karışım plastik kıvamdadır, kolayca taşınabilir, yerleştirilebilir. Uyku sürecinde ısı çıkışı çok düşük seviyededir. Sertleşme sürecinde yüksek ısı çıkışı meydana gelir, priz ve sertleşme başlar, çimento dayanım kazanmaya başlar.

Sertleşme sürecinde gecikmeden küre konulmaya başlanmalıdır. Soğuma sürecinde önemli olan büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilmelerin dayanımı geçmemesi gerektiğidir. Bu betonda çatlamalara neden olmaktadır. Yoğunlaşma süreci yıllarca devam etmektedir. Beton yıllar içerisinde dayanım kazanmaya devam eder. Betonun erken yaşlarında yalıtılarak ani sıcaklık değişimlerinden korunmalıdır. Şekil 2.3.'te çimentonun hidratasyon aşamalarındaki ısı çıkış hızının zamana göre değişimini gösteren grafik verilmektedir (Kosmatka, Voigt ve Taylor, 2007).



Şekil 2.3. Çimentonun hidratasyonu aşamalarındaki ısı çıkışı hızı

Çimento hidratasyonu sonucunda hidrate olan 4 önemli madde vardır: Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), Kalsiyum hidroksit (CH), Etrenjit (C-A-S-H) (AFm), Monosülfat(C-A-S-H) (AFt). Bu ürünler betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirleyen ana unsurlardır. Bunlardan C-S-H jeli çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran ve dayanım kazanmasını sağlayan üründür. C-S-H jeli çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan ürünlerin yaklaşık %60'ını oluşturur. Hidratasyon ürünlerinden olan kalsiyum hidroksit (CH) ise hidratasyon ürünlerinin yaklaşık %20'sini oluşturur. CH, C-S-H'a göre oldukça büyük olan CH genellikle boşluklarda ve çimento-agrega ara yüzeylerinde bulunur. CH'in dayanıma etkisi yoktur ancak beton içindeki bazik yapıyı sağlamaktadır. Şekil 2.4'te ise hidratasyonun sertleşme, soğuma ve yoğunlaşma evrelerinde hidratasyon ürünlerinin oluşumu gösterilmektedir. (Kosmatka ve Diğerleri, 2007).



Şekil 2.4. Çimento hidratasyonunun sertleşme (priz) ve soğuma aşamasında C-S-H ve CH oluşumu ile yoğunlaşma aşamasında ürünlerin yoğun bir yapı oluşturmaları

Genel çimentolar TS EN 197-1’de “CEM Çimentosu” olarak isimlendirilmektedir. Cem çimentosu, içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının kütleye en az %50 olması gereken, hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu oluşan çimentolardır. CEM çimentolarının bileşimi PÇ klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılarıdır. TS EN 197-1’de 5 ana tip CEM çimentosu ve 27 alt çeşit CEM çimentosu bulunmaktadır. 5 ana tip CEM çimentosu dışında, klinker üretimi sırasında veya sonraki üretim aşamalarında eklenen mineral katkıları sayesinde özel kullanım amacına yönelik üretilmiş, 5 çeşit daha çimento bulunmaktadır (Özdenkoş, 2010).

Çimento ve yüksek sıcaklıkla ilgili yapılmış çalışmalar

Lubly, Kopecsko, Balazs, Restas ve Szilagyi (2017), çalışmalarında çeşitli çimento türlerinin yüksek sıcaklık altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Pozolanik malzeme katkılı Portland Çimentosu ile üretilen beton numuneleri ile katkısız Portland çimentosu ile üretilen beton numunelerin yüksek sıcaklığa karşı olan dayanımları karşılaştırılmıştır. Pozolanik katkı çimentoya klinker halindeyken eklenmiştir. Sonuç olarak Portland Çimentosundaki pozolanik katkı maddeleri miktarı arttıkça beton numunelerin yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri direncin arttığı gözlemlenmiştir.

Durmuş (2008), PÇ ve Portland kompoze çimentosu ile ürettiği harçlara yüksek sıcaklık uygulamış ve numunelerin bir kısmını havada ve diğer kısmını ise su ile soğutarak harçların

mekanik özelliklerindeki değişimleri yapay sinir ağı ile modellemiştir. Sonuç olarak 300 °C'ye kadar numunelerin BD'nda artış meydana geldiği, bu sıcaklıktan sonra BD'nda sürekli olarak düşüş olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış harç numunelerinin havada ve suda soğutulmasında istatistiki farklar olduğu, yapay sinir ağıyla yapılan modellemede basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin %8'lik bir hata payıyla tahmin edilebileceği sonuçlarına varmıştır.

Heo, Lee ve Lee (2016) çalışmalarında çimento numunelerini 100-200-300-400-500-600-700-800-900-1000 °C sıcaklıklarına maruz bırakmış, elektron mikroskobu, XRD ve hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi ile yüksek sıcaklığın çimento pastası üzerinde etkileri araştırmışlardır. Sonuç olarak, Ca(OH)_2 'nin 500 °C ve 600 °C'lerde bozunarak CaO ve H_2O 'ya ayrıştığı, CaCO_3 'ün ise 700 °C'de CaO ve CO_2 'ye ayrıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca hızlandırılmış karbonatlaşma deneyinde 600 °C'de beton yüzeyinin dağılmaya başladığı, 1000 °C'de ise tamamen deforme olduğu ve genel anlamda yüksek sıcaklık derecesi arttıkça çimento pastasındaki kimyasal ayrışmanın ve boşlukların arttığı gözlemlenmiştir.

Dündar (2016), çalışmasında PÇ üretimini dünyadaki CO_2 salınımının sebeplerinden biri olarak göstermiş, puzolan maddelerin kullanılarak PÇ üretiminin önemli ölçülerde düşürülebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, puzolanlı çimentoların erken dayanımlarını geç almaları problemini nanomalzeme katkısı kullanarak çözmeyi hedeflemiştir. PÇ ile birlikte farklı oranlarda, puzolan olarak pomzayı, nanomalzeme olarak ise nanosilikayı kullanarak erken yaş dayanımı yüksek puzolanlı çimentoyu bulmayı hedeflemiş, çimentonun %3'ü oranında nanosilica kullandığında puzolanlı çimentolarda erken yaş dayanımının önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir.

Shan, Zhang, Wei, Liu, Wu, Dong ve Han (2013), çalışmalarında 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 900 °C'deki yüksek sıcaklıkların etkisi altında kalmış çimentonun ağırlığı ve basınç dayanımındaki değişimleri incelemişlerdir. Çimentoların yüksek sıcaklık etkisi altındaki ağırlık ve basınç dayanımı düşüşleri XRD yöntemiyle ölçülmüştür. Sonuç olarak, çimentonun oda sıcaklığındaki iç yapısının ana bileşenlerinin CA(OH)_2 , C-S-H, CA_2SiO_3 ve CACO_3 olduğu, 400 °C'den sonra çimentonun iç yapısının hidrasyon ürünleri olan Ca(OH)_2 , C-S-H ve CaCO_3 'ün ayrışmasından dolayı bozulmaya başladığı gözlemlenmiştir.

Özbey (2009), yüksek sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri, farklı çimento türlerinde ve farklı soğutma koşulları altında incelemiştir. Çalışmada Cem I 42.5 R ve Cem III/A 32.5 N çimentolarıyla üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin bir kısmı havada ve bir kısmı ise suda olmak üzere iki çeşit soğutma şekliyle oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Sonuç olarak numunelerin 600 °C'den yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımlarında önemli azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. 28 günlük Cem I numunelerinin 600 °C'deki BD kayıpları %25-30 iken, 56 günlüklerde ise kayıplar %30-35'lere ulaşmaktadır. 28 günlük Cem III numunelerinin 600 °C'deki BD kayıpları % 55 iken, 56 günlüklerde ise kayıplar % 25-30 civarlarında olmuştur. Ayrıca suda soğutulan numunelerin mekanik özelliklerindeki azalmanın, havada soğutulan numunelerin mekanik özelliklerindeki azalmadan daha büyük olduğu da gözlemlenmiştir.

Lubly, Kopecsko, Balazs, Szilagyi ve Madarasz (2016) çalışmalarında Portland çimentosu yerine belli oranlarda yüksek fırın cürufu ikame ederek ürettikleri beton numunelerin yüksek sıcaklık altındaki dayanımlarını ve beton numunelerde oluşan yüzey çatlaklarını incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek sıcaklık etkisi altındaki numunelerde yüksek fırın cürufunun ikame oranı arttıkça yüzey çatlaklarının sayısı ve ölçüsünde artış gözlemlenmiş, basınç dayanımlarında ise düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi altında yüzey çatlaklarının sayısı ve yoğunluğu arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir.

Karaduman (2008), farklı tip çimentoların yüksek sıcaklık altında eğilme ve basınç dayanımları, elastisite modülleri ve ağırlıklarındaki değişiklikleri deneysel olarak incelemiştir. Numuneler iki çeşit küre tabi tutulmuştur. Bir kısım numune 24 saat 60 °C'deki suda bekletildikten sonra 28 gün havada küre tabi tutulmuştur. Diğer numune gruplarına ise 28 gün suda bekletilerek standart kür uygulanmıştır. İki çeşit kür uygulanan numunelerin hepsinde yüksek sıcaklıktan en fazla olumsuz etkilenen numune grupları AL-CEM çimentosuyla hazırlanan numuneler olmuştur. 600°C'ye kadar, sıcak su kürü uygulanmış numunelerde mekanik özelliklerindeki en büyük düşüş CEM V-A çimentosuyla hazırlanan numunelerde görülmüş, basınç ve eğilme dayanımları en az etkilenen numuneler ise CEM IV/A çimentosuyla hazırlanan numuneler olduğu görülmüştür. Sıcak suyla kür edilen numunelerde elastisite modülündeki en küçük düşüş CEM V-A çimentosuyla hazırlanan numunelerde görülmüştür. 600°C'ye kadar, standart kür uygulanmış numunelerde eğilme ve

basınç dayanımlarındaki en küçük düşüş CEM IV/A çimentosuyla hazırlanan numunelerde, elastisite modülündeki en küçük azalma ise CEM V-A çimentosuyla hazırlanan numune gruplarında görülmüştür. 600°C'ye kadarki yüksek sıcaklıklarda standart küre tabi tutulan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarındaki düşüşler daha fazla olmuştur. 900 °C' den daha yüksek sıcaklıklarda kür tipinin ve çimento türünün bir önemi kalmamıştır.

Zhao ve Sanjayan (2011), çalışmalarında geopolimer beton ve PÇ ile 40 Mpa'dan 100 Mpa'a kadar basınç dayanımlarındaki beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki parçalanma durumlarını, aniden yüksek sıcaklıkların olduğu yangın simülasyonlarında karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda ani yüksek sıcaklık etkisi altındaki PÇ ile üretilen beton numunelerin parçalandıkları, geopolimer betonların ise parçalanmadıkları gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi altında aynı basınç dayanımına sahip geopolimer betonların parçalanmaya karşı olan dayanımlarının PÇ ile üretilen betonlardan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Gölce (2009) çalışmasında dört farklı tipteki PÇ ile, farklı kür sürelerinde beton numuneler üreterek, bu numuneleri farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakmış, hava ve su olarak iki farklı ortamda soğutmuştur. Böylece yüksek sıcaklıkların farklı beton numuneler üzerindeki birim ağırlık, UGH, eğilme dayanımı ve BD gibi özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Harç numunelerinin yüksek sıcaklıklarda önemli dayanım kayıplarına uğradığı görülmüştür. Özellikle kayıpların 450 °C ile 900 °C arasında daha fazla olduğu incelenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada kendi kendine soğumaya bırakılan numunelerin mekanik ve fiziksel dayanımlarındaki düşüşlerin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yangın söndürme işlemlerinin yapıların dayanımına zarar verdiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Huang, Liev ve Li (2017), çalışmalarında yoğunluğu 1400 kg/m³'den az olan ve basınç dayanımı 60 Mpa'a kadar çıkabilen ultra hafif agregalı çimento kompozitlerinin 1000 °C'ye kadarki olan yüksek sıcaklıklardaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak hacimce yüksek derecede ultra hafif agrega ve hacimce %0,2 ile %0,5 civarında Polivinil Alkol (PVA) fiber katkısı ile üretilen beton numunelerin ısıl dayanıklılığı aynı basınç dayanımına sahip, normal hafif agregayla üretilmiş beton numunelerinkinden ve normal beton numunelerinkinden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

2.2. Uçucu Kül

Türkiye’deki elektrik ihtiyacı birçok kaynaktan temin edilebildiği gibi, kömürle çalışan termik santrallerden, hidroelektrik santrallerden ve son yıllarda yaygınlaşan doğalgaz santrallerinden de üretilen elektrik ile karşılanmaktadır. Termik santrallerde, düşük kalorili kömürlerin yanması ve baca gazlarıyla sürüklenmesi sonucunda oluşan mikron boyutundaki küller elektro filtrelerle tutulmakta ve bu küllerin atmosfere yayılması engellenmektedir. Atık madde olan bu küllere uçucu kül (UK) denilmektedir. Termik santrallerin atığı olan ve çevreye büyük zararları bulunan uçucu külün (UK) başka sektörlerde değerlendirilebilmesi çok önemlidir. UK’lerin neden olduğu tozlanmanın neden olduğu ciddi çevre sorunlarından UK’ün çeşitli sektörlerde kullanılarak değerlendirilmesi ile kurtulmak mümkün görülmektedir. UK, başlıca inşaat sektöründe olmak üzere, kimya, seramik, tarım, maden gibi çeşitli alanlarda kullanılabilmektedir (Aruntaş, 2006).

ASTM C595-86’ya göre öğütülmüş halde, normal sıcakta, rutubetli ortamlarda Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler meydana getiren ancak tek başına bir bağlayıcılığı bulunmayan malzemelere puzolan denilmektedir. UK’ün özellikleri itibariyle yapay puzolanik bir madde olmasından dolayı en fazla inşaat sektöründe kullanım alanları bulunmaktadır. Dünyada yılda ortalama 450 milyon ton UK üretilmekte ve bunun sadece %6’sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye’de kömür kullanan 11 tane enerji santrali bulunmaktadır ve yaklaşık 15 milyon ton UK üretilmektedir. UK’ün çimento üretiminde kullanılmasıyla çimento sanayisinin çevreye verdiği zararlar azaltılabilmektedir (Yıldırım, 2007).

UK’ler kimyasal yapılarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. ASTM C 618’de UK’ler yapılarındaki Ca(OH)_2 ’e göre 2’ye ayrılmıştır. Bunlar yapısındaki Ca(OH)_2 miktarı %10’dan az olan düşük kireçli UK ve yapısındaki Ca(OH)_2 miktarı %10’dan fazla olan yüksek kireçli UK’dür. Ayrıca yine ASTM C 618’de UK’ler kimyasal yapılarına göre bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70’in üzerinde olan F sınıfı UK ve genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50’in üzerinde olan C sınıfı UK’ler olmak üzere iki sınıfa ayrılmışlardır (Mindess, Young ve Darwin, 2002: 88).

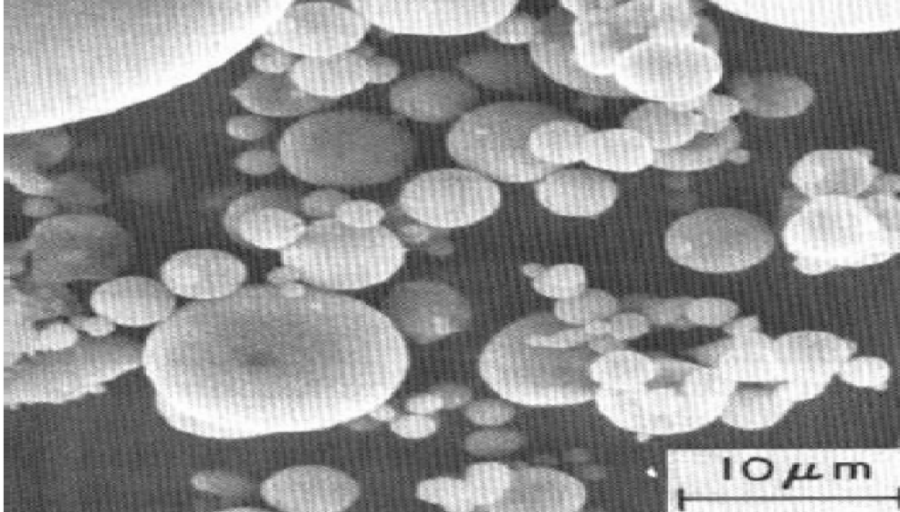
TS EN 197-1'e göre UK'ler silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Silissi UK'de reaktif kireç oranı %10'dan az, reaktif silis miktarı ise %25'den fazla olması gerekmektedir. Kalkersi UK'lerde ise reaktif kireç oranı %10'dan fazla, reaktif silis oranı da %25'den fazla olması gerekmektedir.

UK'lerin fiziksel özellikleri genellikle termik santralde yakılan kömürün cinsine ve yakma sistemlerine göre değişmektedir. UK genellikle gri renkte, %60-90 camsı bileşen içeren ince taneciklerden oluşmaktadır. Tane şekli yuvarlaktır. UK'ün puzolanik özellikleri ise kimyasal yapılarından çok mineralojik yapılarıyla alakalıdır. Düşük kireçli UK'ler rutubetli ortamlarda CaOH_2 ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özellik taşırlar. UK'ler genel olarak küresel Şekli kül tanecikleri olup, çapları 50-150 mikron boyutundadır. Türkiye'deki bazı termik santrallerden çıkan UK'lerin bazı kimyasal özellikleri ise Çizelge 2.2'de verilmektedir (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğınobalı, 2009: 5-89).

Çizelge 2.2. Türkiye'deki bazı termik santrallerden elde edilen UK'lerin kimyasal özellikleri

Bileşim %	Afşin- Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
						F	C
SiO_2	27,40	56,80	58,59	49,13	-	-	-
Al_2O_3	12,80	24,10	21,89	15,04	-	-	-
Fe_2O_3	5,50	6,80	9,31	8,25	-	-	-
S+A+F	45,70	87,70	89,79	72,42	>70	>70	>50
CaO	47,00	1,40	4,43	13,20	-	-	-
MgO	2,50	2,40	1,41	4,76	<5	<5	<5
Na_2O	(N+K) 0.3	(N+K) 3.0	0,24	2,20	-	<1.5	<1.5
K_2O	-	-	1,81	1,76	-	-	-
SO_3	6,20	2,90	0,41	3,84	<5	<5	<5
K.K	2,40	0,60	1,39	0,72	<10	<12	<6

Tipik bir F sınıfı UK'ün SEM görüntüsü Şekil 2.5'de gösterilmiştir ve görüldüğü üzere UK tanecikleri yuvarlak bir yapıya sahiptirler (Yıldırım, 2007).



Şekil 2.5. Tipik bir F sınıfı UK'ün SEM görüntüsü (Yıldırım, 2007)

Uçucu kül ile ilgili yapılmış çalışmalar

Son yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda UK'ün beton üretiminde çimento yerine ikame olarak kullanılmasının betonda terleme olasılığını düşürerek kuruma rötresini azalttığı, işlenebilirlik periyodunu uzattığı, kür süresince sıcaklık artışını düşürerek termal gerilmeleri azalttığı, sünmede azalma oluşturduğu, uzun dönemde daha büyük elastisite modülü sağladığı deneysel çalışmaların sonucunda kanıtlanmıştır (Balendran ve Baudes, 2000).

Çimentoda tamamlayıcı puzolanik bir madde olarak kullanılan UK ile üretilen yüksek dayanımlı betonlarda oluşan sıkı mikro yapı sayesinde yüksek performanslı ve agresif kimyasal ortamlara dayanıklı betonlar üretilmektedir. Fakat sıkı mikro yapı yangın esnasında yüksek sıcaklık etkisiyle betonda patlamaya neden olabildiği deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir (Chan ve Diğerleri, 2000).

UK, yüksek sıcaklıklarda sinterlenerek üretilmiş yapay iri hafif agrega şeklinde taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabilir. Ayrıca beton üretiminde çimento yerine belli oranlarda ikame edilerek daha yüksek basınç ve ADna sahip betonların üretilbildiği ve böylece beton üretim maliyetlerini düşürerek daha dayanıklı beton üretiminin gerçekleşebildiği bilinmektedir. Fakat UK'ün beton üretiminde çimento yerine ikame olarak kullanıldığı zaman ikame oranı arttıkça bir günlük BD değerlerinin ciddi oranda düştüğü, 28 günlük BD'nda ise %50-%60 gibi ikame oranlarında bile sadece çimento ile üretilmiş betonun BD'na yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. UK, kütle beton üretiminde

hidratasyon ısısını düşürücü etkisinin olduğu bilinmektedir. A.B.D.'de yapımı 1953 yılında biten Hungry Horse barajında 120.000 ton UK kullanılmıştır (Yıldırım, 2007).

Mahsanlar (2006), yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan ve farklı söndürme türleriyle söndürülen farklı tür betonların, renk ve basınç dayanımlarındaki değişimleri deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada CEM I 42.5 R çimentosu, silisli agregalar ile çimento yerine %10 oranında katılan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonlar, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 600 °C, 900 °C ve 1200 °C' lik yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, havada ve suda oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış, havada ve suda soğutulmuş farklı tür betonların basınç dayanımlarındaki değişim ile renk değişimleri arasında ilişki kurulmuştur. Sonuç olarak, yangında hasar görmüş yapı elemanının renk değişiminden yola çıkarak BD'ndaki değişim ile yangının kaç dereceye çıktığı gibi bilgilere ulaşmak hedeflenmiştir.

Wang, Lu, Y. Li, Yuan ve Q. Li (2017), çalışmalarında hızlandırılmış karbonatlaşırma döngüsü yardımıyla karbonatlaşırma derinliklerini sürekli ölçerek, yüksek sıcaklığın, gerilmenin ve uçucu kül içeriğinin betonun karbonatlaşırma karşı olan direncini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sonuç olarak uçucu kül içeriği, gerilme derecesi ve yüksek sıcaklık arttıkça betonun karbonatlaşırma karşı olan direncinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Wang, Lu, Y. Li ve Q. Li (2017), yaptıkları çalışmada normal beton ve çimento yerine %30 oranında uçucu kül ilcame edilmiş beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında ısı iletkenliklerindeki ve basınç dayanımlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra numunelerin basınç dayanımlarında ve ısı iletkenliklerinde önemli düşüşler meydana geldiği, 550 °C'den sonra hacimce yüksek oranda uçucu kül içeren ve normal beton numunelerin basınç dayanımlarında %26 civarlarında düşmüştür. Ayrıca aynı koşullar altında hacimce yüksek oranda uçucu kül içeren beton numunelerin termal iletkenlikleri normal betonunkinden daha düşük çıktığı da gözlemlenmiştir.

Güler (2010), çalışmasında PÇ, borlu çimento ve mineral katkı olarak da uçucu kül ile yüksek fırın cürufu kullanarak 28, 56, 90 günlük farklı kür sürelerinde ürettiği betonları yüksek sıcaklığa maruz bırakmış, bu numunelerin BHA, UGH, eğilme dayanımı ve BD gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Sonuç olarak numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik dayanımlarını, özellikle 600 °C'den sonra, önemli

ölçüde yitirdiklerini gözlemlemiştir. 600 °C’de yüksek fırın cürufu numune grupları basınç dayanımlarının % 20 civarını kaybederken, yüksek fırın cürufu dışındaki numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıp % 30 civarlarında olmuştur

Papayianni ve Valliasis (2005), hacimce yüksek oranlarda UK içeren betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki deformasyonlarını incelemişlerdir. 150x300 mm boyutlarındaki silindirik beton numuneleri tamamen PÇ ile, çimento yerine %30 ve %40 oranlarında UK ikame edilmiş şekillerde üreterek numuneleri yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak, betondaki çimento yerine ikame edilen uçucu kül oranı arttıkça betonda yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir.

Kurt (2012), barit tozu, diatomit, silis dumanı, uçucu kül, gibi mineral katkıları kullanarak farklı çimento dozlarında ürettiği beton numuneleri yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmış, bu numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimleri mineral çeşidine göre karşılaştırmalı olarak irdelemiştir. Diatomit ikameli betonlarda düşük özgül ağırlığı ve yüksek su emme kapasitesinden dolayı en yüksek su emme oranı görülmüştür. 400 °C’de %10 barit ikame edilen betonların yüksek sıcaklık etkisine daha dayanıklı olduğu, %10’dan sonraki ikame oranlarında ise silis dumanı ikameli numunelerin yüksek sıcaklık etkisine daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. 800 °C’de en düşük basınç dayanımları diatomit ikameli betonlarda görülmüştür.

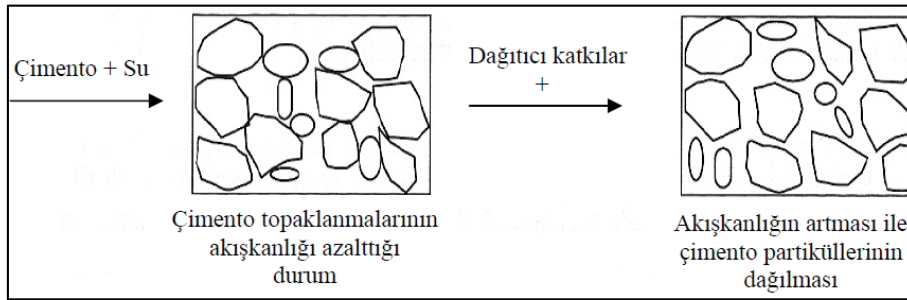
Khan ve Abbas (2015), çalışmalarında hacimce yüksek oranda UK içeren beton numunelerin çeşitli yüksek sıcaklık değerlerindeki davranışlarını incelemişleridir. Çimento yerine %40-60 aralığındaki oranlarda uçucu kül ikame edilerek üretilen beton numuneler, 100-900 °C aralığındaki yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Numunelerin basınç ve çekme dayanımları 300 °C’ye kadar artış göstermiş, ancak bu sıcaklık değerinden sonra düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.

Karagöz (2013), tuğla tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve kırma-taş tozu gibi mineral katkıları kullanarak ürettiği kendiliğinden yerleşen harçların yüksek sıcaklığa karşı gösterdikleri performansı deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak betonlarda kireçtaşı esaslı agregaların kullanılması durumunda, 800 °C’ye kadar olan yüksek sıcaklık etkilerinden kaynaklanan beton deformasyonlarının büyük ölçüde önlenebileceği saptanmıştır.

2.3. Betonda Kullanılan Akışkanlaştırıcı Katkılar

Betonda kullanılan kimyasal katkılar, betonun kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirmek için beton suyuna katılan kimyasal maddelerdir. Kimyasal katkıların betonun akışkanlığını arttırma, erken yüksek dayanım, geçirimsizlik, erken veya geç priz alması gibi özelliklerini etkilediğinden, günümüzde kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir (Karakoç, 2010).

Beton karışımında çimento üzerine dökülen su, çimentonun topaklanmasına neden olur. Bu durum, betonun işlenebilirliğinin azalmasına sebep olur. Karıştırıcının etkisiyle bu topaklar dağılsa da tekrar birleşme eğilimi gösterirler. Çimentonun homojen olarak dağıldığı ve hidratasyonun arttığı ortamda tanecikler arasındaki boşluklar daha çok hidratasyon ürünleriyle dolmakta ve uzun vadede betonun dayanımında artmış olmaktadır. Sonuç olarak, betonun kapileritesi ve boşluk oranı azalmakta, dayanımı yüksek betonlar oluşmaktadır. Dağıtıcı katkı maddeleri normal akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı olmak üzere iki çeşittir. Ağaçlardan elde edilen lignosülfonat isimli madde, normal akışkanlaştırıcıların etken maddesidir. Normal akışkanlaştırıcıların su azaltma etkisi % 5-% 12 civarlarındadır ve çimentonun % 0,2-0,6'sı gibi oranlarda kullanılırlar. Süper akışkanlaştırıcılar kimya endüstrisi tarafından istenilen özellikte üretilen sentetik kimyasallardır (Azizi, 2007).



Şekil 2.6. Dağıtıcı katkıların çimento topaklanmasını önlemesi

Akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile ilgili yapılmış çalışmalar

Karakoç (2010), çalışmasında hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin, yüksek dayanımlı beton numunelerin 0, 100, 200, 300 ve 1500 donma çözünme çevrimi sonunda ultrasonik hızları, poroziteleri, bağıl dinamik elastisite modülleri, basınç dayanımları, ağırlık ve boy değişimleri, BET analizleri ve SEM mikrografları üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Sonuç olarak, hava sürükleyici katkı ve % 10 hafif agregalı numunelerin donma çözünme dayanıklılığı kontrol numunelerinkinden daha iyi çıktığı görülmüştür.

Seçer (2008), çalışmasında polipropilen lif (PP), farklı oranlarda hava sürükleyici katkı ve ince agrega yerine belli oranlarda GP agregası ikame ederek 9 farklı beton numune grubu üretmiş ve bu numune gruplarını belli derecelerde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmıştır. Sonuç olarak beton numunelerde kullanılan hava sürükleyici katkı ve GP agregası oranları artıkça yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen dayanım düşüşlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Akca ve Zihnioğlu (2013) çalışmalarında hava sürükleyici ve PP fiber katkıların beraber kullanılmasının yüksek sıcaklık etkisi altındaki yüksek performanslı betonlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. PP fiber katkı kullanılmayan yüksek performanslı betonlarda 500 °C'den sonra patlamalar görülmüştür. Hava sürükleyici ve PP fiber katkı yüksek performanslı betonlarda 500 °C'den sonraki patlamaların oluşmadığı, PP fiberli ve hava sürükleyici katkısız yüksek performanslı beton numunelerin bazılarının 500 °C'den sonra patladığı, yani yüksek performanslı betonlarda PP fiber kullanılması su buharının boşalması için kanalların oluşmasını sağladığı ve hava sürükleyici katkının da yüksek performanslı betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki patlama riskini azalttığı gözlemlenmiştir.

Yaşar (2008), PP lifli hava sürükleyici katkı ve ince agrega yerine farklı ikame oranlarında yöresel hafif agregalarla üretilen yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve kaldıktan sonra BD, birim ağırlık ve kılcal geçirimsizlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerini deneysel olarak incelemiş ve sonuçları karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Kontrol numunelerine göre GPA kullanılan numunelerin bütün ikame oranlarında yüksek sıcaklık etkisinden önce ve sonra basınç dayanımları ve kuru birim ağırlık değerleri düşüş göstermiştir. Kontrol numuneleriyle diğer numuneler arasındaki fark 300 °C'den sonra sıcaklığın artmasıyla azalmış, 600°C'den sonra önemli bir farkın kalmadığı tespit edilmiştir.

2.4. Isı Yalıtım Malzemeleri ve Perlit

Isı yalıtımı, kapalı mekanların sıcaklıklarını istenilen düzeyde tutmak, enerji tasarrufu sağlamak, çevre sorunlarını çözmek ve hava kirliliğini azaltmak için yapılarda alınan önlemlerin tümü olarak tanımlanabilir (Koçu, 2007).

Yapılarda ısı yalıtımı ile enerji bakımından dışa bağımlı olan ülkemizde büyük bir enerji tasarrufu sağlanacaktır (Şengül, Sayın ve Kaplan, 2005). Günümüz koşullarında, binaların ısıtılması ve soğutulmasında enerji tasarrufunu sağlamaya yönelik adımlar atmak zorunlu olmaktadır. Binalarda ısı yalıtımı bu önlemlerden birisidir. Doğru bir ısı yalıtımı ile binalarda % 30-40 oranında enerji tasarrufu yapmak mümkündür (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı [ÇŞB], 2015: 3).

Isı yalıtımında kullanılan malzemelerde bazı fiziksel ve mekanik yeteneklerin olması istenir. Fakat tüm özelliklerin bir malzemede bulunması mümkün değildir. Bu sebeple, ısı yalıtım sistemleri yapılarda optimum çözümleri geliştirmelidir. Yüksek ısı tutuculuk, düşük birim ağırlık, koşullara uygun buhar geçirimsizliği, yeterli BD, yeterli çekme dayanımı, boyutsal kararlılık gibi özellikler ısı yalıtım malzemelerinde bulunması beklenen fiziksel işlevsellik özellikleridir. Su ve neme, kimyasal ve biyolojik etkilere, yüksek sıcaklığa ve yangına, çürümeye karşı dayanıklılık özellikleri ise ısı yalıtım malzemelerinde bulunması beklenen dayanıklılık özellikleridir. Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık, sağlık açısından zararsızlık, az enerji tüketimi, bakım gerektirmezlik, kolay işlenebilirlik, ucuzluk ve kolay temin edilebilirlik ise ısı yalıtım malzemelerinde olması beklenen diğer özelliklerdir (Kalaycı, 2016).

ISO ve CEN standartlarına göre bir malzemenin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesi için ısıl iletkenlik katsayısının (λ) 0,065 W/m.K'den küçük olması gerekmektedir (Yaman ve Diğerleri, 2015).

Ülkemizde yapıların ısı yalıtımında en çok kullanılan malzemeler ekstrüde polistren köpük (XPS) ve ekspande polistren köpük (EPS)'tür. Bu malzemeler genel olarak binaların dış cephe mantolamalarında, toprakla temas eden yüzeylerde koruyucu olarak, binaların bodrum kat döşemelerinde, gelenekse teraslarda ve dekoratif dış cephe kaplamalarında kullanılmaktadır (Bayraktar ve Bayraktar, 2016).

Ülkemizde en çok kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayısı değerleri ve yangına tepki sınıfları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir (ÇŞB, 2015: 3-8).

Çizelge 2.3. Mevcut ısı yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayısı değerleri ve yangın tepki sınıfları

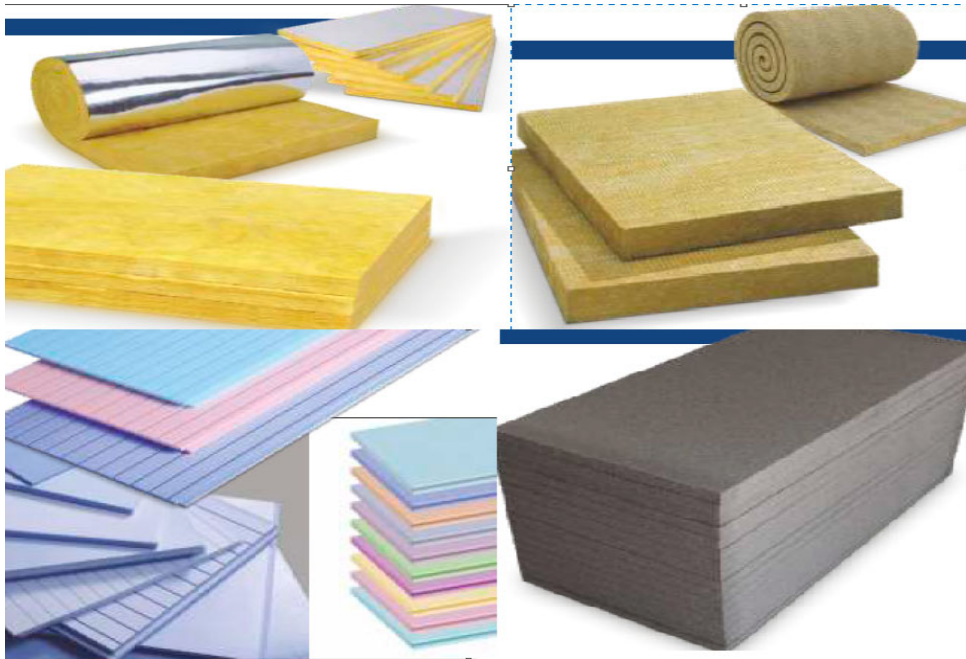
Isı Yalıtım Malzemesi	Isıl İletkenlik Katsayısı	Yangına Tepki Sınıfı
Ekstrüde polistren köpük (XPS)	0,030-0,040	D-E
Ekspande polistren köpük (EPS)	0,035-0,040	D-E
Cam yünü	0,035-0,050	A1-A2*
Taş yünü	0,035-0,050	A1-A2*
Poliüretan (PUR) ve poliizosüenürat (PIR) sert köpükler	0,025-0,040	B-C-D** / D-E***
Fenol köpüğü (PF)	0,030-0,045	B-C-D
Cam köpüğü (CG)	0,045-0,060	A1-A2
Ahşap yünü (WW)	0,035-0,076	B-C-D
Genleştirilmiş perlit (EPB)	0,045-0,065	A1
Genleştirilmiş mantar levhalar (ECB)	0,045-0,055	C-D-E
Ahşap lifli levhalar (WF)	0,035-0,070	C-D-E
Gazbeton ısı yalıtım levhası	0,042-0,050	A1
* Kaplamasız ürünlere ait sınıftır. ** PIR ürünlerine ait sınıftır. *** PUR ürünlerine ait sınıftır.		

Diğer yalıtım malzemeleri

GP dışındaki ısı yalıtım malzemeleri maddeler halinde aşağıda tanıtılmıştır. Resim 2.2.'de soldan sağa sırasıyla cam yünü, taş yünü, XPS ve EPS görülmektedir (ÇŞB, 2015: 3-8).

- XPS: kapalı hücre yapısına sahip, polistren hammaddesinin haddeleme ile çekilmesiyle üretilen ısı yalıtım malzemeleridir. Pürüzlü, pürüzsüz ve kanallı yüzey biçimleri bulunmakta olup, değişik yoğunluklarda (>25 kg/m³) ve değişik şekillerde üretilmektedirler.
- EPS: polistren hammaddesinin su buharı ile büyük bloklar halinde şişirilip sıcak tel ile kesilerek üretilir. EPS levhalarının ısı yalıtımı için kullanılabilmesi için yoğunluğunun en az 15 kg/m³ olması gereklidir.
- Cam yünü: silis kumunun yüksek basınç altında, 1200-1250 °C'de eritilerek ince eleklerden geçirilip elyaf haline getirilmesi sonucu oluşan bir malzemedir. 14-100 kg/m³ yoğunlukları arasında değişik şekillerde üretilmektedir.

- Taş yünü: bazalt ve diabez taşlarının 1350-1400 °C’de ince eleklerden geçirilip elyaf haline getirilmesi sonucu oluşturulan 30-200 kg/m³ yoğunlukları arasında değişik Şekillerde üretilebilen bir malzemedir.
- Poliüretan sert köpük (PUR): Poliüretan, iki ayrı kimyasal komponentin bir araya getirilmesi ile üretilir.
- Fenol köpüğü (PF): fenol-formaldehit bakalitine: anorganik şişirici ve sertleştirici maddeler katılarak elde edilir.
- Cam köpüğü (CG): hücresel dolgu malzemesi ile birleştirilmiş atık cam kırıklarından oluşur.
- Ahşap yünü (WW): ahşap talaşlarının belirli bir bağlayıcıyla 30-200 kg/m³ yoğunluklarında sıkıştırılmasıyla üretilen malzemedir.
- Genleştirilmiş perlit (EPB): ham perlitin kırılarak çeşitli işlemlerden geçirilmesiyle elde edilir.
- Genleştirilmiş mantar levhalar (ECB): ağaçlardan soyulan mantarın çeşitli işlemlerden geçirilmesiyle elde edilir.
- Ahşap lifli levhalar (WF): Ladin, köknar gibi ağaç yongalarının, çeşitli işlemlerden geçirilmesiyle elde edilir.
- Seramik Yünü: Seramik elyaflarının çeşitli işlemlerden geçirilmesiyle elde edilir (ÇŞB, 2015: 3-8).



Resim 2.1. Cam yünü, taş yünü, XPS ve EPS

Perlit asidik karakterli olan volkanik bir cam olup, “perle” kelimesinden türemiştir. “Perle”, inci anlamına gelmektedir. Perlit ısı aldığında hacmi artan, hacmi arttığında ise hafif ve gözenekli bir yapıya sahip olan bir maddedir. Perlit ismi genel olarak hem genleştirilmeden önceki hali için hem de genleştirildikten sonra elde edilen ürün için kullanılmaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı [DPT], 2001: 25).

Doğada griden siyaha kadar çeşitli renk ve yapıda ham perlit bulunmaktadır ancak ham perlit genleştirildiğinde rengi tamamen beyaz olmaktadır. Perlitin kararlılığını sağlayan en önemli unsur, yapısında %2,5 oranında bileşik halinde içerdiği sudur. Perlitin genleşmesi 649–816 °C civarlarında yapısındaki suyun buharlaşmasıyla gerçekleşmektedir (Shastri ve Kim, 2014).

Perlitin oluşumuyla ilgili iki ayrı teori bulunmaktadır. Bunlardan biri asidik karaktere sahip magmanın yüzeye çıkarken soğuması sonucu bünyesinde oluşan kılcal yarık ve çatlaklara atmosfer, deniz, göl gibi dış emenlerden dolayı su dolması ile perlitin oluşmuş olabileceği, diğeri ise SiO_2 bakımından zengin bir kayacın soğuyup katılaşması sürecinde bünyesine su girmesiyle perlitin oluşmasıdır (Çiçek, 2002).

Perlit, ilk olarak 1836 yılında bulunmasına karşın 1946 yılından sonra çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Genleştirme işleminden sonra oluşan hafiflik, ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklerinden dolayı ilk olarak ABD’de beton ve sıva agregası olarak kullanılmaya başlanmıştır (Fındık, 2007). GPA’nın inşaat sektöründe genel olarak üç ana kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlardan birisi GPA’nın ısı ve ses yalıtımını sağlamak amacıyla duvar ve döşemelerde serbest olarak kullanılmasıdır. GPA’nın ikinci kullanım alanı ise ısı ve ses yalıtımlı beton yapımıdır. GPA ile üretilen ısı ve ses yalıtımlı beton binalardaki döşemelerde, zeminle temas eden döşeme ve yüzeylerde, çatılarda kullanılmaktadır. GPA’nın inşaat sektöründeki üçüncü en yaygın kullanım alanı ise ısı ve ses yalıtımlı sıva yapımıdır. GPA, alçı ve CEM I PÇ ile beraber uygun oranlarda katkı maddelerinin kullanımıyla herhangi ek bir işlem gerektirmeden kaba inşaat sıvası olarak kullanılmaktadır (Arı, 2009).

Resim 2.1’de kayaç halindeki perlit, ham perlit ve GP’nin resmi görülmektedir. Kayaç halindeki ve ham perlitin rengi gri ve tonlarıyken, GP ise beyaz halde görülmektedir (Azizi, 2007).



Resim 2.2. Kayaç halindeki Perlit (A), ham perlit (B), Genleştirilmiş Perlit (C)

Ham perlitin fiziksel özellikleri Çizelge 2.4’de, GP’nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.5’de, Tipik bir perlitin kimyasal analizi ise Çizelge 2.6’da gösterilmiştir (Azizi, 2007).

Çizelge 2.4. Ham perlitin fiziksel özellikleri

Renk	Siyah ve grinin tonları
Özgöl ağırlık (kg/m^3)	2200-2400
Birim ağırlık (kg/m^3)	950-2700
Yumuşama noktası (Co)	871-1093
Erime noktası (Co)	1260-1343
Özgöl ısı (kcal/kg Co)	0,20-0,23
Sertlik (Mohs)	5-6

Çizelge 2.5. GP’nin fiziksel özellikleri

Renk	Beyaz
Özgöl ağırlık (kg/m^3)	55-300
Birim ağırlık (kg/m^3)	30-250
Erime noktası (Co)	1300
Isıl iletkenliği (W/mK)	0,04
Isıl genleşme (m/m K)	$4 \cdot 10^{-6}$ - $11 \cdot 10^{-6}$
Ateşe karşı dayanım	Yanmaz
Ses yutma	0,6

Çizelge 2.6. Tipik bir perlitin kimyasal analizi (DPT, 2001: 26)

Bileşenler	Ağırlığın %'si
SiO ₂	71.0-75.0
Al ₂ O ₃	12.5-18.0
Na ₂ O	2.9-4.0
K ₂ O	0.5-5.0
CaO	0.5-2.0
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MgO	0.02-0.5
TiO ₂	0.03-0.2
H ₂ O	2.0-5.0
MnO ₂	0.0-0.1
SO ₃	0.0-0.2
FeO	0.0-0.1
Cr	0.0-0.1
Ba	0.0-0.05
PbO	0.0-0.03
Serbest Silis	0.0-0.2
Toplam Klorürler	0.0-0.2

Türkiye'deki olası perlit rezervi 4,5 milyar ton civarındadır. Rezervin Türkiye'deki dağılımları Çizelge 2.7'de verilmiştir (DPT, 2001: 41).

Çizelge 2.7. Türkiye'deki perlit rezervlerinin bölgelere göre dağılımları (DPT, 2001: 42)

Bölge	Rezerv (Bin Ton)
Ankara- Çamlıdere	8 000
Ankara-Çubuk	32 000
Ankara- Kızılcaham	34 200
Balıkesir-Evrindi	25 000
Balıkesir- Savaştepe-Sındırğa	47 000
Bitlis-Adilcevaz-Tatvan-(Van-Erciş)	1 400 000
Çankırı-Orta	30 000
Çanakkale-Biga	3 400
Eskişehir-Seyitgazi	20 000
Erzincan-Merkez	27 000
Erzurum-Pasinler	100 000
İzmir-Bergama	16 500
İzmir-Dikili	8 000
İzmir-Foça	16 500
İzmir-Menderes (Cuma Ovası)	60 000
Kars -Sarıkamış	1 500 000
Manisa-Demirci-Soma	18 600
Manisa-Saruhanlı	18 000
Nevşehir-Acıgöl	862 000
Nevşehir-Derinkuyu (Nİğde-Gölcük)	350 000
Toplam	4 576 200

Dünyada perlitin bol olduğu coğrafyalar genelde Tersiyer-Erken orta Kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerdir. Perlitin dünya üzerindeki görünür rezervleri Çizelge 2.8’de verilmiştir. ABD, Yunanistan, Japonya İtalya, Türkiye gibi ülkeler perlit bakımından zengin ülkelerdir (DPT, 2001: 26, 27). Ancak dünyada olası perlit rezervinin yarısından fazlasının ülkemizde bulunduğu bilinmektedir (Azizi, 2007).

Çizelge 2.8. Perlitin dünya üzerindeki görünür rezerv miktarları (milyon ton) (DPT, 2001: 27)

Ülkeler	Görünür Rezervler (Milyon Ton)
ABD	50
Diğer	5
Kuzey Amerika Toplamı	55
Türkiye	30
Yunanistan	50
Diğer	490
Avrupa Toplamı	570
Japonya	10
Filipinler	10
Diğer	30
Asya Toplamı	80
Afrika ve Okyanusya	25
Dünya Toplamı	700

GPA bazlı harçlarla üretilen ısı yalıtım levhalarında GPA’nın kullanılmasıyla harç içindeki mikro gözenek oluşumu hızında artış gözlenmektedir. Bu durum, GPA bazlı harçlarla üretilen ısı yalıtım levhalarında BD ve yoğunluk düşüşleriyle sonuçlanmaktadır (Işıkdag, 2015).

Ham perlitin ve GPA’nın birçok sektörde kullanılmasının sebebi çeşitli avantajlarının bulunmasıdır. Bu avantajları aşağıda özetleyecek olursak;

- Perlit yangın durumunda kimyasal yapısını koruyarak, yangının daha çok yayılmasını veya sıçramasını önler.
- Yapısındaki gözenekler sayesinde oldukça hafiftir ve çok iyi ısı yalıtım özelliği bulunmaktadır. Ayrıca yüksek frekanslı ve darbeli sesleri absorbe ederek sesleri yalıtımda kullanılabilir.
- Kararlı iç yapısı sayesinde agresif kimyasal ortamlardan etkilenmez.
- Perlit sterildir, bakteri ve mikrop barındırmaz.

- Sıvalarda kum yerine perlit kullanıldığında, yapının ölü yüklerinde büyük azalmalar meydana gelmektedir.
- Duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, yüksek ısı yalıtım özelliği sayesinde duvar kalınlıklarının incelmeye ve dolayısıyla yapılarda daha geniş kullanım alanlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Arı, 2009).

GPA'nın değişik sektörlerdeki kullanım alanlarını aşağıdaki gibi özetleyecek olursak;
İnşaat sektöründe;

- Çatı ve zeminlerde şekillendirilmiş izolasyon malzemesi olarak veya perlitli sıvalarda,
- Çimento ve alçı bağlayıcılı GPA'lı hafif yalıtım betonlarında,
- GPA'lı hafif yapı elemanları üretiminde,
- Isı ve ses yalıtım amaçlı gevşek dolgu malzemesi olarak,
- Betonarme döşemelerinde ısı ve ses yalıtıcı olarak,
- Alçı ve çimento dışındaki farklı bağlayıcılarla özel kullanım alanları olan betonların üretiminde.

Tarım sektöründe;

- Fide yetiştiricilik, kültür tarımı gibi bahçe tarımı ve seracılıkta,
- Tarla tarımında,
- Çimli spor alanlarında.
- Gıda sanayinde,

Sanayi sektöründe;

- Kimya ve ilaç sanayinde,
- Çeşitli sanayi sektörlerindeki süzme işlemlerinde,
- Seramik ve cam sanayinde katkı maddesi olarak,
- Metalürjide (DPT, 2001: 32-34).

Ham perlit ve GP ile ilgili yapılmış çalışmalar

Zulkifeli ve Mohamed (2016) çalışmalarında 56 gün kür edilmiş ve kum yerine sırasıyla % 0,%10, %20, %30 ve %40 oranlarında GPA ikame edilmiş harç numunelerini 200 °C, 400 °C, 700 °C ve 1000 °C değerlerindeki yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakarak numunelerin basınç ve çekme dayanımlarını incelemiştir. Sonuç olarak numunelerin 200 °C'ye kadarki basınç ve çekme dayanımlarında artış meydana geldiği sonraki sıcaklık değerlerinde ise

sürekli bir düşüş gerçekleştiği, harç numunelerinde kum yerine GPA ikame etmenin düşük sıcaklıklarda etkisiz olduğu ancak yüksek sıcaklıklarda harçların basınç ve çekme dayanımı performanslarını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Fındık (2007), çalışmasında mineral katkı ve genleştirilmiş perlit agregalı (GPA) harçların yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında basınç ve eğilme dayanımlarıyla birlikte ısı iletkenlik katsayılarındaki değişimleri deneysel olarak incelemiştir. Numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde, ince agrega yerine mineral katkı ve GPA ikame edildiğinde, yüksek sıcaklık etkisinden önce ve sonra, kontrol numunelerine göre önemli düşüşlerin meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Çelik, Kılıç ve Çakal (2013), İzmir Menderes yöresinden çıkarılan perlitin genleştirilmesiyle elde edilen GPA'yı, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakarak, SEM, EDS, TG-DTA gibi testlerle fiziksel ve kimyasal analizlerini yapmış, GPA'nın yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını ve yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak, TG-DTA analizleri sonucunda, GPA'da 1000 °C'de %1.8'lik ağırlık kaybı olduğu gözlemlenmiş ve bu da GPA'nın yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabileceğini gözlemlenmiştir.

Karataş, Balumb ve Benli (2017) çalışmalarında GPA ve pomza kullanarak ürettikleri kendiliğinden yerleşen harçların yüksek sıcaklığa karşı dayanımını araştırmışlardır. Sonuç olarak, 300 °C, 600 °C ve 900 °C'lik yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılan sertleşmiş harç numunelerinde kullanılan hafif agrega miktarı arttıkça numunelerin hacimce su emme ve porozite değerlerinde artış meydana geldiği, çekme, basınç ve burulma dayanımlarında ise düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Sağsöz (2007) çalışmasında doğal perlit agregası kullanılarak farklı dozajlarda, farklı kür ortamında ve sıcaklıklarda, farklı kür sürelerinde üretilen betonların BD, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve UGH gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Doğal perlit agregalı numunelerin hava, su ve buhar ortamlarında kür süresi arttıkça BD, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve UGH değerlerinde artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buhar ortamında kür edilen numuneler üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı sürede bekletilmiş olup, sıcaklık arttıkça numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Suda kür edilen

numuneler şahit numuneler olarak kabul edilerek, havada ve buhar ortamında kür edilen beton numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Havada kür edilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin suda ve buharda kür edilen numunelerinkinden daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir.

Azizi (2007), GPA ve doğal kum kullanılarak üretilen hafif betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, ısı iletkenliği, su emme oranları ve kılcallık katsayıları ile birim ağırlıkları arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Sonuç olarak, betondaki perlit oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin arttığı, betonun BHA düştükçe BD ve elastisite modüllerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca tüm perlit katkılı hafif betonların normal betonlara göre yüksek ısı yalıtımı sağladığı, betondaki perlit oranı arttıkça su emme oranları ve kılcallık katsayılarının da arttığı gözlemlenmiştir.

Çiçek (2002) çalışmasında pişmiş tuğla, perlitli malzemeler, bimsbeton ve gazbetonun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Pişmiş tuğlanın ağır olması sebebiyle yapıdaki taşıyıcı sisteme ekstra yük bindirdiği fakat yüksek basınç ve elastisite modülü sayesinde deprem yüküne karşı yapıya yardımcı olduğu, ancak ısı yalıtımının, ses emiciliğinin ve su emmesinin düşük olması pişmiş toprak tuğlanın dezavantajları olarak belirtilmiştir. Bimsin düşük BHA'yla hafif bir malzeme olmasından dolayı yapıya gelen ölü yükleri azalttığı, boşluklu yapısı sayesinde iyi bir ısı ve ses yalıtımı sağladığı ve erime noktasının yüksek olması ve belli bir sıcaklığa kadar iç yapısının bozulmaması sayesinde yangına karşı yüksek dayanım sağladığı belirtilmiştir. Bimsin bu avantajlarının yanında su ile karşılaştığında yapısının bozulması gibi bir dezavantajının bulunduğu da ifade edilmiştir. Gazbetonun da bims gibi düşük BHA sayesinde ısı ve ses yalıtımı gibi çeşitli avantajlarının bulunduğu ancak bazik yapısı sebebiyle asidik ortamlarda kullanılmaması gerektiği ifade edilmiştir. Perlitin genleştirildiğinde düşük ağırlığı, yüksek ısı ve ses tutuculuğu sayesinde iyi bir dolgu malzemesi olması özellikleri öne çıktığı, ancak düşük BD ve suya karşı aşırı duyarlılığı sebebiyle direk yapı malzemesi olarak kullanılamayacağı belirtilmiştir.

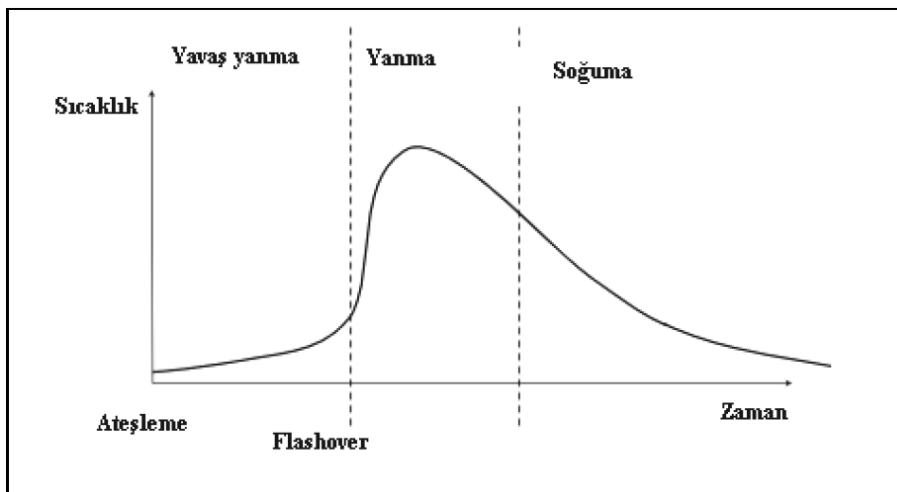
Çelik, Kılıç ve Akkurt (2014) çalışmalarında GPA kullanarak duvar örgü elemanı üretilebilirliğini araştırmışlardır. Duvar elemanı üretim parametreleri değiştirilerek en düşük BHA ($522,5 \pm 48,3 \text{ kg/m}^3$) ve en yüksek BD ($12,13 \pm 0,13 \text{ kg/cm}^2$) elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen en yüksek BD olan $12,13 \pm 0,13 \text{ kg/cm}^2$ değerinin TS EN 771-1 sınır değerlerinin altında kaldığı belirtilmiştir.

Demirboğa, Gül ve Örüng (2001) farklı karışım oranlarıyla pomza ve GPA kullanarak ürettikleri beton numunelerin basınç dayanımlarını incelemiştir. Sonuç olarak GPA ile hazırlanan numunelerde GPA miktarı arttıkça BD'nın düştüğü gözlemlenmiştir.

Demirboğa ve Gül (2003) çalışmalarında GPA ile üretilen betonlarda, çimento yerine uçucu kül ve silis dumanı kullanılmasının etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak çimento yerine % 14'e kadar silis dumanı ve %18'e kadar uçucu kül ikame edildiğinde termal iletkenliğin düşüş gösterdiği ve numunelerin BHA'nın da 522 kg/m^3 'den 483 kg/m^3 'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Çimento yerine %10, %20 ve %30 oranında silis dumanı kullanıldığında 7 günlük numunelerde sırasıyla %12, %19 ve %29'luk BD düşüşleri görülmüş, 28 günlük numunelerde ise %9, %13 ve %4'lük artışlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Çimento yerine uçucu kül ikame edildiğinde ise 7 günlük numunelerde %36'ya, 28 günlük numunelerde ise %27'ye varan BD düşüşleri gözlemlenmiştir.

2.5. Yüksek Sıcaklığın Çimento ve Agregaya Etkileri

Yangın, katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması sonucu meydana gelir. Yangının başlaması ile meydana gelen ısı üç yolla yayılır: moleküller arası ısı transferiyle (kondüksiyon), molekül hareketleriyle (konveksiyon), ısı cismin yüzeyinden elektromanyetik dalgalar ile emilmesiyle (radyasyon). Bir yangın, ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört aşamadan meydana gelir. Yangının aşamalarını gösteren sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 2.9'da verilmiştir (Uçarkoşar, 2013).

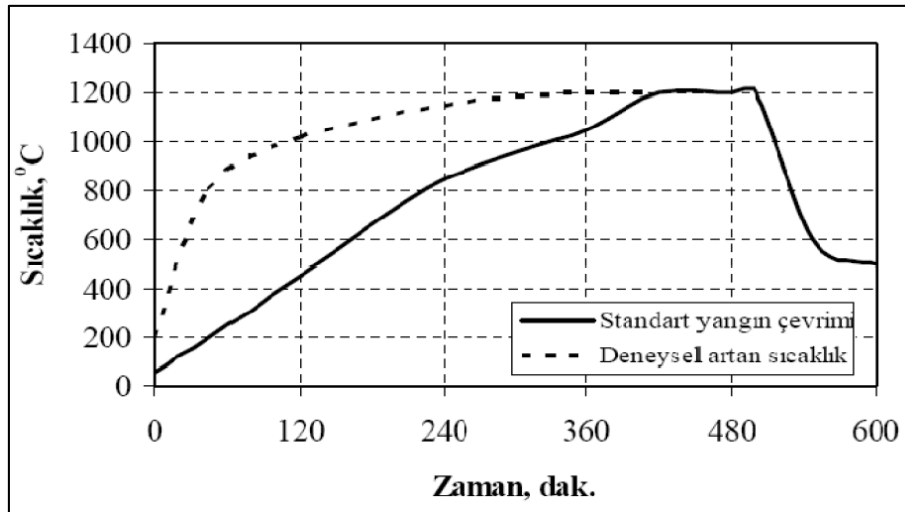


Şekil 2.7. Yangın aşamalarını gösteren sıcaklık-zaman grafiği (Uçarkoşar, 2013)

Yangın yapı elemanlarına ve dolayısıyla yapıya büyük zararlar verebilmekte, yıkımlara, can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Bu sebeple, yapılarda en çok kullanılan malzeme olan betonun yangın altındaki davranışının bilinmesi ve betonun yangına karşı olan dayanımının geliştirilmesi gerekmektedir. Betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları deneysel olarak incelenmesindeki en büyük zorluk yangının laboratuvar koşullarında modellenememesidir. Çünkü yangın sırasında beton, birçok faktöre göre değişkenlik gösterebilen karmaşık bir yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmaktadır. Bu sebeple literatürde çalışmaların çoğunda betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenmiştir.

Betona laboratuvar koşullarında verilen yüksek sıcaklık etkisi gerçek yangın koşullarını tam olarak yansıtmamaktadır. Ancak yine de, betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını inceleyen çalışmalar betonda ve harçlarda yangın etkisinin önemli bir kısmının anlaşılmasını sağlamıştır (Gülce, 2009).

Yüksek sıcaklık etkisi altında incelenen betonlarla ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklık etkisi yangınla bir yere kadar benzerlik göstermektedir. Şekil 2.10'da yangın ile yüksek sıcaklık etkisi arasındaki ilişki sıcaklık-zaman grafiğinde gösterilmiştir (Peng ve Diğerleri, 2006).



Şekil 2.8. Gerçek yangın ile yüksek sıcaklık etkisi arasındaki ilişki (Peng, Chan, Song ve Yi, 2006)

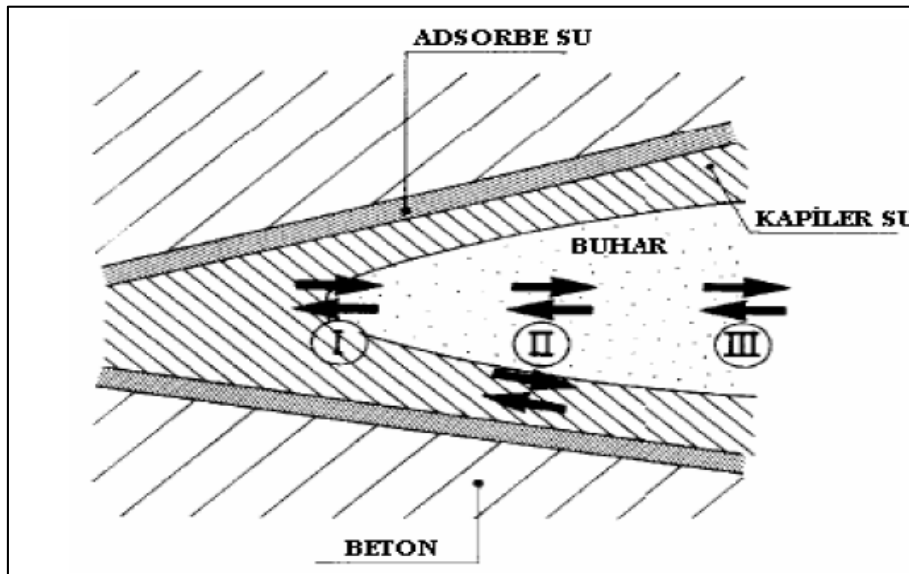
Betonun yüksek sıcaklık ve yangın etkisi altındaki davranışlarını betonda kullanılan çimento ve agrega özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple yangının veya yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkilerini anlayabilmek için yüksek sıcaklığın öncelikle

betondaki en önemli bileşenler olan çimento ve agregaya olan etkilerine değinmek gerekmektedir. Betonun yangına karşı dayanımını etkileyen bir diğer faktör de çevresel etmenlerdir. Yangının türü, yangının ne kadar yüksek sıcaklık etkisi yarattığı ve yangına maruz kalan yapı elemanının konumu betonun yangın dayanımını etkileyen çevresel etmenlerdir (Gölce, 2009).

2.5.1. Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi

Beton bünyesindeki su üç şekilde bulunur. Bunlar, çimento hamurunda hidrate olmuş kalsiyum silikat öğelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, kılcal boşluklardaki serbest su ve hidrate olmuş taneciklerdeki kimyasal bağlı sudur. Betonun bünyesinde, s/ç oranına, çimento türüne bağlı olarak beton hacminin %4'ü kadar serbest su bulunabilmektedir. Betonda bulunan serbest su 100 °C'de, kimyasal bağlı su ise 300 °C'de buharlaşmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle betonun bünyesinden buharlaşan su, büzölmelere ve dolayısıyla beton donatı arasındaki beton örtünün parçalanarak kopmasına neden olmaktadır. Bu durum, daha yangının başlangıcında donatının yangınla ve sıcak gazla temas etmesine neden olur (Akman, 2002).

Şekil 2.11'de suyun beton içindeki basitleştirilmiş hareketi görölmektedir. I suyun buharlaşmasını ve yoğunlaşmasını, II betonun içine suyun transferini, III ise suyun betonun dışına transferini göstermektedir (Andrade, Alonso ve Khoury, 2003).



Şekil 2.9. Betonun içindeki boşluk suyunun hareketi (Andrade, Alonso ve Khoury, 2003)

Beton yüksek sıcaklığın etkisinde kaldıkça içinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar ilerlemektedir. Başlangıçta çimento hamurunda bulunan mikro çatlaklar betonun sertleşmesi sırasında oluşan rötre çatlaklarıdır. Bu mikro çatlaklar 200 °C'nin altında kolaylıkla ilerleyebilirler veya bazıları kaybolurlar. Hidrate olmamış tanelerin etrafındaki çatlaklar bu sıcaklıklarda gelişir. 300 °C civarında çatlaklar çimento fazını geçer ve agregaları çevreler. Sıcaklık 500 °C'yi geçtiği zaman çatlaklar çimento hamurunda gerçekleşir, 0.01 mm'den büyüktür, agregaları çatlatırlar ve artık gözle görülebilirler (Alonso, Andrade ve Khoury, 2003).

Çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan ürünlerden olan kalsiyum hidroksit, yangın esnasında 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşmesi sonucunda %33 civarında bir büzülme meydana gelir. Yangına müdahale etmek için sıkılan su ile sönmemiş kireç tekrar kalsiyum hidroksite dönüşür ve bu durum %44 civarında bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucunda beton yer yer dökülür ve boşluklu bir hal alır. Kalsiyum hidroksitin bu boşluklardan süzülmesi sonucu oluşan beyaz lekeler, yangının 530 °C'nin üzerine çıktığının bir kanıtıdır (Akman, 2000).

Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü yani kalsiyum hidroksitin yüksek sıcaklığın etkisiyle dehidratasyonu 500 °C civarlarında olurken, CSH'nin dehidratasyonu ise 110 °C'den itibaren başlamaktadır. Her iki olay da çimento hamurundaki katı miktarının azalmasına sebep olmaktadır (Scherefller, Brunello, Gawin, Majorana and Pesavento, 2002).

2.5.2. Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi

Agregaların betonda hacimce %60-80 arasında hacim kaplamasından dolayı betonun ısıl genleşme katsayısı ısıl iletkenliğini direk olarak etkilemektedir. Agregaların genel olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğu söylenebilir ve agregaların yüksek sıcaklığa dayanıklılıkları mineralojik yapısına bağlıdır. Silis esaslı agregalar için 250 °C ile 575 °C gibi değerler kritik sıcaklıklardır. 1200 °C'lerde karbon bileşimi ayrışır ve erir. Kuvartz kumların büyük çoğunluğunu oluşturur ve 575 °C'lerde yaklaşık %5.7'lik bir hacim artışı gerçekleşir. Granit ve bazalt esaslı agregalar 1000 °C'ye kadar kararlı kalabilmektedirler (Gülce, 2009).

Hager, Tracz, Sliwinski ve Krzemien (2015) çalışmalarında agrega tipinin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış yüksek performanslı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bunun için beton karışım oranları, agrega dışında kullanılan diğer malzemeler gibi özellikleri aynı tutularak bazalt, granit, dolomit ve dere yatağı çakılı olmak üzere dört farklı agrega kullanılmıştır. Dolomit ile üretilen yüksek performanslı betonlarda yüksek sıcaklık etkisiyle dolomitteki CaCO_3 'ün dekompozisyonu sonucu oluşan ani yoğunluk düşmesi %27 civarında olurken, volkanik kayalarla (bazalt ve granit) ve çakıl ile üretilen yüksek performanslı betonlardaki yoğunluk düşüşü %7 civarında olduğu belirtilmiştir. 400 °C'ye kadar olan çekme ve basınç dayanımlarındaki değişimler numunelerde kullanılan agregaların yapısıyla ilişkilendirilirken, daha yüksek sıcaklıklarda portlandit dekompozisyonu sonucu benzer düşüşler meydana geldiği, numunelerin çekme dayanımlarında basınç dayanımlarından daha bariz düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

Pomza, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil gibi hafif agregalar ile üretilen betonların ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklık etkisine karşı gösterdikleri dayanım fazladır. Genellikle silis içermeyen kalker ve volkanik kökenli kayalar gibi agregalardan üretilen betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanımları yüksek olmaktadır (Shoaib, Ahmed ve Balaha, 2001).

Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Yüksek sıcaklık etkisi ile, düşük ısı iletkenliğine sahip betonun yüzeyi ısınırken iç kısımları yüzeye göre daha az ısınır dolayısıyla sıcaklık farkından dolayı betonda genleşmeler ve büzölmeler meydana gelir. Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayılımı, ısı iletkenliği, ısı genleşme, özgül ısı, birim ağırlık ve renk gibi fiziksel özelliklerine etki eder. Yapılan bir çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindirik harç numuneleri yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Tüm numunelerde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış yüzeyden 25-30 mm kadar içeri doğru çatlaklar oluştuğu, 300 °C'den daha az sıcaklığa maruz kalmış numunelerde yerel ara yüz çatlakları, 300-500 °C arasında ara yüz ve çimento pastasında, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agregalarda ciddi çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklığa maruz kalmış numunelerin farklı yönlerinde farklı eğilme ve BD değerleri oluştuğu (anizotropi) gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonda anizotropik özellikler görülüyorsa sıcaklık 500 °C'yi aşmış demektir (Gölce, 2009).

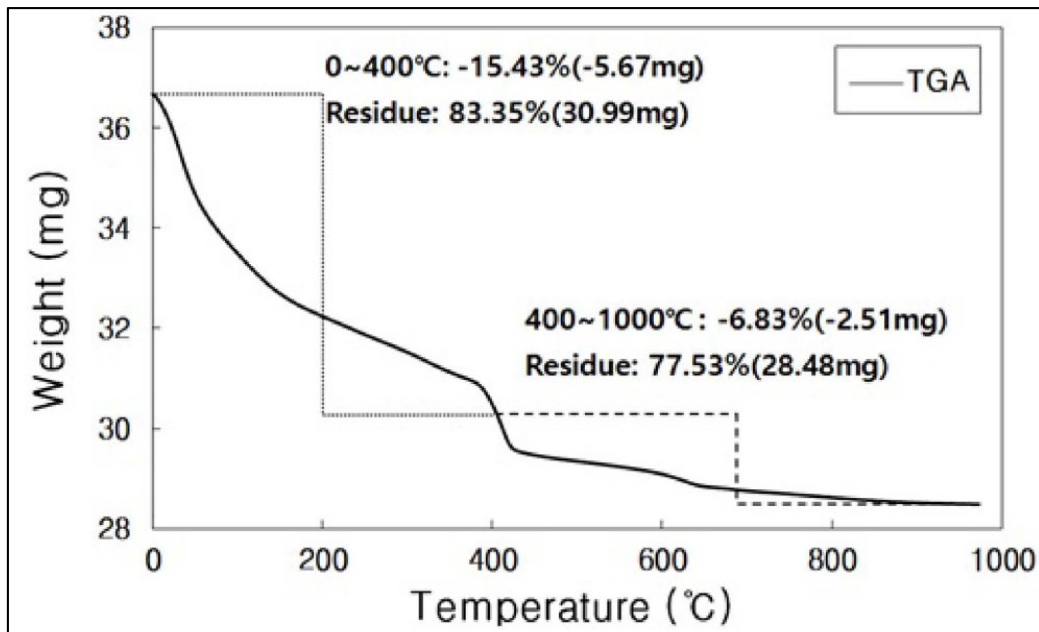
2.5.3. Yüksek sıcaklığın betonun porozitesine etkisi

Betonun gözenekliliği 120 °C' ye kadar önemli bir değişiklik göstermemektedir. Yüksek dayanımlı betonların 25, 70 ve 120 °C sıcaklıklarda sabit bir boşluk oranı bulunmaktadır. Normal betonlarda betonun boşluk oranı 300 °C'den 600°C'ye kadar yaklaşık %148'lik yüksek dayanımlı beton için %86'lık bir artış göstermektedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonların boşluk oranları artan sıcaklıkla beraber artış göstermektedir (Cülfik, 2001).

2.5.4. Yüksek sıcaklığın betonun ağırlık değişimine etkisi

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda beton karışımı, 70 °C'ye kadar ağırlığının %99'unu korumaktadır. Yine normal ve yüksek dayanımlı betonlarda betonda bulunan serbest su 70-120 °C arasında buharlaşmakta, yaklaşık %1,4 civarında kütle kaybı oluşmaktadır. En yüksek kütle kaybı ise %7 civarında 120-300 °C arasındadır. Bunun sebebi betonda bağlı olan suyun buharlaşmasıdır. Kütle kaybı 300 ile 600 °C arasında nispeten daha önemsizdir (Cülfik, 2001).

Şekil 2.12'de de 3,15 kg/m³ yoğunluğunda ve 330 m²/kg inceliğindeki sıradan bir portland çimentosunun yüksek sıcaklık etkisi altındaki ağırlık kaybı gösterilmiştir. Buna göre 0-400 °C arasındaki ağırlık kaybı %15,43 olurken, 400-1000 °C arasındaki ağırlık kaybı ise %6,83 olmuştur (Heo, Lee ve Lee, 2016).



Şekil 2.10. Portland çimentosunun yüksek sıcaklık etkisi altındaki ağırlık kaybı

2.5.5. Yüksek sıcaklığın betonun birim hacim ağırlığına (BHA) etkisi

Yangından sonra betondaki hasarın ölçülmesi için betonun bakılan özelliklerinden bazıları porozite ve ağırlık kaybıdır. Yangından sonra betonda meydana gelen ağırlık kaybının nedeni buharlaşan suyun etkisiyle porozitenin artmasıdır. Porozitenin artışı normal ve yüksek dayanımlı betonlarda lineer şekildedir. Ancak ultra yüksek dayanımlı betonlarda bu durum geçerli değildir çünkü ultra yüksek dayanımlı betonlarda kılcal boşlukların neredeyse bulunmaması ve hidrate olmamış çimento tanelerinin çokluğu suyun buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Yapılan bir çalışmada, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak üretilen numuneler yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılarak havada ve suda soğutma işlemi yapılmış, suda soğutulan numunelerin daha az boşluklu yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi yüksek sıcaklığın etkisiyle dehidrate olmuş çimento tanelerinin, suda soğutma işleminin etkisiyle tekrar hidrate olmasıdır (Alonso ve diğerleri, 2003).

Sıcaklık arttıkça, beton içerisindeki serbest ve kimyasal bağlı bulunan suyun buharlaşmasıyla beton numunelerin BHA'larında düşüşler meydana gelmektedir (Mahsanlar, 2006).

2.5.6. Yüksek sıcaklığın betonun hacimce su emmesine (HSE) etkisi

Beton katı ve boşluksuz bir cisim olarak görülmesine rağmen, iç ve dış yapılarında gözle göremediğimiz kadar küçük boşluklara sahiptirler. Betonun HSE oranı bu boşluklara bağlıdır. Büyüklü küçüklü, sürekli veya süreksiz bu boşluklar, betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilemektedir (Öztürk, 2012).

Betonların durabiliteleri su emme miktarlarıyla ters orantılıdır. Beton üretiminde kullanılan agregaların yüksek oranda su emmesi betonlarda önemli durabilite problemlerine neden olmaktadır (Ulus, 2007).

Sıcaklık arttıkça betonun iç yapısındaki gözeneklerde serbest bulunan su ile kimyasal bağlı sular buharlaşır. Böylece beton daha gözenekli hale gelir ve betonun HSE oranında artış beklenir. Numunelerin HSE oranları genellikle düşük olması dışa açık kılcal ve kanal boşluklarının en az düzeyde bulunmasından kaynaklandığı söylenebilir (Gökçe, 2010).

2.5.7. Yüksek sıcaklığın betonun kapiler su emme (KSE) katsayısına etkisi

Beton yüzeyleri suyla temas ettiğinde, suyun yüzey gerilimi sayesinde betonun kılcal boşlukları arasında yükselmesine KSE denir. Su, beton içerisinde belli bir yüksekliğe kadar “t” kadar sürede yükselir ve durur. $Q^2 = k \times t$ eşitliğinden faydalanılarak betonun “k” KSE katsayısı hesaplanır (Yaşar, 2008).

Betonun yapısında bulunan serbest su, betondaki kılcal kanalların artmasına ve birbiriyle bağlantı kurmasına neden olmaktadır. Bu sebeple betonun s/ç oranı arttıkça yapısında bulunan kılcal boşluklar ve dolayısıyla kapilerite de artar (Yaşar, 2008).

Yüksek sıcaklık betonda deformasyonlar meydana getirir ve yapısında serbest bir şekilde veya bağlı olarak bulunan suyu buharlaştırır. Bu durum betondaki boşluklu yapıyı artırır. Dolayısıyla yüksek sıcaklık etkisinin betonun KSE katsayısını arttırması beklenmektedir.

2.5.8. Yüksek sıcaklığın betonun ultra geçiş hızına (UGH) etkisi

Ultrasonik dalgalar, frekansları 20-200 kHz arasında olan, insanın duyma eşiğinin ötesindeki ses dalgalarıdır. Frekansları yüksek olduğu için emilmeden daha uzun yol alabilirler. (Sağsöz, 2007).

UGH deneyi ile malzeme kalitesinin tayin edilebilmesi için, deneyin hassasiyetle yapılması gerekmektedir. Ses titreşimlerinin malzeme içinden geçiş süresi ve geçiş uzunluğunun çok iyi ölçülebilmesi gerekmektedir ki böylece ultrasonik ses dalgasının malzeme içinden geçiş hızı doğru bir şekilde hesaplanabilsin. UGH deneyi tahribatsız, kolay, hızlı ve daha pek çok avantajlara sahip bir test tekniğidir. UGH deneyi sonuçları betonarme elemanı içerisindeki donatının pozisyonu, betonun nem durumu gibi durumlardan etkilendiği için dikkatli ve titiz bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Sağsöz, 2007).

UGH deneyi ile betonun içindeki boşluk yapısı ile ilgili fikir edinebiliriz. Dolayısıyla UGH deneyi ile yüksek sıcaklık etkisinin betonun boşluk yapısında ne gibi değişimler meydana getirdiği gözlemlenebilmektedir. Betonun boşluk yapısı ise betonun BD, birim ağırlığı, stabilitesi gibi pek çok özelliği ile ilgili bize fikir vermektedir. Genel olarak UGH’nın azalması betondaki boşluk oranının artmasıyla yorumlanmaktadır.

2.5.9. Yüksek sıcaklığın betonun ısı iletkenlik katsayısına (λ) etkisi

Bir maddenin ısıyı iletme kabiliyetine o maddenin ısı iletkenliği denir. Isıl iletkenlik katsayısı ise bir maddenin homojen birim alanından geçen ısı (enerji) miktarıdır. Betonun ısı iletkenlik katsayısı, betonun hangi sıcaklıkta, ne kadarlık alan ve kalınlıktan ne kadarlık ısı geçirdiği bilgisidir. UK ve GPA gibi hafif agregaların beton karışımında kullanılması yoğunluğu düşürdüğü için karışımın ısı iletkenlik katsayısının da düşmesine sebep olur (Gandage ve diğerleri, 2013).

Betonun ısı iletkenlik katsayısını etkileyen en önemli unsur betonda kullanılan agrega cinsidir. Kalker ve dolomit esaslı agregalardan üretilen betonların λ 'sı yüksek değerlere ulaşamazken, silis esaslı agregalarda λ değeri %15-20 civarında daha yüksek bir değer almaktadır. Betonun ısı iletkenlik katsayısına etki eden diğer önemli etkenler ise betonun boşluk yapısı, boşluk oranı ve su içeriğidir. Suyun λ 'sı havaya göre daha yüksek olduğu için betonun yapısındaki su içeriği azaldıkça λ 'sı düşmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki çimentonun dehidratasyonu ile betonun boşluklu bir hal alması ve bünyesindeki suyu kaybetmesi, betonun ısı iletkenlik katsayısının düşmesine neden olmaktadır (Gülce, 2009).

2.6. Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların mekanik özellikleri olumsuz yönde değişir. Yangından sonra betonun mekanik özelliklerindeki değişimleri ve özellikle betonun yangından sonraki BD'nı bilmek çok önemlidir. Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine olan etkileriyle ilgili olarak literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Fakat bu çalışmalarda yüksek sıcaklık etkisi fırınlar yardımıyla verilmiş, yangın etkisine değinilmemiştir. Nitekim, Peng, Chan, Song ve Yi (2006), yüksek sıcaklığın betona olan etkileriyle ilgili olarak literatür araştırması yapmışlardır. Sonuç olarak geçmişte yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek sıcaklık etkisinin yangın koşullarına daha yakın olması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca yangından sonra havada kendi kendine soğutma koşuluyla ilgili literatürde yeterli deneysel çalışmanın bulunduğu, ancak yangından sonra suyla soğutmayla ilgili literatürde yeterli çalışmanın bulunmadığı vurgulanmıştır.

2.6.1. Yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımına etkisi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betondaki BD değişimi sıcaklığın derecesine, sıcaklığa maruz kaldığı süreye, çimento tipine, s/ç oranına, betonun soğuma şekli gibi çevresel etmenlere bağlıdır (Neville, 2000; 158).

Hager, (2014) çalışmasında normal ve yüksek performanslı betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki basınç dayanımı kayıplarını deneysel olarak incelemiştir. Çizelge 2.9.'da Hager'in çalışmasındaki, normal ve yüksek performanslı betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki bağlı basınç dayanımlarının değişimi gösterilmiştir. Buna göre normal beton 800 °C'de basınç dayanımının %81'ini kaybederken, yüksek performanslı beton ise %64'ün kaybetmektedir.

Çizelge 2.9. Normal ve yüksek performanslı betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki bağlı basınç dayanımlarının değişimi

	20 °C	200 °C	400 °C	500 °C	600 °C	800 °C
Normal beton (%)	100	92	78	62	43	19
Yüksek performanslı beton (%)	100	93	85	74	57	36

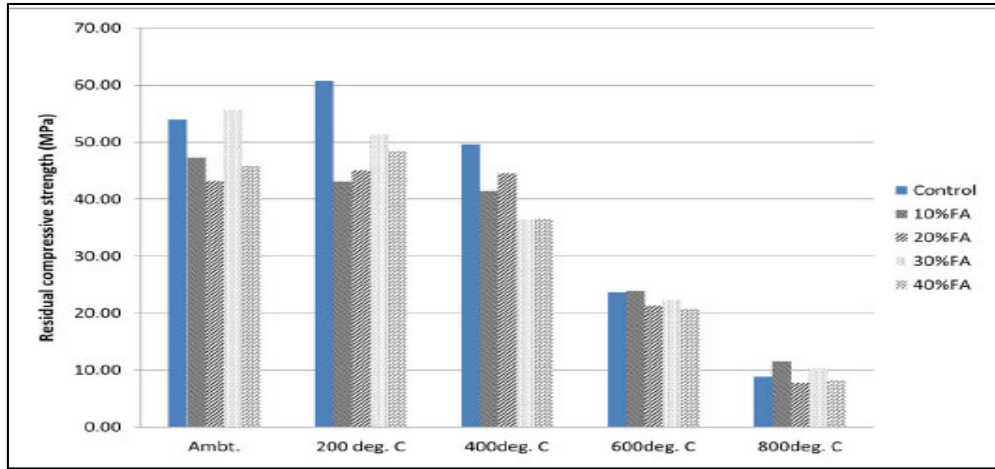
300 °C'ye kadar olan dayanım artışının silis esaslı agregalar kullanılarak üretilen betonlarda daha fazla olmasının sebebi çimento ile silis esaslı agregalar arasındaki aderansın daha güçlü olmasıdır (Savva, Manita ve Sideris, 2005).

Yangın etkisine maruz kalmış betonun mekanik özelliklerindeki ve basınç dayanımlarındaki değişim, yangın sonrasındaki soğutmaya göre önemli ölçüde değişmektedir. Yangın sonrasında su sıkılarak veya suya daldırılarak soğutulan betonun BD, havada kendi kendine soğumaya bırakılan betonun BD'ndan çok daha düşük çıkmaktadır (Demir, 2008).

Zulkifeli ve Mohamed (2016) çalışmalarında 56 gün kür edilmiş ve kum yerine sırasıyla % 0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında GPA ikame edilmiş harç numunelerini 200 °C, 400 °C, 700 °C ve 1000 °C değerlerindeki yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmış, sonuç olarak harç numunelerinde kum yerine GPA ikame etmenin düşük sıcaklıklarda etkisiz olduğu ancak yüksek sıcaklıklarda harçların basınç ve çekme dayanımı performanslarını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Chan, Luo ve sun (2000), yaptıkları deneysel çalışmada normal ve yüksek performanslı betonların 800 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımlarını ve boşluk oranlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra, yüksek performanslı betonların BD'ndaki düşüşün normal dayanımlı betonlardan daha yüksek olduğu ancak yüksek performanslı betonların yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki basınç dayanımlarının normal dayanımlı betonlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisinden sonra normal dayanımlı betonlara göre, yüksek performanslı betonların boşluk oranlarındaki düşüşün daha yüksek, yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki boşluk oranlarının da daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Shaikh ve Vimonsatit (2014), çimento yerine belli oranlarda Uçucu kül ikame ederek ürettiği beton numuneleri yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakarak numunelerin bağıl basınç dayanımlarını incelemiştir. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi çimento yerine %10 oranında uçucu kül ikame edilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD kayıpları en az çıkmıştır.



Şekil 2.11. Yüksek sıcaklık etkisi altındaki çimento yerine belli oranlarda uçucu kül ikame edilmiş beton numunelerin bağıl basınç dayanımları

Kızılkant (2004) çalışmasında yüksek sıcaklığa maruz kalan farklı türdeki harçların BD-renk ilişkisini deneysel olarak araştırarak bir bağıntı elde etmiş, böylece yüksek sıcaklığa maruz kalan yapıların renk ölçümlerinin yapılarak maruz kaldığı sıcaklık derecesini ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimi tespit etmeyi hedeflemiştir. Bu amaçla harcın BD değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuş ve agrega türüne bağlı olarak iki farklı bağıntı elde edilmiştir. Sonuç olarak silis esaslı agrega ile üretilen harçlar için; $f_{teo} = e^{4,30+0,06H-0,20V-1,21C}$, ($r=0,85$) bağıntısı, kalker esaslı agregalar ile üretilen harçlar için ise

$f_{teo}=e^{7,33-0,06H-0,22V-1,44C}$, ($r=0,85$) bağıntısı elde edilmiştir. Bu bağıntılardan faydalanılarak yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın yüzey renginin tür (H), değer (V) ve doymuşluk bileşenleri belirlenerek harcın veya betonun BD tahmin edilebilecektir.

Karakoc (2013), çalışmasında ince agrega yerine %10, %20 ve %30 oranlarında pomza ve GPA ikame ederek ürettiği beton numuneleri 700 °C'lik yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmış ve yüksek sıcaklık etkisinden sonra numuneleri suda, fırında ve havada olmak üzere üç şekilde soğutmuştur. Sonuç olarak bütün numune gruplarında suyla soğutulan numunelerin basınç dayanımı havada ve fırında soğutulan numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır.

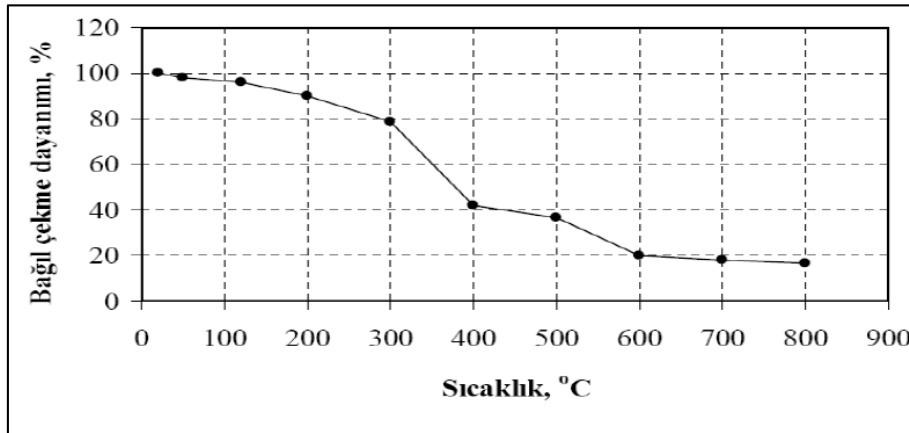
Bingöl (2008), farklı basınç dayanım sınıflarında, farklı gömme boylarında donatılı ve donatısız olarak ürettiği beton ve betonarme numunelerini yüksek sıcaklıklara maruz bırakmış ve numuneleri farklı ortamlarda soğutmuştur. Böylece yüksek sıcaklıklara maruz kalmış numunelerde beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetini ve basınç dayanımlarını soğutma şeklinin, donatının betona gömülme boyunun ve yüksek sıcaklığın ne derece etkilediği deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak 150 °C'ye kadar numunelerin BD'nda ve aderans kuvvetlerinde artış gerçekleştiği, 150 °C'den sonraki bütün sıcaklıklarda ise BD'nda ve aderans kuvvetinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisinden sonra numuneleri suda soğutmanın BD'nı daha fazla düşürdüğü, soğutma şeklinin aderans kuvvetini bariz bir şekilde etkilemediği gözlemlenmiştir.

Hacıemiroğlu (2014), pas payı, yangın etkisindeki kat, ve üç farklı yangın süresi gibi parametreler kullanarak oluşturduğu otuz farklı yangın senaryosuna maruz kalmış bir yapının deprem yükleri altındaki davranışlarını karşılaştırmalı olarak irdemiştir. Sonuç olarak yapının yangına maruz kalma süresi arttıkça, yapının rijitliğini kaybettiği ve ufak mafsallaşmaların gerçekleşmesi ile yapının yatay yük taşıma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Üst katlarda meydana gelen yangınlarda, zemin katlara göre, yapının yangından daha az etkilendiği gözlemlenmiştir. Pas payı arttıkça yangının özellikle donatılar üzerindeki dayanım kaybı etkisinin azaldığı, pas payının yangının kolonlar üzerindeki mafsallaşma etkisini azalttığı gözlemlenmiştir.

2.6.2. Yüksek sıcaklığın betonun çekme dayanımına etkisi

Karataş, Balumb ve Benli (2017) çalışmalarında GPA ve pomza kullanarak ürettikleri kendiliğinden yerleşen harçları 300 °C, 600 °C ve 900 °C'lik yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakmış, sonuç olarak sertleşmiş kendiliğinden yerleşen harçların çekme, basınç ve burulma dayanımlarında düşüş meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Eğilmede çekme ve yarma deneyi ile araştırılan betonun çekme dayanımı, yüksek sıcaklığın etkisiyle düşmektedir. Şekil 2.14.'de artan sıcaklıkla beraber betonun çekme dayanımındaki değişimin grafiği verilmiştir. Buna göre normal dayanımlı betonlarda, betonun çekme dayanımı 600 °C'de ilk çekme dayanımına göre yaklaşık % 80 azalır. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonun çekme dayanımındaki azalmanın sebebi olarak aderans bozulması, çimento hamurundaki CSH jellerinin dehidratasyonu ve agregalardaki ısıl genleşme farklılıkları gösterilebilir (Yamazaki ve Diğerleri, 1995).

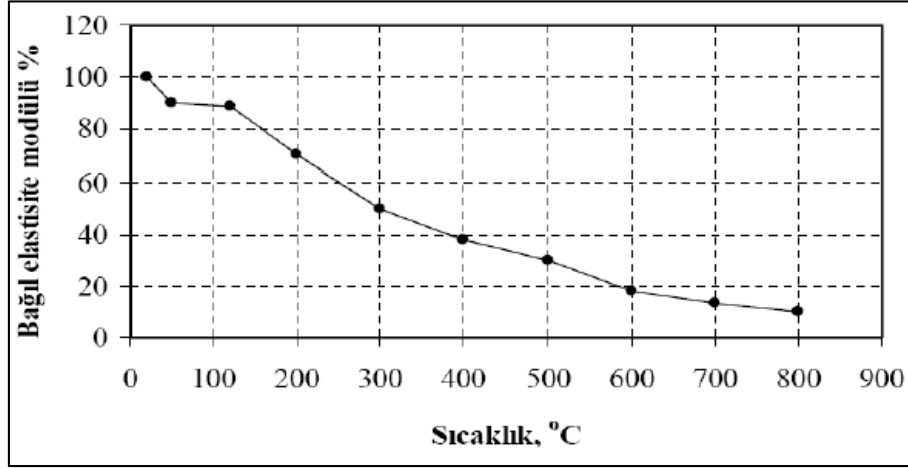


Şekil 2.12. Normal dayanımlı betonda sıcaklık ve çekme dayanımındaki değişim ilişkisi (Yamazaki ve Diğerleri, 1995)

Yapılan araştırmalarda, yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun çekme dayanımındaki düşüşün BD'ndakinden daha fazla olduğu saptanmıştır. Bunun sebebi, çimento tanelerinin rehidratasyonu ile oluşan çatlakların betonun çekme dayanımına daha fazla zarar vermesidir (Özbey, 2009).

2.6.3. Yüksek sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi

Yüksek sıcaklığın etkisi arttıkça betonun elastisite modülü azalmaktadır. Şekil 2.15’de sıcaklık ve betonun elastisite modülündeki değişim gösterilmiştir (Yamazaki ve Diğerleri, 1995).



Şekil 2.13. Normal dayanımlı betonun sıcaklık ile elastisite modülündeki değişim ilişkisi (Yamazaki ve Diğerleri, 1995)

Betonun elastisite modülündeki değişim betonun mekanik özelliklerini direk olarak etkilemektedir. Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun BD’ndaki değişim ile elastisite modülündeki değişim paralellik göstermektedir. Şekil 2.17’de de görüldüğü üzere yüksek sıcaklık etkisi 800 °C’ye ulaştığında betonun elastisite modülü %90 civarında azalmaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEMLER

Bu bölümde, numunelerde kullanılan malzemeler, tez kapsamında yapılan deneylerin ilgili standartlara göre yapılış şekilleri, numunelerin üretimi ve numunelere yüksek sıcaklık etkisinin nasıl verildiği ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1. Malzemeler

Numunelerin üretiminde kullanılan çimento, su, perlit, uçucu kül, agrega ve süper akışkanlaştırıcı malzemelerinin nereden ve ne şekilde temin edildiği, fiziksel ve kimyasal özellikleri, ilgili standartlara uygun bir malzeme olup olmadığı ilgili konu başlıkları altında ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1.1. Çimento

Beton numunelerin hazırlanmasında kullanılan çimento, Ankara Baştaş Çimento Sanayi A.Ş.'nin fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R çimentosudur. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Numunelerin üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Çimentonun fiziksel özellikleri		Çimentonun BD (Mpa)		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,11	2 Gün	7 Gün	28 Gün
Priz başlangıç süresi (dk)	160	29,2	40,3	48,1
Priz bitiş süresi (dk)	210			
Hacim Genleşmesi (mm)	1			
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3562			

Çizelge 3.2. Numunelerin üretiminde kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyon	%
SiO ₂	18,32
Al ₂ O ₃	4,51
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	63,75
MgO	1,6
SO ₃	3,17
Na ₂ O	0,37
K ₂ O	0,85
Kızdırma kaybı	4,43
Çözünmeyen kalıntı	0,88

3.1.2. Su

Beton numunelerin hazırlanmasında su Ankara Büyükşehir Belediyesinin şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresinin 24.02.2017 tarihinde Yenimahalle ilçesinden aldığı numunenin analiz sonuçları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Numunelerin dökülmesinde kullanılan suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametre	Analiz Sonuç
Bulanıklık NTU Birimi	0,2
Klor (mg/l)	0,5
İletkenlik (25 °C, ms/m)	22,7
Amonyum (mg/l)	<0,06
Nitrat (mg/l)	<0,006
Sülfat (mg/l)	24
Demir (µg/l)	<5
Aliminyum (µg/l)	18

3.1.3. Perlit

Beton numunelerde 0-4 mm agrega yerine ikame edilerek kullanılan perlit, Akper Perlit tarafından Çankırı yöresinden çıkarılan perlitin genleştirilmesiyle elde edilen GP’dır. GP, Akper perlitin üretimi olup, Ankara Ostim’de Keleş İnşaat’tan temin edilmiştir. GP’ye ilişkin fiziksel özellikler Çizelge 3.4’te, elek analizi Çizelge 3.5’te, kimyasal bileşim ise Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.4. Numunelerde kullanılan GP'nin fiziksel özellikleri

Malzeme cinsi	Genleştirilmiş perlit
Renk	Beyaz
Yoğunluk	55-65 kg/m ³
Maksimum nem	1%
Ph	6-8,5

Çizelge 3.5. Numunelerde kullanılan GP'nin elek analizi

Mm	%
+2.00	25-30
+1.00	30-35
+0,5	15-20
+0,21	15-20
-0,9	20-25

Çizelge 3.6. Numunelerde kullanılan GP'nin kimyasal bileşimi

SiO ₂	% 71-74
Al ₂ O ₃	% 12-14
K ₂ O	% 5-6
NA ₂ O	% 3-4
MgO	% 0,1-0,2
CaO	% 0,08-0,1
Fe ₂ O ₃	% 0,5-1
TiO ₂	% 0,09-0,012
Ateşleme kaybı	%3-4

3.1.4. Uçucu kül

Beton numunelerde Ankara Çayırhan Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan, TS EN 197-1 standartlarına uygun uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 3.7.'de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Numunelerde kullanılan UK'ün kimyasal analizi

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK	Klorür (CL-)
UK (%)	52,35	10,69	9,10	72,14	8,86	3,52	2,77	1,69	2,92	0,62	0,0083

Çizelge 3.8. Numunelerde kullanılan UK' ün fiziksel özellikleri

Litre Ağırlığı (kg/lt)	Yoğunluk (gr/cm ³)	İncelik 90 µ (%)	İncelik 45 µ (%)	Serbest Kireç (%)	28 Günlük Aktivite (%)
1,02	2,4	2,3	29,6	0,81	77,5

Çizelge 3.7. ve Çizelge 3.8.'e göre numunelerin üretiminde kullanılan UK, ASTM C 618 standardına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'den büyük olması nedeniyle F sınıfıdır (düşük kireçli). TS EN 197-1 standardına göre reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle V sınıfına girmektedir. UK, ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartlarındaki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'den büyük olması koşulunu sağlamaktadır. TS EN 450-2 standardında belirtilen serbest kireç miktarının en fazla %1 olması koşulunu da sağlamaktadır. Reaktif silis, kızdırma kaybı ve Cl miktarları yine TS EN 450-2 standardında belirtilen sınırlar arasında kalmaktadır. Dolayısıyla numunelerin üretiminde kullanılan UK, standartlarda belirtilen koşulları sağlamaktadır.

3.1.5. Agrega

Deney numunelerinin üretiminde (0-4) mm, (4-12) mm ve (12-22) mm boyutunda agregalar kullanılmıştır. Polatlı Hazır Beton Firmasında kullanılan en büyük tane çapı ($d_{\max}$) 22 mm olan agregalar, Polatlı-Yunak yolunda bulunan Meta Yol Yapım Taahhüt Tic. Ve San. Ltd. Şti.' ye ait Taş Ocağından alınmıştır. Agregaların görünür, kuru, doymun kuru yüzey tane yoğunlukları ile su emme oranları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

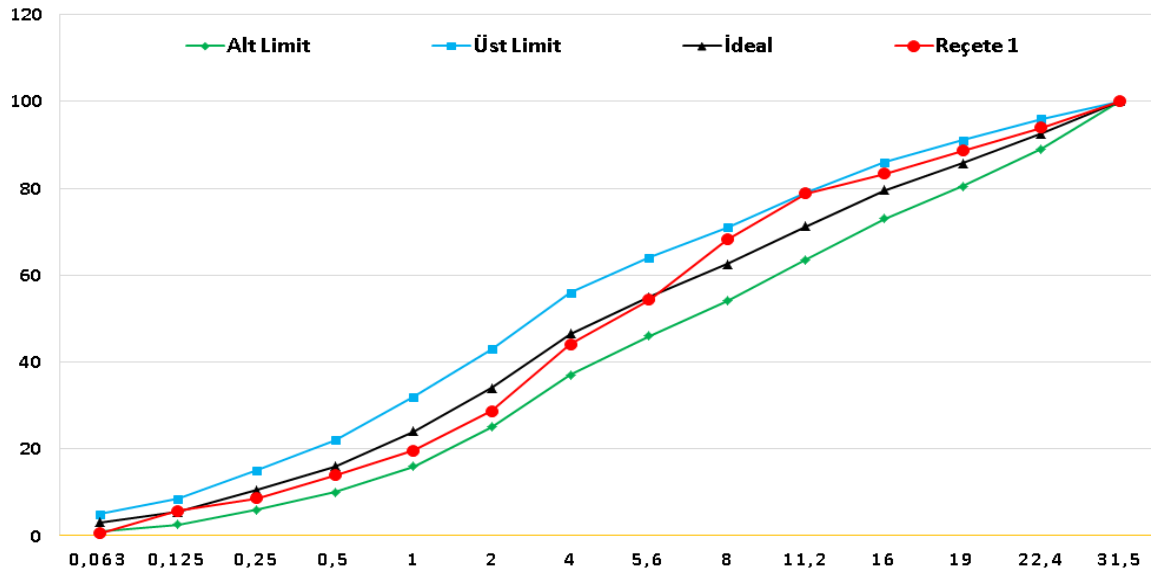
Çizelge 3.9. Numunelerde kullanılan agregaların tane yoğunluğu ve su emme değerleri

Agrega Değerleri	0/4 mm Kum	4/12 mm Kırmataş	12/22 mm Kırmataş
Görünür tane yoğunluğu	2,51 g/cm ³	2,66 g/cm ³	2,7 g/cm ³
Kuru tane yoğunluğu	2,49 g/cm ³	2,61 g/cm ³	2,68 g/cm ³
Doymun kuru yüzey tane yoğunluğu	2,50 g/cm ³	2,63 g/cm ³	2,68 g/cm ³
Su emme oranı	0,33%	0,39%	0,29%

Betonda karışımında kullanılan agregaların elek analizleri Çizelge 3.10.'da, granülometri eğrisi ise Şekil 3.1'de verilmiştir. Agregaların granülometri sonuçları TS 802'de verilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Çizelge 3.10. Numunelerde kullanılan agregaların elek analizi

Elek Çapı (mm)	Kümülatif Geçen (%)			Karışım Sonucu
	0-4 mm	4-12 mm	12-22 mm	
31,5	100	100	100	100
22,4	100	100	69,6	93,92
19	100	100	43,3	88,66
16	100	100	17	83,4
11,2	100	95,6	1,9	78,84
8	100	66	0,5	68,2
5,6	100	26,4	0,4	54,32
4	94,5	4,3	0,4	44,11
2	62,5	1,5	0,4	28,73
1	42,7	0,8	0,4	19,575
0,5	30,8	0	0	13,86
0,25	19,2	0	0	8,64
0,125	12,8	0	0	5,76
0,063	1,1	0	0	0,495
Karışım Yüzdeleri	45	35	20	100



Şekil 3.1. Karışımında kullanılan agregaların TS 802'de verilen alt ve üst sınırlara göre granülometrisi

3.1.6. Süper akışkanlaştırıcı katkı

Karışımında Mglenium Ace 450 süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı, polikarboksilik eter esaslı, betonun işlenebilirliği ve dayanım gelişim sürecinin en kısa sürede başlamasını sağlayacak biçimde optimize edilmiş, su ile reaksiyona giren çimento

yüzey alanını arttırarak hidrasyonu hızlandıran bir katkı malzemesidir. Süper akışkanlaştırıcı katkı, beton karışım suyuna çimento ağırlığının % 0,1'i kadar ilave edilmiştir. Katkı malzemesine ait teknik özellikler Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesine ait teknik özellikler

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi-sıvı
Özgül ağırlık 20 °C'de	1,069-1,109 kg/lt
pH değeri	5-7
Alkali içeriği (%)	<3
Klor iyon içeriği	<0,1
Korozyon davranışı	Sadece EN 934 -1: 2008 EK A1 standardına uygun bileşenleri içerir

3.2. Yöntemler

Toplam 288 adet 4 farklı s/ç oranında, 10x10x10 cm boyutlarında numune üretilmiş, bu numunelerin yarısı yani 144 tanesi toplam beton numunesi hacminin %20'si kadar GPA katkılıdır. GPA katkılı numunelerden, eklenen GPA kütlesi kadar ince agrega çıkartılmıştır. GPA'lı ve GPA'sız 144'er tane numunenin yarısına fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi, diğer yarısına ise özel olarak tasarlanmış düzenek yardımıyla yangın etkisi verilmiştir. Dört farklı s/ç oranı ile üretilen numunelerin BD'ları C16/20, C20/25, C30/37 ve C40/50'ye denk gelecek şekilde tasarlanmıştır.

Numunelerin isimlendirilmesinde bazı kısaltmalar kullanılmıştır. Örneğin; P16F; GPA'lı, C16 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu, N20Y; GPA'sız (normal), C20 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış numune grubudur. Bu numune grupları 22 °C-100 °C- 200 °C- 300 °C- 400 °C- 500 °C olmak üzere 6'şar adet sıcaklık değerine maruz bırakılmışlardır.

288 adet numunenin gruplandırılması, her numune grubunda kaç adet numune bulunduğu, numune gruplarının isimlendirilmesi ve bu isimlendirilmelerin ne anlama geldiği Çizelge 3.12.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.12. Üretilen numune gruplarının açıklaması ve adedi

Numune grubunun kısaltması	Kısaltmanın açıklaması	Numune grubundan kaç adet üretildiği
N16F	GPA'sız C16 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N20F	GPA'sız C20 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N30F	GPA'sız C30 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N40F	GPA'sız C40 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N16Y	GPA'sız C16 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N20Y	GPA'sız C20 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N30Y	GPA'sız C30 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
N40Y	GPA'sız C40 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P16F	GPA'lı C16 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P20F	GPA'lı C20 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P30F	GPA'lı C30 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P40F	GPA'lı C40 BD'nda, fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P16Y	GPA'lı C16 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P20Y	GPA'lı C20 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P30Y	GPA'lı C30 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
P40Y	GPA'lı C40 BD'nda, yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numune grubu	18 adet
	Toplam	288 adet

Her 16 numune grubundan 18'er adet numune üretilmiştir. Her numune grubu, 22 °C-100 °C- 200 °C- 300 °C- 400 °C- 500 °C olmak üzere 6'şar adet sıcaklık değerine maruz bırakılmışlardır. Bu da demek oluyor ki 16 numune grubunun her birinin her sıcaklık değerinde 3'er adet numune bulunmaktadır. Her sıcaklık grubundaki numunelere uygulanan deneylerin sonuçları üç numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur.

Tezde NF olarak bahsedilen numuneler N16F, N20F, N30F ve N40F numune gruplarını kapsamakla beraber, normal (GPA'sız) ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiş numuneler anlamına gelmektedir. Her bir numune grubundan 18 adet numune üretildiğine göre NF, NY, PF, PY numune gruplarından 72'şer adet ($4 \times 18 = 72$) numune üretilmiştir. NF, NY, PF, PY numune gruplarının hangi numuneleri kapsadığı Çizelge 3.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.13. NF, NY, PF, PY numune grupları

Kısaltma	Açıklaması	Kapsadığı numune grubu	Adet
PF	GPA'lı ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık verilmiş numuneler	P16F, P20F, P30F, P40F	$4 \times 18 = 72$
PY	GPA'lı ve yangın yardımıyla yüksek sıcaklık verilmiş numuneler	P16Y, P20Y, P30Y, P40Y	$4 \times 18 = 72$
NF	GPA'sız ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık verilmiş numuneler	N16F, N20F, N30F, N40F	$4 \times 18 = 72$
NY	GPA'sız ve yangın yardımıyla yüksek sıcaklık verilmiş numuneler	N16Y, N20Y, N30Y, N40Y	$4 \times 18 = 72$
Toplam			288

3.2.1. Numunelerin üretimi

Numunelerin üretimi ve deneylerin yapılması, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Beton Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

GPA katkısız normal numuneler, 4 farklı s/ç oranına göre üretilmiştir. Numunelerin her biri 1 dm^3 'lük metal kalıplarda üretilmiş olup $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ boyutlarında küp şeklindedir. S/ç oranlarına göre hesaplanan karışım oranları TS 802 standardına göre tasarlanmıştır. Her bir s/ç oranındaki gruplar üretilmeden önce denemeler yapılmış, karışımın TS 802'de belirtilen çökme miktarlarını ve hedeflenen basınç dayanımlarını karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir.



Resim 3.1. Numune gruplarının dökülmeden önce slump deneylerinin yapılması

Dört farklı s/ç oranında üretilen GPA'sız numunelerin 1 m³'ünde bulunan malzeme miktarlarının kg cinsinden değerleri Çizelge 3.13.'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. GPA' sız numunelerin s/ç gruplarının 1 m³'ünde bulunan malzeme miktarları (kg)

S/Ç oranları	Malzeme miktarları (m ³ /kg)			
	C16/20 S/Ç= 0,75	C20/25 S/Ç=0,69	C30/37 S/Ç=0,61	C40/50 S/Ç=0,52
Çimento	246,67	268,12	303,28	355,77
Su	185,00	185,00	185,00	185,00
UK	24,67	26,81	30,33	35,58
0-4	871,80	863,40	849,62	829,07
4-12	680,58	674,03	663,28	647,23
12-22	390,35	386,58	380,42	371,21
Akışkanlaştırıcı katkı	0,25	0,27	0,30	0,36

GPA katkılı üretilen numunelerin s/ç oranları ile GPA katkısız beton numunelerin s/ç oranları aynıdır. Tek fark GPA'lı numunelerde, numune hacminin %20'si kadar GPA'nın kütlesi kadar 0-4 mm ince agreganın beton karışımından eksiltilmesidir.

GPA'lı numunelerin karışım tasarımı yapılırken, numunelerin hacimce maksimum oranda GPA alması hedeflenmiştir. GPA miktarının numune hacminin %20' si kadar olması, yapılan birçok deneme sonucunda ulaşılan bir noktadır. TS 802' de izin verilen Slump çökme miktarları sınırları arasında kalınarak ve hedeflenen BD sınıfına mümkün olduğunca yakın kalınarak, GPA' lı numunelere numune hacminin %20'si kadar GPA ilave edilmiştir.

GPA'lı numunelerin 1 m³'ünde bulunan malzeme miktarlarının kg cinsinden değerleri Çizelge 3.14'de verilmiştir.

Çizelge 3.15. GPA'lı numunelerin s/ç gruplarının 1 m³'ünde bulunan malzeme miktarları (kg)

S/Ç oranları	Malzeme miktarları (m ³ /kg)			
	C16/20 S/Ç= 0,75	C20/25 S/Ç=0,69	C30/37 S/Ç=0,61	C40/50 S/Ç=0,52
Çimento	246,67	268,12	303,28	355,77
Su	185,00	185,00	185,00	185,00
UK	24,67	26,81	30,33	35,58
0-4	853,80	845,40	831,62	811,07
4-12	680,58	674,03	663,28	647,23
12-22	390,35	386,58	380,42	371,21
Akışkanlaştırıcı katkı	0,25	0,27	0,30	0,36
GPA	12	12	12	12

Numunelerin karışım oranları tasarlandıktan sonra döküm işlemine başlanmıştır. Numuneler metal kalıplara dökülmeden önce metal kalıplar açılarak temizlenip yağlanmıştır. Agregalar, çimento, uçucu kül ve GPA (GPA'lı numuneler için) mikserde konulduktan sonra karıştırılmıştır. Bu arada beton suyuna akışkanlaştırıcı katkı maddesi önceden konularak ve karıştırılarak suyun içinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Mikserdeki malzeme karışırken katkı maddeli su azar azar karışıma dökülmüş, betonun homojen olmasının sağlanması için mikser yeterince çalıştırılmıştır. Mikserdeki beton, metal kalıplara üç aşamada doldurulmuş, her aşamada metal kalıptaki beton standartlara uygun şekilde şişlenerek betonun yerleşmesi sağlanmıştır. Resim 3.2.'de betonun mikserde karışmış hali, Resim 3.3.'de mikserdeki betonun kalıplara yerleştirilmesi, Resim 3.4.'de numunelerin metal kalıplara yerleşmiş hali görülmektedir.



Resim 3.2. Beton karışımının mikserde karışmış hali



Resim 3.3. Mikserdeki betonun metal kalıplara yerleştirilmesi



Resim 3.4. Betonun kalıplara yerleştirilmiş hali

Kalıplardaki betonun sökölmesi için en az 24 saat beklenmiş, ve numuneler kalıplardan sökölüp kür havuzuna konularak 28 gün bekletilmiştir. Resim 3.5'te numunelerin kür havuzunda beklemesi, Resim 3.6'da ise bazı numunelerin 28 gün sonra kür havuzundan çıkmış hali görölmektedir.



Resim 3.5. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi



Resim 3.6. 28 günde bazı numunelerin kür havuzundan çıkarılmaları

3.2.2. Numunelere yüksek sıcaklık etkisinin verilmesi

Literatürde çeşitli kimyasal ve mineral katkılarla üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenirken yüksek sıcaklık etkisi fırınlar yardımıyla verilmiştir. Bu

çalışmada GPA ile üretilen beton numunelerin fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan fiziksel ve mekanik değişiklikler araştırılmıştır.

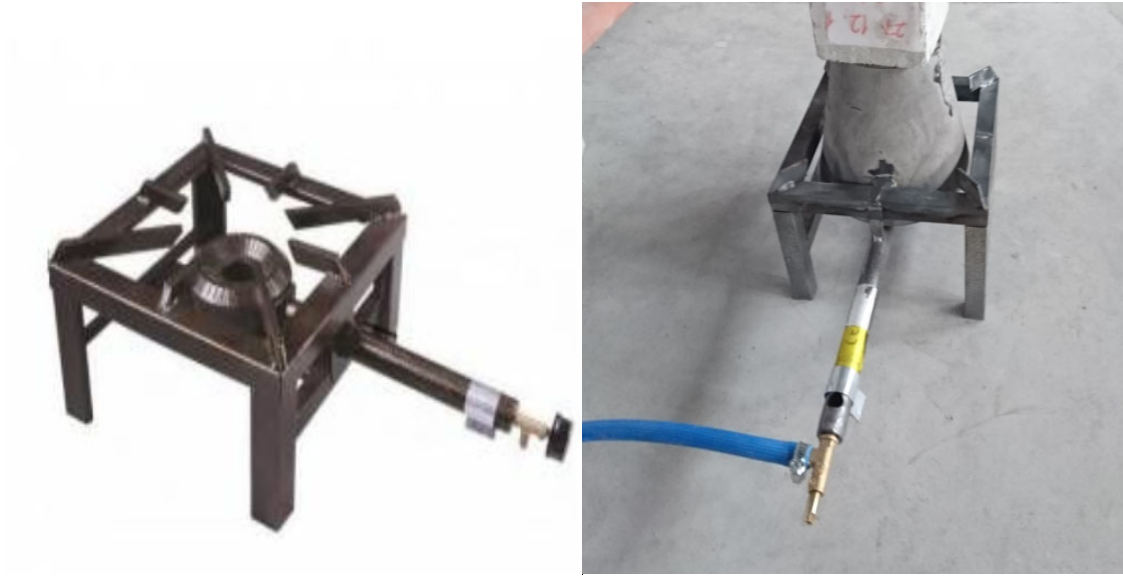
Yangın yardımıyla verilecek olan yüksek sıcaklık etkisi gerçek yangın koşullarına mümkün olduğunca benzeyebilmesi için sadece beton numunenin bir yüzeyine verilmiştir. Yangın etkisinin verilir verilemeyeceği araştırılırken, öncelikle yangın düzeneği üzerinde durulmuş ve tüpe bağlanan küçük endüstriyel ocakların verdiği ısı miktarının beton numunelerin sıcaklığını 500 °C'ye çıkarabileceği düşünülmüştür.

Yüksek sıcaklık etkisi tadilat görmemiş ocak yardımıyla verilirken betonun sıcaklığındaki değişimin nasıl ölçüleceği üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Sac koni büktürölüp ocağa kaynatılmadan önce slump konisi yardımıyla ocağın verdiği ısı toplanarak numuneye verilmeye çalışılmıştır. Önce beton delinerek ortasına yüksek sıcaklıkları ölçebilen termometre konulmuş ve beton yakıldıkça sıcaklığındaki değişim gözlemlenmiştir. Fakat beton numune ne kadar ısıtılırsa ısıtılsın termometrenin ibresinin ısı kaybından dolayı 200 °C'den sonra artmadığı gözlemlenmiştir. Termometrenin 200 °C'den yukarı çıkmamasının sebeplerinden birinin termometrenin mekanik yaylı çalışma prensibi olduğu düşünülmüştür. Diğer sebebin ise ve slump konisi ile ocak alevinin arasındaki mesafeden kaynaklanan ısı kaybının olduğu tahmin edilmektedir. Tadilat görmemiş endüstriyel ocak ve termometre yardımıyla yapılan sıcaklık ölçümü Resim 3.7'de gösterilmektedir.



Resim 3.7. Betonun sıcaklığını ölçme denemesi

Tüpe bağlanan küçük endüstriyel ocağın numunelere verdiği ısı enerjisinde kayıp olmaması için ocakta çeşitli tadilatlar yapılmıştır. Öncelikle ocağın ortasındaki demirler kesilmiştir. 3 mm kalınlığındaki metal sac CNC tezgahında koni şeklinde bükülerek kaynatılmıştır. Daha sonra sac koni, ortası kesilen ocağa kaynatılmıştır. Böylece endüstriyel ocak yardımıyla numuneye verilen ısı kaybının mümkün olduğunca önleneceği düşünülmüştür. Ocağın tadilat yapılmadan önceki ve sonraki hali Resim 3.8’de gösterilmiştir.



Resim 3.8. Yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklığın uygulandığı deney cihazı

Küçük endüstriyel tip ocağın tadilat edilmesiyle, ocakta meydana geldiği düşünülen ısı kaybı sorununun en az seviyeye indirildiği düşünülmüştür. Diğer sorun ise numunenin sıcaklığının termometre ile ölçülememesiydi. Bu sorunu aşmak için, beton numune ısınırken sıcaklık değişimini gözlemek amacıyla beton numune 1-2-3 cm' lik dilimler halinde kesilmiş ve ocakta yakılarak termal kamera yardımıyla beton dilimlere bakılmıştır. Betonarme elemanlarda pas payının genel olarak 3 cm içerde olmasından dolayı, 3 cm'lik perlitli ve perlitsiz beton numune dilimleri ocakta yakıldığı sırada kronometre tutulmuş, bir yandan da termal kamera yardımıyla beton dilimlerdeki sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Ocağa gelen gaz miktarı ve dolayısıyla beton dilime verilecek olan ısı enerjisinin her numunede aynı olmasını sağlamak amacıyla ocak vanası hep aynı seviyeye kadar açılmıştır. Vananın açılma seviyesi belirlenirken ocaktan verilen alevlerin beton numuneyi ve ocağa kaynatılan koni şeklindeki metal sacı aşmamasına dikkat edilmiştir. 3 cm'lik GPA'lı ve GPA'sız beton numune dilimleri baz alınarak, beton dilimin 100-200-300-400-500 °C değerlerine ulaşma süreleri kronometre yardımıyla tespit edilmiş olup bu süreler Çizelge 3.15'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.16. Beton numunelerin istenilen sıcaklık değerlerine ulaşma süreleri

	GPA'sız 3 Ccmlık dilim	GPA'lı 3 cm'lik dilim
100 °C	3 dk	4dk
200 °C	7 dk	8 dk
300 °C	10 dk	12 dk
400 °C	13 dk	15 dk
500 °C	15 dk	20 dk

3.2.3. Birim hacim ağırlık (BHA) deneyinin yapılması

GPA' lı ve GPA'sız beton numuneleri metal kalıplardan çıkarıldıktan sonra oluşabilecek deformasyonlara karşı her birinin kumpas yardımıyla en-boy-yükseklikleri ayrıntılı bir şekilde ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır. Daha sonra fırın ve yangın ile yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan öncesinde ve sonrasında ağırlıkları ölçülmüştür. Böylece TS EN 12390-7 standardına uygun olarak numunelerin BHA'ları ölçülerek, GPA' lı ve GPA'sız numunelerin fırın ve yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA'larındaki değişimler gözlemlenmiştir. BHA' larındaki değişim hesaplanırken numunelerin doğal BHA'ları baz alınmıştır. Doğal BHA, numunelerin kür havuzundan çıktıktan sonra kendi kendilerine kurumalarıyla elde edilen BHA'dır.

3.2.4. Hacimce su emme (HSE) deneyinin yapılması

Kür havuzundan 28 gün sonra çıkartılan numunelerin dışı bez yardımıyla kurutularak ağırlıkları ölçülmüş ve doymun kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir. Fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisinden sonra numunelerin ağırlıkları tespit edilmiştir. Eşitlik 3.1. kullanılarak numunelerin her birinin (fırın veya yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış) HSE oranları tespit edilmiştir.

$$w = (M_1 - M_2)/M_2$$

$$M_1 = \text{numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı, (gr)} \quad (3.1.)$$

$$M_2 = \text{numunenin yüksek sıcaklık etkisinden sonraki ağırlığı, (gr)}$$

3.2.5. Kapiler su emme (KSE) deneyinin yapılması

KSE deneyi, 28 gün sonra havuzdan çıkarılan ve yüksek sıcaklık etkisine (fırın veya yangın) maruz bırakılan numunelere uygulanmıştır.

KSE deneyi, 10*10*10 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Kapilarite deneyi yapılmadan önce numuneler etüvde 24 saat boyunca 100 °C’de bekletilmiştir. Numunenin su emeceği yüzeyden 5 mm kadar üst tarafı çizilerek silikonlanmıştır. Böylece numune sadece bir yüzeyden su emecektir. Su emecek yüzey belli yükseklikteki çivilerin çakılmış olduğu tahta üzerine oturtularak kabın içine yavaşça su doldurulmuş, su seviyesinin silikonun alt yüzeyini geçmemesine özen gösterilmiştir. Kap su doldurulmadan önce betonun ilk ağırlığı ölçülmüştür. Daha sonra 15-30-60-90-120 ve 150. dakikalarda numunenin suyu gördüğü yüzey bez yardımıyla silinerek numunenin ağırlığı ölçülmüştür. Eşitlik 3.2.’de de görüldüğü gibi $q^2=k.t$ ve $q^2=(Q/A)^2$ bağıntıları yardımıyla ‘k’ kılcallık katsayıları hesaplanmıştır. Resim 3.9’da kapilerite deneyinin yapılması gösterilmiştir.

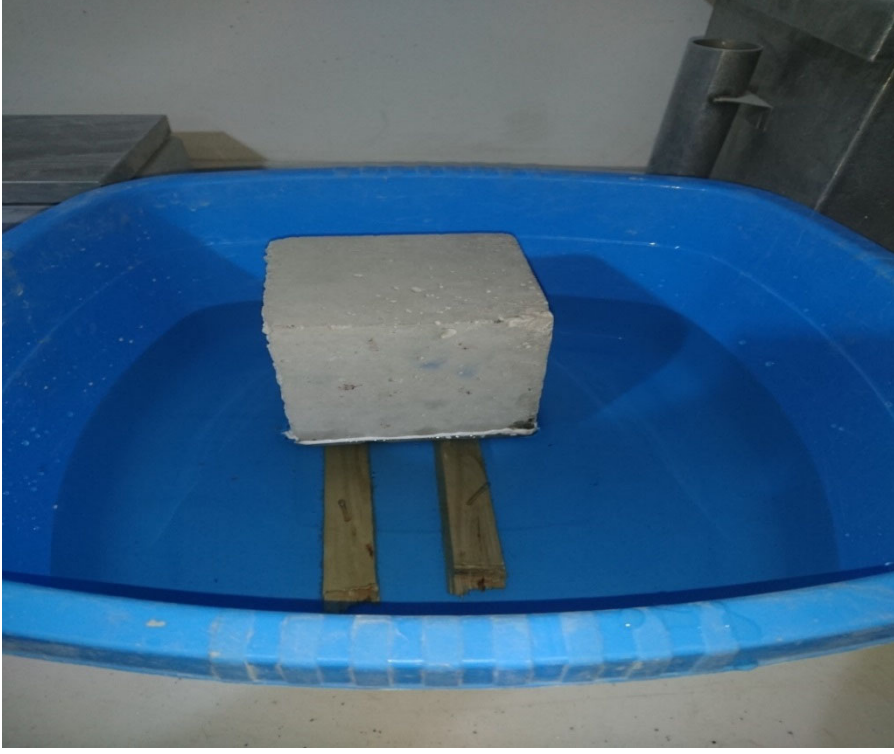
$$q^2=kxt, q^2=(Q/A)^2,$$

$$k=(Q/A)^2/t$$

Q= Numunenin KSE deneyinde her bir ‘t’ sn süresince emdiği su miktarı (gr)

A= Numuneye KSE deneyinin uygulandığı yüzey alanı (cm²) (3.2)

t= KSE deneyinin uygulandığı her bir periyodun süresi (sn)



Resim 3.9. Kapilerite deneyinin yapılması

GPA'lı ve GPA'sız numunelerin 150. dakikadaki KSE değerlerinin fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimleri incelenmiştir.

3.2.6. Aşınma dayanımı (AD) deneyinin yapılması

AD deneyi, 28 gün sonra havuzdan çıkarılan ve yüksek sıcaklık etkisine (fırın veya yangın) maruz bırakılan numunelere, ASTM C 944-99 standartlarında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Resim 3.10.'da görüldüğü gibi numuneler 200 N'luk kuvvet oluşacak şekilde ağırlık altında 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcılara maruz bırakılmışlardır. Aşındırma işlemi 10x10x10 cm' lik numunelerin 3 yüzeyine 2'şer dakika olmak üzere uygulanmıştır. Üçer dakikalık her periyotta oluşan ağırlık kayıpları % cinsinden ayrı ayrı hesaplanmış ve bu kayıpların ortalamaları alınmıştır. Perlitli ve perlitsiz numunelerin AD değerlerinin fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimler incelenmiştir.



Resim 3.90. Aşınma deneyinin yapılması

3.2.7. Ultra geçiş hızı (UGH) deneyinin yapılması

UGH deneyi, 28 gün sonra havuzdan çıkarılan ve yüksek sıcaklık etkisine (fırın veya yangın) maruz bırakılan numunelere, TS EN 12504-4 ve ASTM C 597 standartlarında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. UGH deneylerinde numune boyutları küçük olduğu için direkt uygulama yöntemi tercih edilmiştir.

Küp şeklinde ve 10x10x10 cm boyutlarındaki numuneler, Resim 3.11’de gösterildiği gibi ebat boyundan dolayı yalnızca direk ultrasonik hız ölçümüne tabi tutulmuştur.

UGH deneyi cihazı 0,1 μ s duyarlılıkta ve 0,1 μ s – 9999,9 μ s arasında ölçüm yapabilmektedir. Kullanılan UGH cihazında alıcı ve verici başlıklarının çapı 50 mm olup, frekansı 54 kHz dir. UGH eşitlik 3.3’teki bağıntıya göre hesaplanmıştır.

$$V = L/t \text{ (km/sn)}$$

$$L = \text{Numune boyu (km)}$$

$$T = L \text{ boyunca UGH süresi (sn)}$$

(3.3)



Resim 3.101. UGH deneyinin yapılması

GPA katkılı ve katkısız numunelerin UGH değerlerinin fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimler incelenmiştir.

3.2.8. Basınç dayanımı (BD) deneyinin yapılması

BD deneyi, 28 gün sonra havuzdan çıkarılan ve yüksek sıcaklık etkisine (fırın veya yangın) maruz bırakılan numunelere TS EN 12390-3 standardında belirtilen usullere uygun olarak uygulanmıştır.

28 günlük numunelerin BD belirlenirken, 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital ekran vasıtasıyla istenilen numune boyutları ve yükleme hızı verilerinin seçilebildiği, Ele marka beton basınç test cihazı kullanılmıştır. Numune BD test cihazına yerleştirildikten sonra yükleme hızı 2,4 kN/s olarak ayarlanmış ve daha sonra cihaz çalıştırılarak BD deneyi tamamlanmış ve ekranda numunenin kırılmadan hemen önceki BD değeri 3.4. eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$f_c = F/A_c \quad (3.4)$$

f_c = deney numunesinin BD (Mpa)

F = kırılma anındaki yük (N)

A_c = numunenin kesit alanı (mm²)

GPA'lı ve GPA'sız numunelerin BD değerlerinin fırın ve yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimleri incelenmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. BHA Deneyi Bulguları

Yapılan BHA deneylerinde yüksek sıcaklık etkisi fırın ve yangın ile verilmiştir (F-Y). Yangın ve Fırın numune grupları ise kendi aralarında GPA'lı ve GPA'sız olarak iki grupta incelenmiştir (NF-PF, NY-PY).

Katkı türü faktörünün (KF) iki seviyesi (GPA'lı ve GPA'sız), beton sınıfı faktörünün (BSF) dört seviyesi (C16, C20, C30 ve C40), uygulanan sıcaklık değeri faktörünün (SDF) beş seviyesi (22 °C-referans, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C) ve sıcaklık türü faktörünün (STF) iki seviyesi (yangın ve fırın) üzerinde gerçekleştirilen tekrarlanan ölçümlü varyans analizi sonuçları ise Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de gösterilen BHA kaybı değerlerine ait varyans çözümleme tablosuna göre STF*BSF*SDF interaksiyonunun BHA kaybı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\alpha < 0.05$).

Çizelge 4.1. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı değerlerinin varyans çözümlemesi

	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-testi (F)	Anlamlılık düzeyi (p) $\alpha < 0,05$
Intercept	1	2156,241	2156,241	36096,462	0,000000
STF	3	309,321	103,107	1726,060	0,000000
BSF	3	1,381	0,460	7,708	0,000069
SDF	5	249,602	49,920	835,690	0,000000
STF*BSF	9	8,393	0,933	15,611	0,000000
STF*SDF	15	210,467	14,031	234,887	0,000000
BSF*SDF	15	8,922	0,595	9,958	0,000000
STF*BSF*SDF	45	13,475	0,299	5,013	0,000000
Error	192	11,469	0,060		
Total	287	813,031			

Aynı BD sınıfına sahip numunelerin BHA'ları değişkenlik gösterebilmektedir. Bunun sebebi olarak, numunelerin üretiminde 12-22 mm kaba agrega kullanılması, numune boyutlarının küçük olması, yer yer betonun kalıba doldurulurken tam olarak homojen doldurulamaması olarak gösterilebilir.

4.1.1. Fırın numunelerinin BHA deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) verileri ve istatistiksel olarak standart hata değerleri Çizelge 4.2’de ve Çizelge 4.3’te verilmiştir.

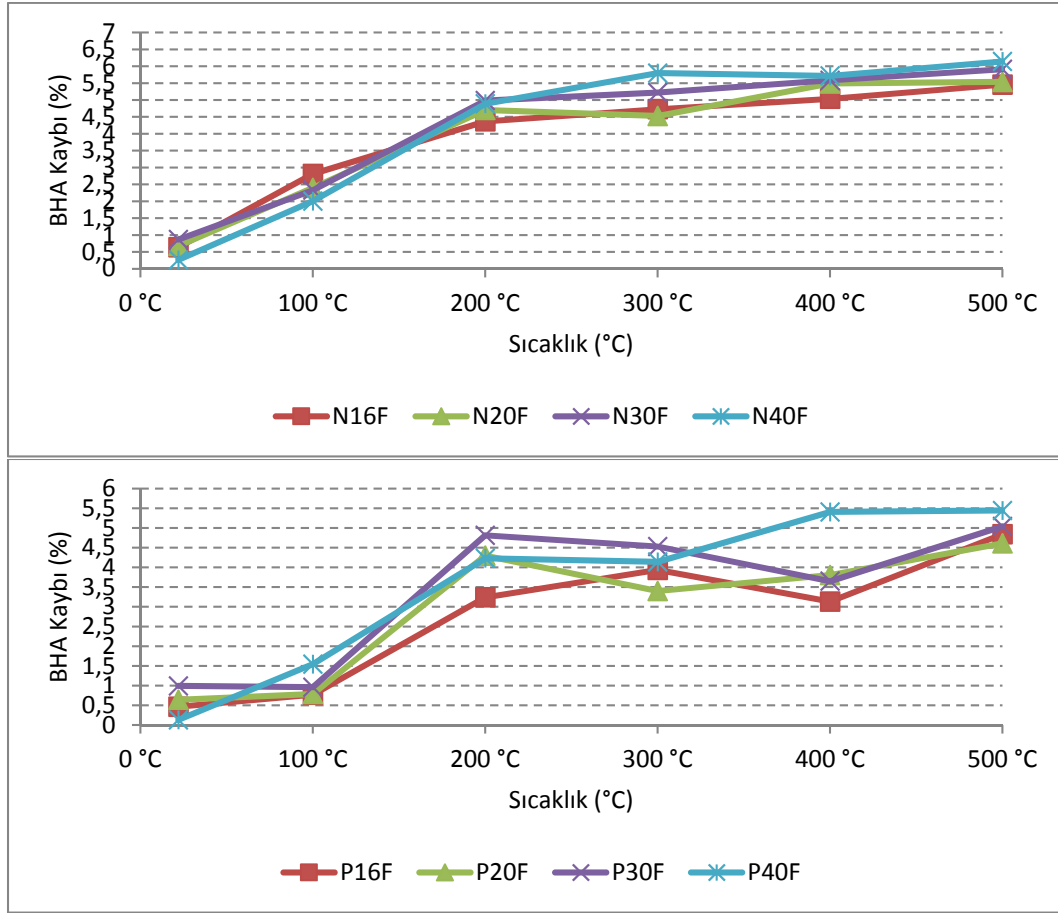
Çizelge 4.2. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri

	N16F Ort. kayıp (%)	N16F Standart hata	N20F Ort. kayıp (%)	N20F Standart hata	N30F Ort. kayıp (%)	N30F Standart hata	N40F Ort. kayıp (%)	N40F Standart hata
22 °C	0,640	0,014	0,678	0,006	0,870	0,010	0,267	0,011
100 °C	2,810	0,063	2,400	0,164	2,330	0,024	2,005	0,032
200 °C	4,369	0,064	4,706	0,015	4,985	0,168	4,890	0,054
300 °C	4,728	0,072	4,528	0,022	5,220	0,256	5,799	0,019
400 °C	5,036	0,017	5,489	0,096	5,585	0,146	5,715	0,032
500 °C	5,456	0,232	5,537	0,195	5,910	0,034	6,144	0,015

Çizelge 4.3. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri

	P16F Ort. kayıp (%)	P16F Standart hata	P20F Ort. kayıp (%)	P20F Standart hata	P30F Ort. kayıp (%)	P30F Standart hata	P40F Ort. kayıp (%)	P40F Standart hata
22 °C	0,464	0,187	0,640	0,126	0,992	0,106	0,131	0,051
100 °C	0,768	0,183	0,787	0,033	0,960	0,386	1,544	0,122
200 °C	3,241	0,078	4,300	0,081	4,815	0,054	4,231	0,122
300 °C	3,936	0,089	3,401	0,086	4,531	0,318	4,140	0,044
400 °C	3,134	0,158	3,808	0,023	3,651	0,068	5,409	0,015
500 °C	4,843	0,005	4,612	0,225	5,043	0,059	5,444	0,033

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%)

NF numunelerinde sıcaklığın artmasıyla 4 grupta da BHA kayıplarının arttığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere, NF numunelerindeki en büyük kayıp % 6,14 ile N40F grubunda 500 °C’de gerçekleşmiştir. En düşük kayıp ise % 0,267 ile yine N40F grubunda 22 °C’de gerçekleşmiştir. 100-200 °C arasında bütün numune gruplarında BHA kaybı en büyük artışı göstermiştir. 200-500 °C sıcaklıkları arasında ise BHA kaybı artış hızı hemen hemen birbirine yakın olarak 100-200 °C arasındakinden düşük gözlemlenmiştir. NF numune gruplarının BD sınıfları ile BHA kayıplarındaki değişim arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir.

PF numunelerinde Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1’de görüldüğü üzere yüksek sıcaklık etkisiyle PF numunelerinde oluşan BHA kaybı yer yer azalsa da genel itibarıyla sıcaklık arttıkça artmaktadır. En düşük BHA kaybı % 0,131 ile 22 °C’de P40F numunesinde gerçekleşmiş olup, en yüksek BHA kaybı ise % 5,44 ile P4F numunesinde gerçekleşmiştir. PF numune

gruplarının BD sınıfları ile BHA kayıplarındaki değişim arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir.

4.1.2. Yangın numunelerinin BHA deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) verileri ve istatistiksel olarak standart hata değerleri Çizelge 4.4'te ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

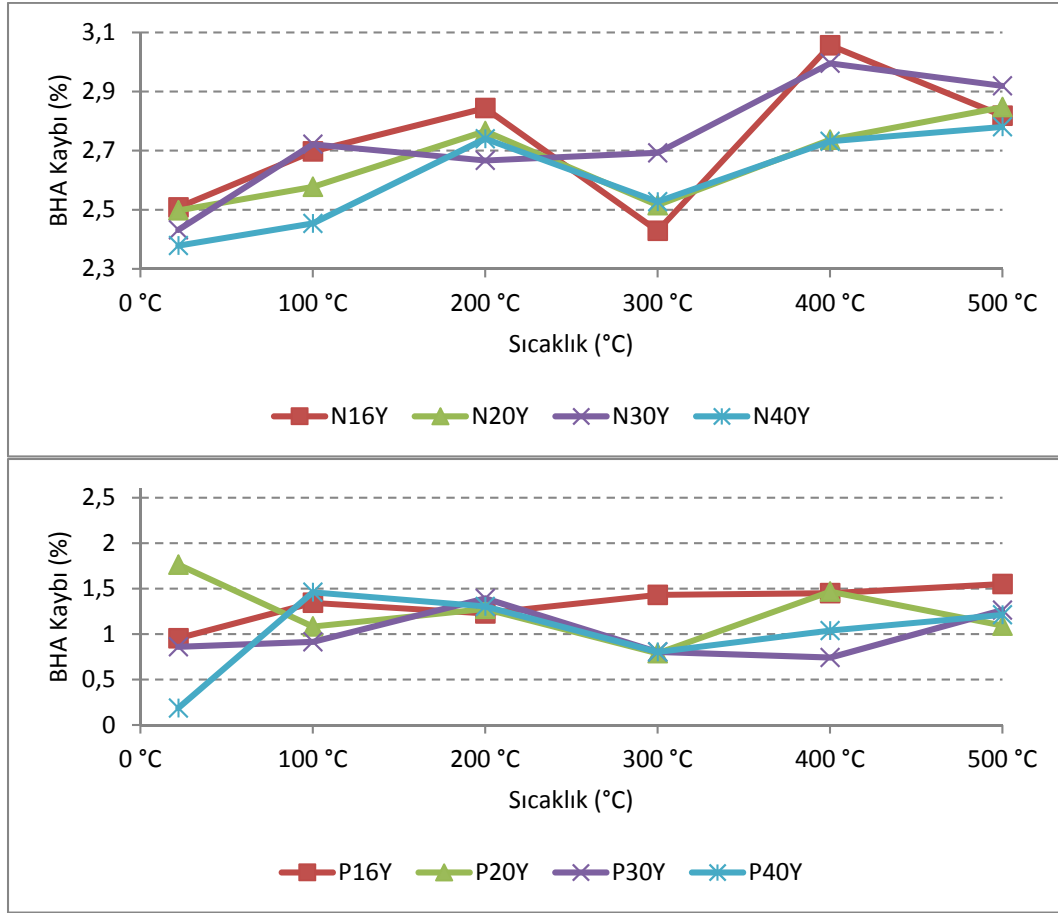
Çizelge 4.4. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri

	N16Y Ort. kayıp (%)	N16Y Standart hata	N20Y Ort. kayıp (%)	N20Y Standart hata	N30Y Ort. kayıp (%)	N30Y Standart hata	N40Y Ort. kayıp (%)	N40Y Standart hata
22 °C	2,508	0,032	2,498	0,094	2,432	0,200	2,379	0,027
100 °C	2,698	0,031	2,578	0,013	2,722	0,016	2,454	0,086
200 °C	2,844	0,104	2,766	0,038	2,667	0,017	2,740	0,014
300 °C	2,429	0,036	2,516	0,015	2,693	0,035	2,528	0,021
400 °C	3,056	0,029	2,737	0,085	2,996	0,056	2,732	0,042
500 °C	2,818	0,001	2,847	0,025	2,919	0,073	2,781	0,140

Çizelge 4.5. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%) değerleri

	P16Y Ort. kayıp (%)	P16Y Standart hata	P20Y Ort. kayıp (%)	P20Y Standart hata	P30Y Ort. kayıp (%)	P30Y Standart hata	P40Y Ort. kayıp (%)	P40Y Standart hata
22 °C	0,954	0,109	1,764	0,675	0,860	0,085	0,187	0,073
100 °C	1,344	0,059	1,084	0,141	0,915	0,182	1,460	0,033
200 °C	1,227	0,047	1,277	0,122	1,393	0,002	1,305	0,142
300 °C	1,431	0,364	0,790	0,273	0,804	0,025	0,804	0,072
400 °C	1,450	0,137	1,467	0,007	0,742	0,116	1,039	0,154
500 °C	1,550	0,232	1,094	0,168	1,264	0,247	1,212	0,223

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kaybı (%)

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.2’de görüldüğü üzere yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisiyle NY numunelerinde oluşan BHA kaybının bazı sıcaklık aralıklarında arttığı bazı sıcaklık aralıklarında ise azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük BHA kaybı % 2,379 ile 22 °C’de N40Y numunesinde gerçekleşmiş olup, en yüksek BHA kaybı ise % 3,06 ile 400 °C’de N16Y numunesinde gerçekleşmiştir. NY numune gruplarının BD sınıfları ile BHA kayıplarındaki değişim arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. NY numunelerinin BHA’larındaki kayıplar % 2,379-% 3,06 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.2’de görüldüğü üzere yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisiyle PY numunelerinde oluşan BHA kaybının bazı sıcaklık aralıklarında arttığı bazı sıcaklık aralıklarında ise azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük BHA kaybı % 0,187 ile 22 °C’de P40Y numunesinde gerçekleşmiş olup, en yüksek BHA kaybı ise % 1,55 ile P16Y numunesinde 500 °C’de gerçekleşmiştir. PY numune gruplarının BD sınıfları ile BHA kayıplarındaki

değişim arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. PY numunelerinin BHA'larındaki kayıplar % 0,187-% 1,55 arasında değişmektedir.

BHA deneyi bulgularının değerlendirilmesi

Genel itibariyle numune gruplarında fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kayıpları ile BD'ları arasında bir bağlantı gözlemlenememiştir. Bu sebeple fırın numune gruplarının BHA kayıpları kendi içlerinde kıyaslanırken, 500 °C'deki tüm BD sınıflarının ortalamalarının alınabileceği düşünülmüştür. NF ve PF numune gruplarının 500 °C'deki BHA kayıplarının ortalaması aşağıdaki gibi alınmıştır;

$$(N16F+N20F+N30F+N40F)/4=(5,46+5,54+5,91+6,14)/4= \%5,76$$

$$(P16F+P20F+P30F+P40F)/4=(4,48+4,61+5,04+5,44)/4= \%4,99$$

Görüldüğü gibi 500 °C'deki GPA'sız fırın numunelerinin ortalama BHA kaybı %5,76 olarak bulunurken, GPA'lı fırın numunelerinin ise %4,99 olarak bulunmuştur. Fırın numunelerinde GPA'sız numunelerin BHA kayıpları GPA'lı numunelerin BHA kayıplarından daha fazla çıktığı görülmektedir. Buradan, GPA'nın beton numunelerde katkı olarak kullanıldığında, fırın ile verilen yüksek sıcaklığa karşı BHA kaybını düşürdüğü sonucuna varılabilmektedir.

Genel itibariyle numune gruplarına yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kayıpları ile BD sınıfları arasında bir ilişki gözlemlenememiştir. Bu sebeple yangın numune gruplarının BHA kayıpları kendi içlerinde kıyaslanırken, 500 °C'deki NY ile PY numunelerinin tüm BD sınıflarındaki BHA kayıplarının ortalamalarının alınabileceği düşünülmüştür. NY ve PY numune gruplarının 500 °C'deki BHA kayıplarının ortalaması aşağıdaki gibi alınmıştır;

$$(N16Y+N20Y+N30Y+N40Y)/4=(2,82+2,85+2,92+2,78)/4=\%2,84$$

$$(P16Y+P20Y+P30Y+P40Y)/4=(1,55+1,09+1,26+1,21)/4= \%1,28$$

Görüldüğü gibi GPA'sız yangın numunelerinin ortalama BHA kaybı %2,84 olarak bulunurken, GPA'lı yangın numunelerinin ortalama BHA kaybı %1,28 olarak bulunmuştur. Yangın numunelerinin ikisinde de GPA'sız numunelerin BHA kayıpları GPA'lı numunelerin BHA kayıplarından daha fazla çıkmıştır. Buradan, GPA'nın beton

numunelerde katkı olarak kullanıldığında, yangın etkisindeki yüksek sıcaklığa karşı BHA kaybını düşürdüğü sonucuna varılabilmektedir.

4.2. HSE Deneyi Bulguları

Numuneler havuzdan çıkarıldıktan sonra doygun BHA'ları ölçülerek, fırınla veya yangınla verilen yüksek sıcaklık etkisinden sonraki BHA'ları ölçülmüş, her bir numunenin yüksek sıcaklık etkisiyle HSE oranlarındaki değişimler gözlemlenmiştir.

Katkı türü faktörünün (KF) iki seviyesi (GPA'lı ve GPA'sız), beton sınıfı faktörünün (BSF) dört seviyesi (C16, C20, C30 ve C40), uygulanan sıcaklık değeri faktörünün (SDF) beş seviyesi (22 °C-referans, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C) ve sıcaklık türü faktörünün (STF) iki seviyesi (yangın ve fırın) üzerinde gerçekleştirilen tekrarlanan ölçümlü varyans analizi sonuçları ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'da gösterilen HSE artış değerlerine ait varyans çözümleme tablosuna göre STF*BSF*SDF interaksiyonunun HSE artışı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\alpha < 0.05$).

Çizelge 4.6. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin varyans çözümlemesi

	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-testi (F)	Anlamlılık düzeyi (p) $\alpha < 0,05$
Intercept	1	5171,113	5171,113	80968,241	0,000000
STF	3	302,810	100,937	1580,446	0,000000
BSF	3	5,792	1,931	30,231	0,000000
SDF	5	531,749	106,350	1665,205	0,000000
STF*BSF	9	8,548	0,950	14,871	0,000000
STF*SDF	15	210,964	14,064	220,216	0,000000
BSF*SDF	15	4,729	0,315	4,937	0,000000
STF*BSF*SDF	45	13,414	0,298	4,668	0,000000
Error	192	12,262	0,064		
Total	287	1090,270			

4.2.1. Fırın numunelerinin HSE deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi

altındaki HSE artışı (%) verileri ve istatistiksel olarak standart hata değerleri Çizelge 4.7’de ve Çizelge 4.8’de verilmiştir.

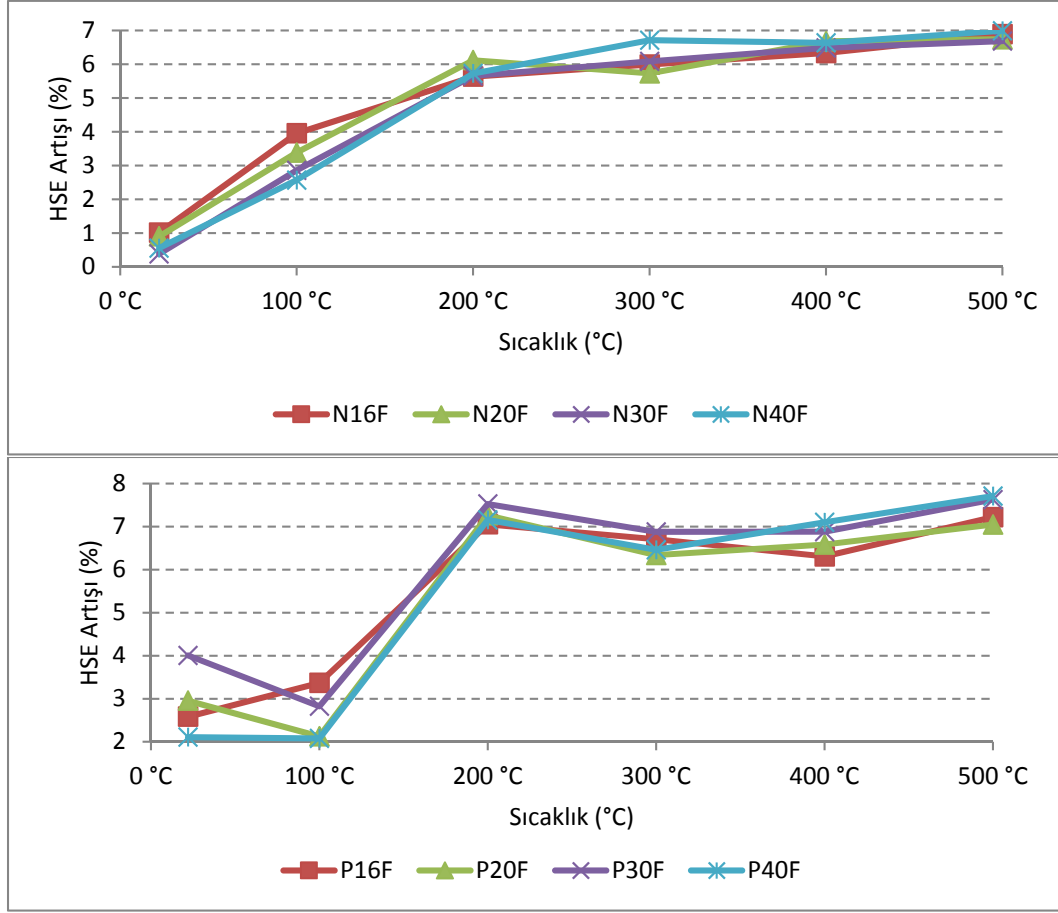
Çizelge 4.7. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri

	N16F HSE artış (%)	N16F Standart hata	N20F HSE artış (%)	N20F Standart hata	N30F HSE artış (%)	N30F Standart hata	N40F HSE artış (%)	N40F Standart hata
22 °C	1,011	0,009	0,904	0,016	0,385	0,036	0,555	0,014
100 °C	3,957	0,081	3,385	0,169	2,858	0,014	2,569	0,017
200 °C	5,635	0,062	6,123	0,008	5,654	0,149	5,729	0,066
300 °C	5,993	0,083	5,731	0,056	6,087	0,299	6,713	0,027
400 °C	6,332	0,010	6,682	0,097	6,486	0,156	6,634	0,054
500 °C	6,891	0,281	6,740	0,231	6,686	0,053	6,993	0,005

Çizelge 4.8. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri

	P16F HSE artış (%)	P16F Standart hata	P20F HSE artış (%)	P20F Standart hata	P30F HSE artış (%)	P30F Standart hata	P40F HSE artış (%)	P40F Standart hata
22 °C	2,584	0,320	2,956	0,454	4,007	0,148	2,109	0,154
100 °C	3,369	0,150	2,127	0,565	2,826	0,007	2,079	0,026
200 °C	7,056	0,128	7,264	0,158	7,529	0,070	7,158	0,059
300 °C	6,708	0,064	6,343	0,015	6,879	0,022	6,462	0,042
400 °C	6,311	0,170	6,586	0,043	6,883	0,163	7,102	0,169
500 °C	7,221	0,032	7,051	0,017	7,630	0,205	7,712	0,055

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin grafiksel gösterimi

NF numunelerinden fırınla verilen yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerin HSE'lerinde oluşan en büyük artış 500 °C'de N40F grubunda % 6,99 ile gerçekleşmiştir. En düşük artış ise 22 °C'de N30F grubunda % 0,385 ile gerçekleşmiştir. NF numunelerinde sıcaklık arttıkça HSE değerlerinde artış meydana gelmiş, en büyük artış 22 °C ile 200 °C aralığında gerçekleşmiştir. Diğer sıcaklık aralıklarında ise HSE değerlerindeki artışlar benzer olmuştur. BD sınıflarına göre oluşturulan numune gruplarında sıcaklık değerlerine göre oluşan artışların birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla BD sınıflarının, yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerin HSE'lerinde meydana gelen artış oranlarını etkilemediği gözlemlenmiştir.

PF numunelerinde fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen en büyük artış 500 °C'de N40F grubunda %7,71 ile gerçekleşmiştir. En düşük artış ise 100 °C'de P40F grubunda % 2,079 ile gerçekleşmiştir. HSE değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle genellikle artış gerçekleşmiş olup, en büyük artışlar 100 °C ile 200 °C aralığında

gerçekleşmiştir. PF numunelerinin HSE artışlarında sadece 200 °C ile 300 °C aralığında ufak bir düşüş meydana gelmiştir. PF numune gruplarının HSE artış değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu, dolayısıyla BD sınıflarının PF numunelerinin HSE oranlarındaki artışı etkilemediği gözlemlenmiştir.

4.2.2. Yangın numunelerinin HSE deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın ile yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) verileri ve istatistiksel olarak standart hata değerleri Çizelge 4.9’da ve Çizelge 4.10’da verilmiştir.

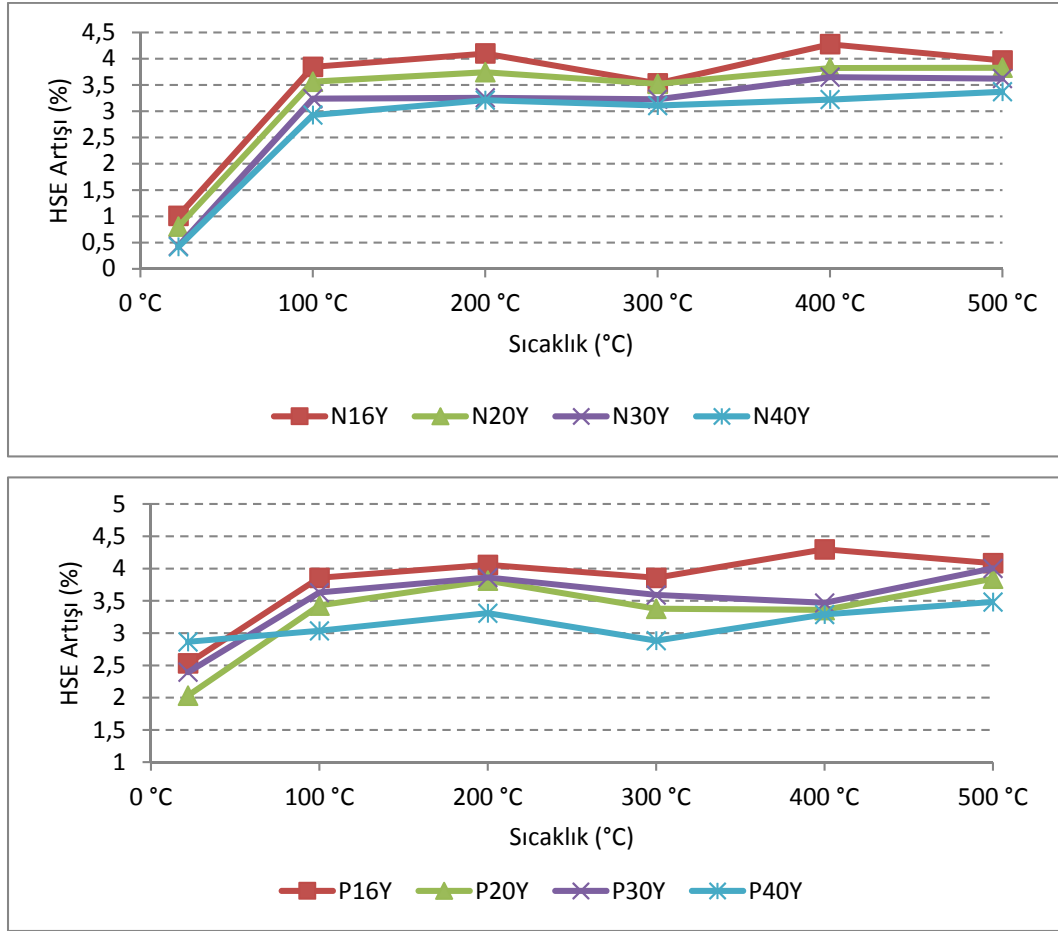
Çizelge 4.9. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri

	N16Y HSE artış (%)	N16Y Standart hata	N20Y HSE artış (%)	N20Y Standart hata	N30Y HSE artış (%)	N30Y Standart hata	N40Y HSE artış (%)	N40Y Standart hata
22 °C	1,009	0,031	0,805	0,009	0,433	0,011	0,420	0,013
100 °C	3,846	0,015	3,563	0,006	3,240	0,002	2,928	0,098
200 °C	4,101	0,099	3,744	0,050	3,256	0,003	3,213	0,026
300 °C	3,532	0,050	3,523	0,002	3,229	0,011	3,108	0,010
400 °C	4,277	0,067	3,824	0,128	3,650	0,035	3,223	0,016
500 °C	3,968	0,013	3,829	0,048	3,621	0,071	3,372	0,137

Çizelge 4.10. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerleri

	P16Y HSE artış (%)	P16Y Standart hata	P20Y HSE artış (%)	P20Y Standart hata	P30Y HSE artış (%)	P30Y Standart hata	P40Y HSE artış (%)	P40Y Standart hata
22 °C	2,533	0,324	2,033	0,577	2,396	0,305	2,867	0,211
100 °C	3,859	0,025	3,430	0,061	3,630	0,122	3,038	0,012
200 °C	4,059	0,022	3,815	0,063	3,864	0,100	3,311	0,034
300 °C	3,858	0,154	3,379	0,017	3,593	0,031	2,885	0,050
400 °C	4,300	0,052	3,360	0,023	3,469	0,258	3,290	0,110
500 °C	4,085	0,071	3,845	0,068	4,005	0,104	3,484	0,064

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.4.’de verilmiştir.



Şekil 4.4. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı (%) değerlerinin grafiksel gösterimi

NY numunelerinde yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen en büyük artış 400 °C’de N16Y grubunda % 4,28 ile gerçekleşmiştir. En düşük artış ise 22 °C’de N40Y grubunda % 0,42 ile gerçekleşmiştir. NY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan HSE oranlarındaki artışlarda ilişki gözlemlenmiştir. Buna göre BD’ı arttıkça HSE artış oranları da azalmıştır.

PY numunelerinde yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen en büyük artış 400 °C’de P16Y grubunda % 4,30 ile gerçekleşmiştir. En düşük artış ise 22 °C’de P20Y grubunda % 2,033 ile gerçekleşmiştir. NY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan HSE oranlarındaki artışlarda ilişki gözlemlenmiştir. Buna göre BD’ı arttıkça HSE artış oranları da azalmıştır.

HSE deneyi bulgularının değerlendirilmesi

Numune gruplarının hepsinde yüksek sıcaklık etkisi altında HSE oranları artmıştır. Bu artışın yüksek sıcaklık derecesinin artması ile, numuneye verilen yüksek sıcaklığın türü ile veya numunenin GPA'lı ve GPA'sız olması ile ne derecede etkilendiği gözlemlenmeye çalışılmıştır.

NF ve PF numune gruplarının yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışları ile BD sınıfları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. Fırın numune gruplarının HSE oranlarındaki en büyük artışın 22 °C ile 200 °C aralığında gerçekleştiği görülmektedir. 200 °C ile 500 °C aralığında NF numunelerinin HSE oranları 22 °C-200 °C aralığına göre daha düşük bir oranda artmaya devam etmiştir. PF numunelerinin HSE oranlarındaki artış ise 22 °C-100 °C ve 200 °C-300 °C aralığında hafif bir düşüş göstermiş, 300 °C-500 °C aralığında ise tekrar yükselmiştir. NF numunelerinin 500 °C'deki HSE oranlarındaki artış %6,69-%6,99 aralığında değişirken, PF numunelerinin %7,05-%7,71 aralığında değişmektedir. Görüldüğü üzere GPA'lı fırın numunelerinin 500 °C'deki HSE oranlarındaki artış GPA'sız (normal) fırın numunelerinkinden daha yüksektir.

NY ve PY numune gruplarında ise NF-PF numune gruplarının aksine BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışları arasında bir paralellik gözlemlenmiştir. Her iki numune grubunda da BD'ı arttıkça yangın etkisiyle verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca NY ve PY numune gruplarında 22 °C-200 °C aralığında HSE oranı artmış, 200 °C-300 °C aralığında azalmış, 300 °C-500 °C aralığında da tekrar artmıştır. Yangın numunelerinde de GPA'lı numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE oranı artışları GPA'sız yangın numunelerinkinden bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak yangın numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışı, fırın numunelerinkinden daha düşük olmuştur. Bunun sebepleri yangın etkisinin tek yüzeye verilmesi, yangın aparatının etrafında oluşan ısı kayıpları veya 500 °C'nin numunenin tek yüzüne verilen yangın etkisinde yetersiz kalabileceği olarak gösterilebilir.

4.3. KSE Deneyi Bulguları

Yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış GPA'lı ve GPA'sız numunelere KSE deneyi uygulanarak, numunelerin KSE katsayılarındaki değişimler incelenmiştir. Numunelerin KSE katsayıları hesaplanırken, 150. dakikadaki sonuçlar dikkate alınmıştır.

4.3.1. Fırın numunelerinin KSE deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı verileri Çizelge 4.11'de ve Çizelge 4.12'de verilmiştir.

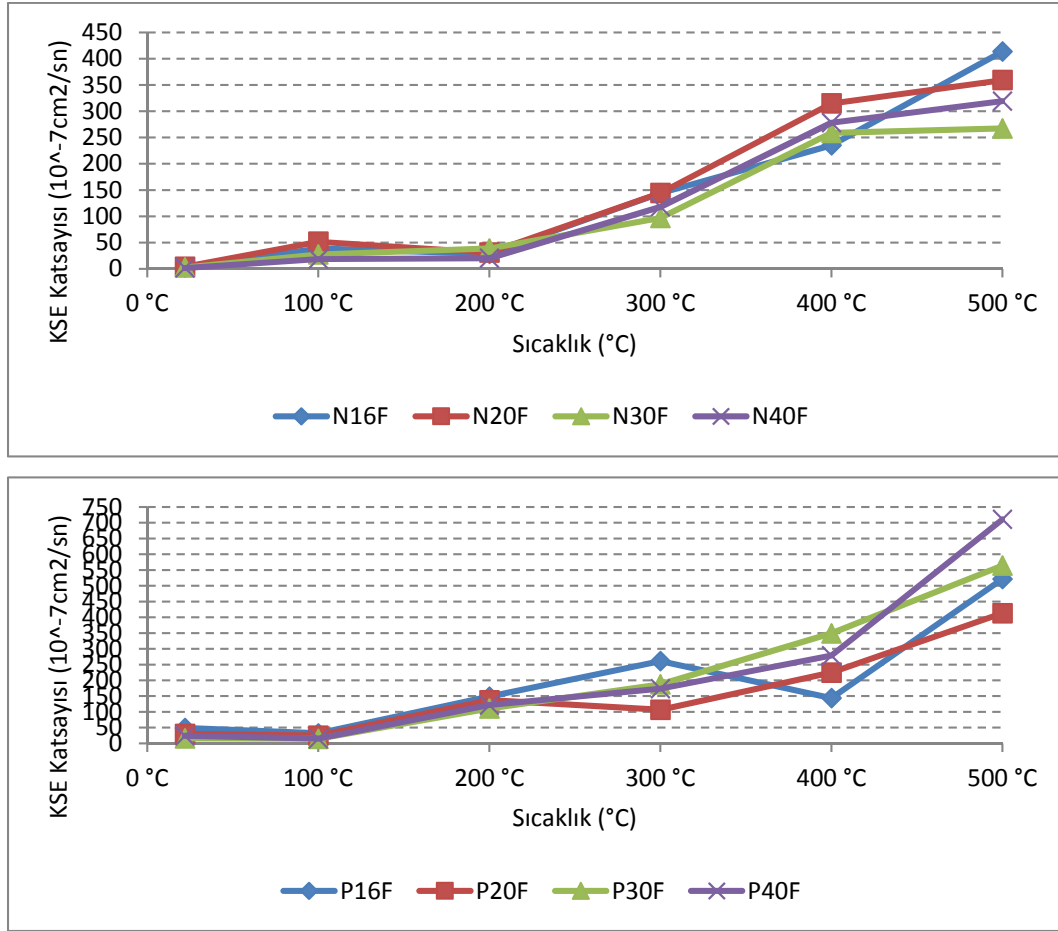
Çizelge 4.11. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri

Ortalama KSE Katsayıları ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$)				
	N16F	N20F	N30F	N40F
22 °C	2,78	4,00	2,78	1,78
100 °C	38,78	51,61	27,39	18,78
200 °C	28,56	30,94	38,72	20,28
300 °C	144,11	144,44	96,94	118,06
400 °C	235,22	314,89	258,78	278,22
500 °C	413,89	359,39	267,22	319,39

Çizelge 4.12. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri

Ortalama KSE Katsayıları ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$)				
	P16F	P20F	P30F	P40F
22 °C	49,11	30,28	16,11	24,06
100 °C	32,11	25,00	14,72	15,39
200 °C	148,72	137,11	110,94	122,00
300 °C	261,44	106,89	187,78	174,06
400 °C	144,00	225,11	349,44	278,78
500 °C	522,06	413,56	564,50	711,22

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi

NF numunelerinin KSE katsayıları genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük KSE katsayısı değeri $1,78 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 22 °C’de N40F numunesininidir. En yüksek KSE katsayısı değeri $413,89 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 500 °C’de N16F numunesininidir. NF numunelerinin KSE katsayılarında 100 °C’ye kadar bir artış göstermiş fakat 100 °C- 200 °C aralığında ufak bir düşüş gerçekleşmiştir. KSE katsayılarındaki en büyük artış 300 °C- 400 °C aralığında gerçekleşmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayılarındaki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

PF numunelerinin KSE katsayıları genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük KSE katsayısı değeri $16,11 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 22 °C’de P30F numunesininidir. En yüksek KSE katsayısı değeri $711,22 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 500 °C’de P40F numunesininidir. KSE katsayılarındaki en büyük artış 400 °C- 500 °C aralığında

gerçekleşmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere PF numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayılarındaki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

4.3.2. Yangın numunelerinin KSE deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı verileri Çizelge 4.13’de ve Çizelge 4.14’de verilmiştir.

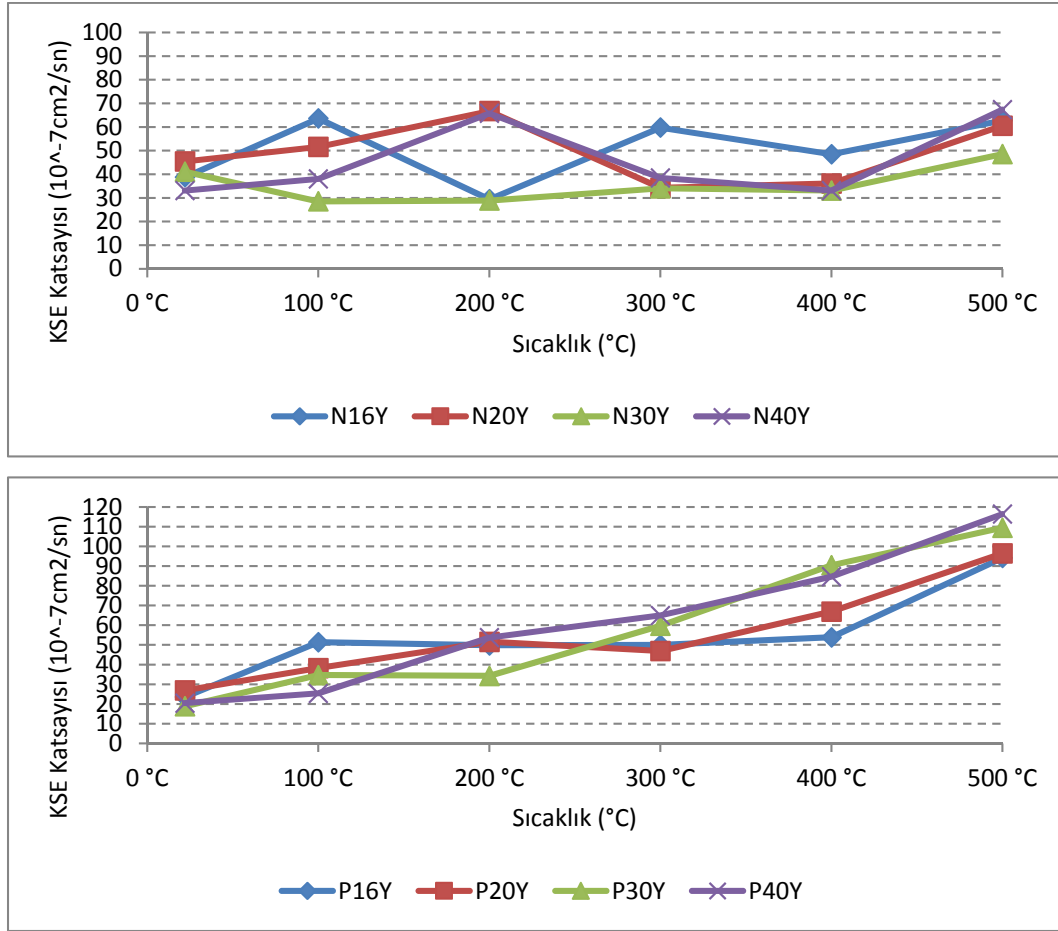
Çizelge 4.13. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri

Ortalama KSE katsayıları ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$)				
	N16Y	N20Y	N30Y	N40Y
22 °C	38,78	45,44	41,11	33,11
100 °C	63,61	51,61	28,56	38,06
200 °C	29,44	66,72	28,89	65,78
300 °C	59,78	34,28	34,06	38,47
400 °C	48,50	36,11	33,11	33,11
500 °C	62,78	60,56	48,56	67,39

Çizelge 4.14. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerleri

Ortalama KSE katsayıları ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$)				
	P16Y	P20Y	P30Y	P40Y
22 °C	23,61	26,94	18,89	20,50
100 °C	51,39	38,28	34,72	25,44
200 °C	49,82	51,61	34,28	53,78
300 °C	50,00	46,94	59,78	65,00
400 °C	53,89	66,94	90,50	84,72
500 °C	94,22	96,48	109,56	116,50

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi

NY numunelerinin KSE katsayılarında genel itibariyle yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla herhangi bir artış gözlemlenememiştir. En düşük KSE katsayısı değeri $28,56 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 22 °C'de N30Y numunesininidir. En yüksek KSE katsayısı değeri $67,39 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 500 °C'de N40Y numunesininidir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere NY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayılarındaki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

PY numunelerinin KSE katsayıları genel itibariyle yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük KSE katsayısı değeri $18,89 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 22 °C'de P30Y numunesininidir. En yüksek KSE katsayısı değeri $116,50 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 500 °C'de P40Y numunesininidir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere PY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki KSE katsayılarındaki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

KSE deneyi bulgularının değerlendirilmesi

NF ve PF fırın numunelerinde fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklığın etkisi arttıkça, KSE katsayılarının düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca fırın numunelerinde KSE katsayılarındaki artış ile BD sınıfları arasında herhangi bir paralellik gözlemlenmemiştir. Bu sebeple fırın numunelerinde GPA'nın KSE katsayılarının değişimi üzerindeki etkisini anlayabilmek için 500 °C'deki NF ve PF numune gruplarının KSE katsayılarının ortalaması alınarak kıyaslama yapılabileceği düşünülmüştür. 500 °C'deki NF numunelerinin KSE katsayılarının ortalaması $339,97 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak bulunmuş, PF numunelerinin KSE katsayılarının ortalaması ise $552,83 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak bulunmuştur. Buradan fırın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altında GPA'lı numunelerin KSE katsayılarında daha büyük bir artış meydana geldiği sonucu çıkarılmaktadır.

PY numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi arttıkça KSE katsayılarının da arttığı gözlemlenirken, NY numunelerinde KSE katsayılarının yer yer artıp azaldığı ve sonuç olarak sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yine yangın numunelerinde KSE katsayılarındaki artış ile BD sınıfları arasında herhangi bir paralellik gözlemlenmemiştir. Bu sebeple 500 °C'deki NY ve PY numunelerinin KSE katsayılarının ortalaması alınarak kıyaslama yapılabileceği düşünülmüştür. NY numunelerinin 500 °C'deki KSE katsayılarının ortalaması $59,82 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ iken, PY numunelerinin KSE katsayılarının ortalaması $104,19 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak bulunmuştur. Buradan yangın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altındaki GPA'lı numunelerin KSE katsayılarında daha büyük bir artış meydana geldiği sonucu çıkarılmaktadır.

4.4. AD Deneyi Bulguları

Yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış GPA'lı ve GPA'sız numunelere AD deneyi uygulanarak, numunelerin aşınma kayıplarındaki değişimler incelenmiştir.

Katkı türü faktörünün (KF) iki seviyesi (GPA'lı ve GPA'sız), beton sınıfı faktörünün (BSF) dört seviyesi (C16, C20, C30 ve C40), uygulanan sıcaklık değeri faktörünün (SDF) beş seviyesi (22 °C-referans, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C) ve sıcaklık türü faktörünün (STF) iki seviyesi (yangın ve fırın) üzerinde gerçekleştirilen tekrarlanan ölçümlü

varyans analizi sonuçları ise Çizelge 4.15’de verilmiştir. Çizelge 4.15’de gösterilen AD kaybı değerlerine ait varyans çözümleme tablosuna göre STF*BSF*SDF interaksiyonunun AD kaybı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\alpha<0.05$).

Çizelge 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kayıpları değerlerinin varyans çözümlemesi

	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-testi (F)	Anlamlılık düzeyi (p) $\alpha<0,05$
Intercept	1	9,275	9,275	19395,205	0,000000
STF	3	0,413	0,138	287,703	0,000000
BSF	3	0,408	0,136	284,616	0,000000
SDF	5	0,135	0,027	56,269	0,000000
STF*BSF	9	0,059	0,007	13,664	0,000000
STF*SDF	15	0,155	0,010	21,550	0,000000
BSF*SDF	15	0,029	0,002	3,994	0,000003
STF*BSF*SDF	45	0,093	0,002	4,317	0,000000
Error	192	0,092	0,000		
Total	287	1,382			

4.4.1. Fırın numunelerinin AD deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri verileri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.16’da ve Çizelge 4.17’de verilmiştir.

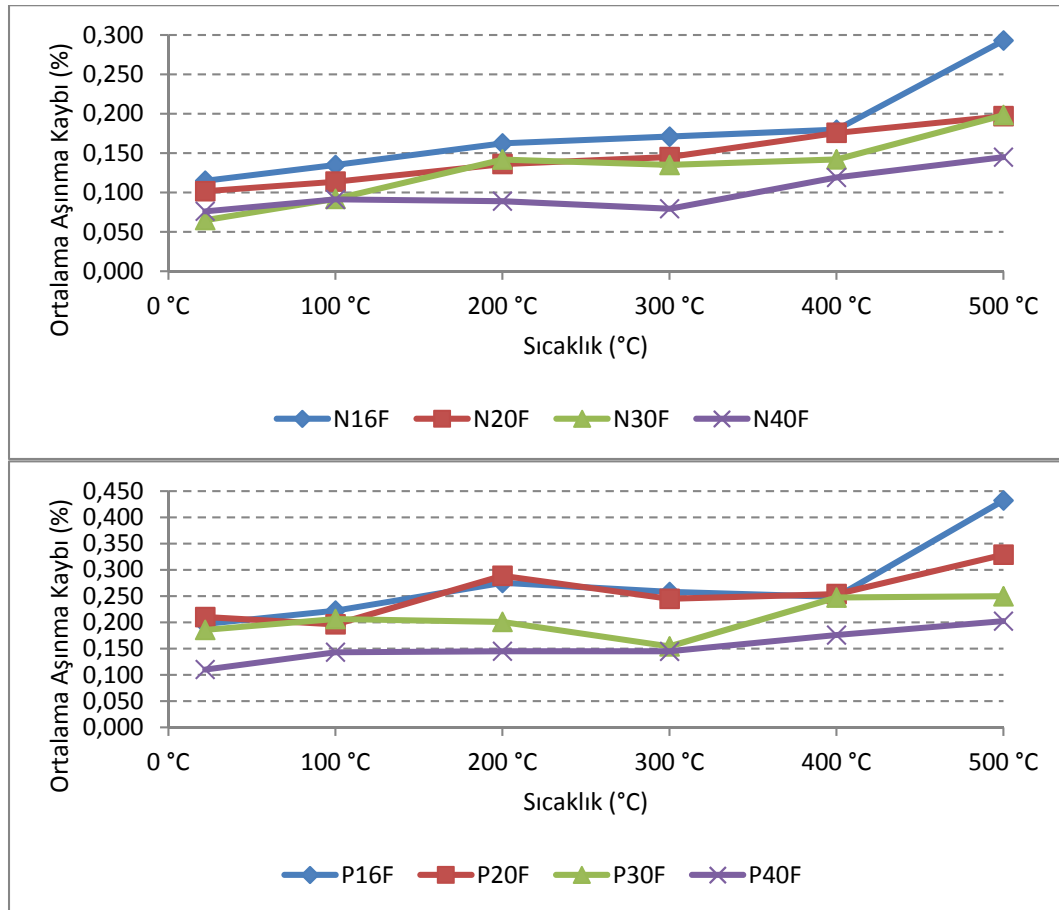
Çizelge 4.16. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri

	N16F AD kayıp (%)	N16F Standart hata	N20F AD kayıp (%)	N20F Standart hata	N30F AD kayıp (%)	N30F Standart hata	N40F AD kayıp (%)	N40F Standart hata
22 °C	0,115	0,002	0,102	0,003	0,065	0,003	0,076	0,005
100 °C	0,135	0,002	0,114	0,003	0,092	0,002	0,091	0,002
200 °C	0,162	0,005	0,136	0,004	0,142	0,002	0,089	0,012
300 °C	0,171	0,005	0,145	0,005	0,135	0,002	0,079	0,003
400 °C	0,180	0,007	0,176	0,007	0,142	0,001	0,119	0,004
500 °C	0,293	0,010	0,197	0,008	0,198	0,011	0,145	0,008

Çizelge 4.17. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri

	P16F AD kayıp (%)	P16F Standart hata	P20F AD kayıp (%)	P20F Standart hata	P30F AD kayıp (%)	P30F Standart hata	P40F AD kayıp (%)	P40F Standart hata
22 °C	0,197	0,000	0,210	0,012	0,186	0,018	0,110	0,007
100 °C	0,222	0,008	0,196	0,005	0,207	0,040	0,143	0,005
200 °C	0,275	0,001	0,289	0,021	0,201	0,030	0,145	0,009
300 °C	0,258	0,003	0,245	0,000	0,154	0,006	0,145	0,008
400 °C	0,249	0,054	0,254	0,014	0,247	0,021	0,176	0,005
500 °C	0,432	0,027	0,329	0,031	0,250	0,013	0,203	0,001

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerlerinin grafiksel gösterimi

NF numunelerinin AD deneyi sonucu oluşan yüzdece ağırlık kayıpları genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük ağırlık kaybı

%0,065 ile 22 °C’de N30F numunesinindir. En yüksek ağırlık kaybı %0,293 ile 500 °C’de N16F numunesinindir. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere NF numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kayıpları arasında ilişki bulunmaktadır. NF numunelerinde BD’ı arttıkça aşınma kayıpları azalmıştır.

PF numunelerinin AD deneyi sonucu oluşan yüzdece ağırlık kayıpları genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük ağırlık kaybı %0,11 ile 22 °C’de P40F numunesinindir. En yüksek ağırlık kaybı %0,432 ile 500 °C’de P16F numunesinindir. NF numunelerinin AD deneyi sonucu oluşan yüzdece ağırlık kayıplarındaki en büyük artış 400 °C- 500 °C aralığında gerçekleşmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere yüksek sıcaklık etkisi altındaki PF numunelerinde BD’ı arttıkça aşınma kayıpları azalmıştır.

4.4.2. Yangın numunelerinin AD deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri verileri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.18’de ve Çizelge 4.19’da verilmiştir.

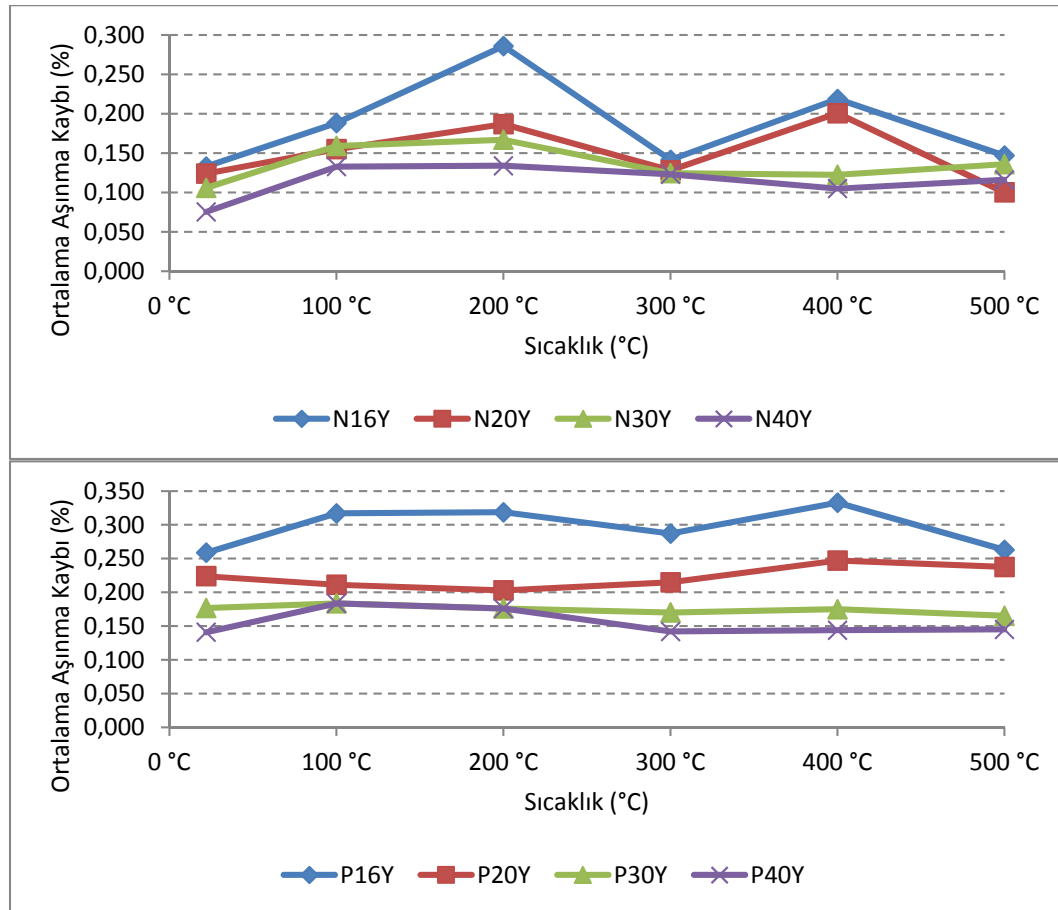
Çizelge 4.18. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri

	N16Y AD kayıp (%)	N16Y Standart hata	N20Y AD kayıp (%)	N20Y Standart hata	N30Y AD kayıp (%)	N30Y Standart hata	N40Y AD kayıp (%)	N40Y Standart hata
22 °C	0,133	0,001	0,124	0,002	0,106	0,002	0,076	0,003
100 °C	0,188	0,009	0,155	0,044	0,159	0,002	0,133	0,002
200 °C	0,286	0,002	0,187	0,001	0,167	0,002	0,134	0,003
300 °C	0,142	0,001	0,128	0,004	0,125	0,002	0,123	0,003
400 °C	0,219	0,001	0,201	0,001	0,123	0,002	0,105	0,001
500 °C	0,147	0,002	0,100	0,003	0,136	0,002	0,116	0,002

Çizelge 4.19. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerleri

	P16Y AD kayıp (%)	P16Y Standart hata	P20Y AD kayıp (%)	P20Y Standart hata	P30Y AD kayıp (%)	P30Y Standart hata	P40Y AD kayıp (%)	P40Y Standart hata
22 °C	0,259	0,004	0,224	0,006	0,177	0,003	0,141	0,004
100 °C	0,317	0,019	0,211	0,003	0,184	0,007	0,184	0,007
200 °C	0,319	0,004	0,203	0,029	0,176	0,004	0,176	0,004
300 °C	0,287	0,017	0,215	0,008	0,170	0,010	0,142	0,003
400 °C	0,333	0,007	0,247	0,025	0,175	0,012	0,144	0,008
500 °C	0,263	0,000	0,238	0,013	0,165	0,012	0,145	0,013

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı değerlerinin grafiksel gösterimi

NY numunelerinin AD deneyi sonucu oluşan yüzdece ağırlık kayıpları yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla yer yer iniş çıkışlar göstermiştir. En düşük ağırlık kaybı %0,076 ile 22 °C’de N40Y numunesinindir. En yüksek ağırlık kaybı %0,286 ile 200 °C’de N16Y numunesinindir. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere NY numunelerinde BD’ı ile yüksek sıcaklık etkisi ile AD sonucu oluşan yüzdece ağırlık kaybı arasında ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre BD sınıfı arttıkça yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı azalmaktadır.

PY numunelerinin AD deneyi sonucu oluşan yüzdece ağırlık kayıpları yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla yer yer iniş çıkışlar gösterse de genel itibariyle yatay seyretmiştir. En düşük ağırlık kaybı %0,141 ile 22 °C’de P40Y numunesinindir. En yüksek ağırlık kaybı %0,333 ile 400 °C’de P16Y numunesinindir. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere PY numunelerinde BD’ı ile yüksek sıcaklık etkisi ile AD sonucu oluşan yüzdece ağırlık kaybı arasında ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre BD’ı arttıkça yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki AD kaybı azalmaktadır.

AD deneyi bulgularının değerlendirilmesi

NF ve PF fırın numunelerinde, yüksek sıcaklık etkisi arttıkça aşınma kayıplarının arttığı ve BD’ları yükseldikçe aşınma kayıplarının azaldığı da gözlemlenmiştir. NF numunelerinin 500 °C’deki aşınma kayıpları %0,145 ile %0,293 arasında değişirken, PF numunelerinin 500 °C’deki aşınma kayıplarının ise %0,203 ile %0,432 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Buradan fırın numunelerinde GPA katkısı kullanıldığında yüksek sıcaklık etkisi altındaki aşınma kayıplarının arttığı sonucuna varılabilir.

NY ve PY yangın numunelerinde, yüksek sıcaklık etkisi ve BD’ları arttıkça aşınma kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. NY numunelerinin 500 °C’deki aşınma kayıpları %0,1 ile %0,147 arasında değişirken, PY numunelerinin 500 °C’deki aşınma kayıplarının ise %0,145 ile %0,263 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Buradan yangın numunelerinde GPA katkısı kullanıldığında yüksek sıcaklık etkisi altındaki aşınma kayıplarının arttığı sonucuna varılabilir.

S/ç oranı arttıkça BD düşmektedir. BD arttıkça da numunelerin aşınma kayıplarının düşük çıkması beklenir. AD deneyi bulguları da bu bilgiyi destekler niteliktedir. Ayrıca GPA’lı

numunelerin aşınma kayıplarının GPA'sız numunelerin aşınma kayıplarından daha yüksek çıkması da GPA'lı numunelerin basınç dayanımlarının GPA'sız numunelerden daha düşük çıkabileceği fikrini ortaya çıkarmaktadır.

4.5. UGH Deneyi Bulguları

Yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış GPA'lı ve GPA'sız numunelere UGH deneyi uygulanarak, numunelerin UGH'larındaki değişimler incelenmiştir.

Katkı türü faktörünün (KF) iki seviyesi (GPA'lı ve GPA'sız), beton sınıfı faktörünün (BSF) dört seviyesi (C16, C20, C30 ve C40), uygulanan sıcaklık değeri faktörünün (SDF) beş seviyesi (22 °C-referans, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C) ve sıcaklık türü faktörünün (STF) iki seviyesi (yangın ve fırın) üzerinde gerçekleştirilen tekrarlanan ölçümlü varyans analizi sonuçları ise Çizelge 4.20'de verilmiştir. Çizelge 4.20.'de gösterilen UGH değerlerine ait varyans çözümleme tablosuna göre STF*BSF*SDF interaksiyonunun AD kaybı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\alpha < 0.05$).

Çizelge 4.20. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin varyans çözümlemesi

	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-testi (F)	Anlamlılık düzeyi (p) $\alpha < 0,05$
Intercept	1	4783,054	4783,054	78538,841	0,000000
STF	3	59,711	19,904	326,824	0,000000
BSF	3	0,812	0,271	4,443	0,004816
SDF	5	65,564	13,113	215,316	0,000000
STF*BSF	9	1,683	0,187	3,071	0,001832
STF*SDF	15	48,670	3,245	53,279	0,000000
BSF*SDF	15	1,026	0,068	1,123	0,338225
STF*BSF*SDF	45	5,679	0,126	2,072	0,000368
Error	192	11,693	0,061		
Total	287	194,839			

4.5.1. Fırın numunelerinin UGH deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.21’de ve Çizelge 4.22’de verilmiştir.

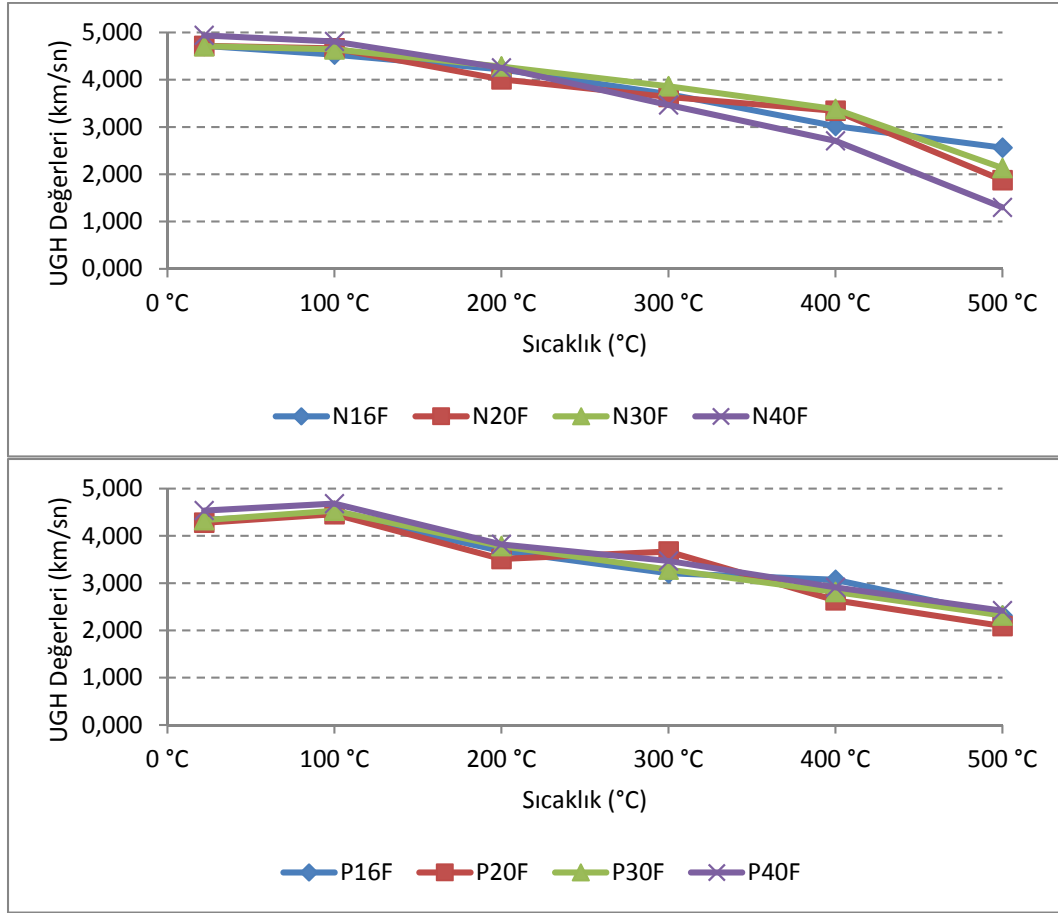
Çizelge 4.21. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri

	N16F UGH	N16F Standart hata	N20F UGH	N20F Standart hata	N30F UGH	N30F Standart hata	N40F UGH	N40F Standart hata
22 °C	4,716	0,037	4,717	0,002	4,709	0,032	4,938	0,036
100 °C	4,532	0,070	4,664	0,020	4,642	0,032	4,810	0,054
200 °C	4,220	0,031	4,010	0,103	4,281	0,042	4,253	0,066
300 °C	3,699	0,027	3,636	0,050	3,863	0,131	3,467	0,077
400 °C	3,022	0,037	3,344	0,006	3,382	0,130	2,709	0,039
500 °C	2,564	0,054	1,875	0,449	2,133	0,177	1,300	0,015

Çizelge 4.22. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri

	P16F UGH	P16F Standart hata	P20F UGH	P20F Standart hata	P30F UGH	P30F Standart hata	P40F UGH	P40F Standart hata
22 °C	4,338	0,211	4,278	0,051	4,335	0,172	4,535	0,095
100 °C	4,467	0,185	4,459	0,085	4,533	0,077	4,682	0,105
200 °C	3,680	0,049	3,512	0,054	3,784	0,057	3,821	0,059
300 °C	3,211	0,176	3,669	0,106	3,288	0,098	3,470	0,071
400 °C	3,071	0,114	2,638	0,305	2,814	0,225	2,912	0,065
500 °C	2,316	0,686	2,093	0,123	2,316	0,219	2,419	0,243

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin grafiksel gösterimi

NF numunelerinin UGH değerleri genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla azalmıştır. En düşük UGH değeri 1,3 km/sn ile 500 °C’de N40F numunesininidir. En yüksek UGH değeri 4,938 km/sn ile 22 °C’de N40F numunesininidir. NF numunelerinin UGH değerlerindeki en büyük kayıp 400 °C- 500 °C aralığında gerçekleşmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü üzere NF numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi ile UGH değerindeki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

PF numunelerinin UGH kayıpları genel itibariyle fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla artmıştır. En düşük UGH değeri 2,093 km/sn ile 500 °C’de P20F numunesininidir. En yüksek UGH değeri 4,682 km/sn ile 100 °C’de P40F numunesininidir. PF numunelerinin UGH değerlerindeki en büyük kayıp 100 °C- 200 °C ile 300 °C- 500 °C aralığında gerçekleşmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü üzere PF numunelerinde BD sınıflarıyla

yüksek sıcaklık etkisi ile UGH değerindeki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

4.5.2. Yangın numunelerinin UGH deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.23’de ve Çizelge 4.24’de verilmiştir.

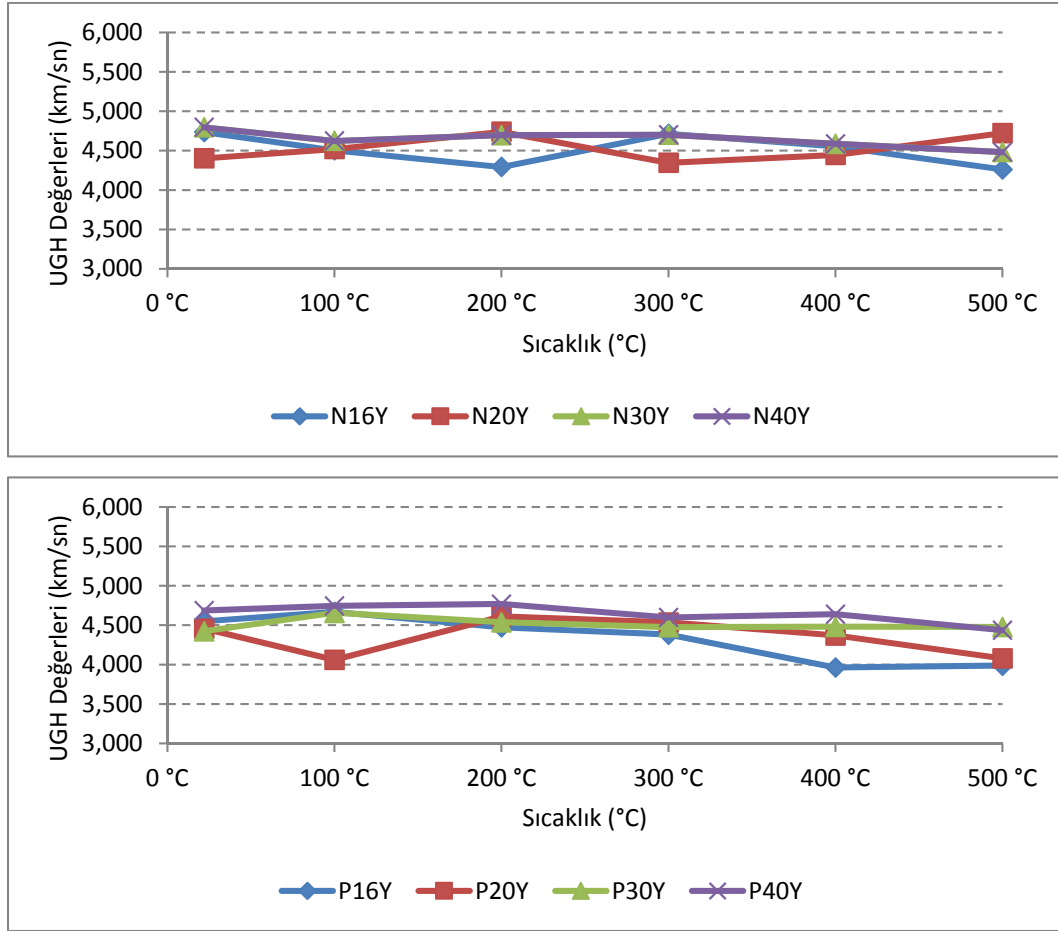
Çizelge 4.23. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri

	N16Y UGH	N16Y Standart hata	N20Y UGH	N20Y Standart hata	N30Y UGH	N30Y Standart hata	N40Y UGH	N40Y Standart hata
22 °C	4,736	0,042	4,403	0,092	4,797	0,032	4,797	0,032
100 °C	4,504	0,003	4,521	0,024	4,624	0,007	4,624	0,007
200 °C	4,293	0,036	4,741	0,014	4,696	0,037	4,696	0,037
300 °C	4,715	0,026	4,346	0,014	4,702	0,088	4,702	0,088
400 °C	4,554	0,031	4,446	0,177	4,586	0,130	4,586	0,130
500 °C	4,262	0,085	4,723	0,076	4,482	0,099	4,482	0,099

Çizelge 4.24. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri

	P16Y UGH	P16Y Standart hata	P20Y UGH	P20Y Standart hata	P30Y UGH	P30Y Standart hata	P40Y UGH	P40Y Standart hata
22 °C	4,550	0,099	4,458	0,150	4,424	0,187	4,687	0,074
100 °C	4,671	0,108	4,061	0,457	4,657	0,048	4,746	0,064
200 °C	4,474	0,046	4,611	0,064	4,538	0,126	4,769	0,033
300 °C	4,381	0,075	4,536	0,038	4,476	0,089	4,600	0,143
400 °C	3,964	0,125	4,372	0,062	4,482	0,122	4,640	0,055
500 °C	3,987	0,236	4,079	0,202	4,478	0,122	4,438	0,176

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerlerinin grafiksel gösterimi

NY numunelerinin UGH değerleri genel itibariyle yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla belirgin bir değişiklik göstermemiştir. En düşük UGH değeri 4,262 km/sn ile 500 °C’de N16Y numunesininidir. En yüksek UGH değeri 4,797 km/sn ile 22 °C’de N30Y numunesininidir. NY numunelerinin UGH değerleri genel itibariyle aynı değerlerdedir. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere NY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi ile UGH değerindeki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

PY numunelerinin UGH kayıpları genel itibariyle yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık derecesinin artmasıyla belirgin bir değişiklik göstermemiştir. En düşük UGH değeri 3,964 km/sn ile 400 °C’de P16Y numunesininidir. En yüksek UGH değeri 4,769 km/sn ile 200 °C’de P40Y numunesininidir. PY numunelerinin UGH değerleri genel itibariyle aynı değerlerdedir. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere PY numunelerinde BD sınıflarıyla yüksek

sıcaklık etkisi ile UGH değeriindeki değişim arasında herhangi bir paralellik gözlemlenememiştir.

UGH deneyi bulgularının değerlendirilmesi

NF ve PF numunelerinin UGH değerlerinin yüksek sıcaklık değeri arttıkça düzenli bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek sıcaklık etkisiyle beton numunelerinin boşluk yapısının artması olarak açıklanabilir. Fırın numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değişimleriyle BD sınıfları arasında herhangi bir bağıntı gözlemlenememiştir. Bu sebeple GPA'nın yüksek sıcaklık etkisi altında UGH değerlerine olan etkisinin gözlemlenebilmesi için NF ve PF numunelerinin 500 °C'deki ortalamalarına bakılmıştır. NF numunelerinin 500 °C'deki ortalama UGH değerleri 1,968 km/sn olarak bulunurken, PF numunelerinin 500 °C'deki ortalama UGH değerleri ise 2,286 km/sn olarak bulunmuştur. GPA'lı numunelerin 500 °C'deki UGH değerleri GPA'sız numunelerinkinden daha yüksek çıkmıştır. UGH değeri azaldıkça betonun içindeki boşluk yapısı artmaktadır. Fırın ile verilen 500 °C'deki yüksek sıcaklık etkisi altında, GPA'lı numunelerin UGH değerlerinin GPA'sız numunelerden daha yüksek çıkması, GPA'nın yüksek sıcaklığa karşı betonun boşluk yapısını koruduğunu göstermektedir.

NY ve PY numunelerinin UGH değerlerinde yüksek sıcaklık değeri arttıkça ciddi bir düşüş gözlemlenememiştir. Bu durumun sebebi olarak yangın etkisinin numunelerin tek yüzüne etkitilmesi, yangın etkisi sırasında oluşan ısı kayıpları veya 500 °C'nin yangının yüksek sıcaklık etkisi için yetersiz kalmış olabileceği gösterilebilir. Yangın numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değişimleriyle BD sınıfları arasında herhangi bir bağıntı gözlemlenememiştir. Bu sebeple GPA'nın yüksek sıcaklık etkisi altında UGH değerlerine olan etkisinin gözlemlenebilmesi için NY ve PY numunelerinin 500 °C'deki ortalamalarına bakılmıştır. NY numunelerinin 500 °C'deki ortalama UGH değerleri 4,487 km/sn olarak bulunurken, PY numunelerinin 500 °C'deki ortalama UGH değerleri ise 4,246 km/sn olarak bulunmuştur. Bu değer birbirine çok yakın değerler olarak düşünülmektedir. Ancak fırın etkisi altındaki numunelerin UGH değerlerindeki düşüş fırın etkisi altındaki numunelerinkinden çok daha fazladır. Bunun sebepleri yangın etkisinin tek yüzeye verilmesi, yangın aparatının etrafında oluşan ısı kayıpları veya 500 °C'nin numunenin tek yüzüne verilen yangın etkisinde yetersiz kalabileceği olarak gösterilebilir.

4.6. BD Deneyi Bulguları

Yangın ve fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış GPA'lı ve GPA'sız numunelere BD deneyi uygulanarak, numunelerin BD'larındaki değişimler incelenmiştir.

Katkı türü faktörünün (KF) iki seviyesi (GPA'lı ve GPA'sız), beton sınıfı faktörünün (BSF) dört seviyesi (C16, C20, C30 ve C40), uygulanan sıcaklık değeri faktörünün (SDF) beş seviyesi (22 °C-referans, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C) ve sıcaklık türü faktörünün (STF) iki seviyesi (yangın ve fırın) üzerinde gerçekleştirilen tekrarlanan ölçümlü varyans analizi sonuçları ise Çizelge 4.25'de verilmiştir. Çizelge 4.25'de gösterilen UGH değerlerine ait varyans çözümleme tablosuna göre STF*BSF*SDF interaksiyonunun BD değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\alpha < 0.05$).

Çizelge 4.25. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin varyans çözümlemesi

	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-testi (F)	Anlamlılık düzeyi (p) $\alpha < 0,05$
Intercept	1	187060,582	187060,582	157158,595	0,000000
STF	3	5170,982	1723,661	1448,130	0,000000
BSF	3	10243,947	3414,649	2868,811	0,000000
SDF	5	4677,390	935,478	785,940	0,000000
STF*BSF	9	868,953	96,550	81,117	0,000000
STF*SDF	15	2580,298	172,020	144,522	0,000000
BSF*SDF	15	245,288	16,353	13,739	0,000000
STF*BSF*SDF	45	398,840	8,863	7,446	0,000000
Error	192	228,531	1,190		
Total	287	24414,229			

4.6.1. Fırın numunelerinin BD deneyi bulguları

NF ve PF numunelerine fırın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki UGH değerleri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.26'da ve Çizelge 4.27'de verilmiştir.

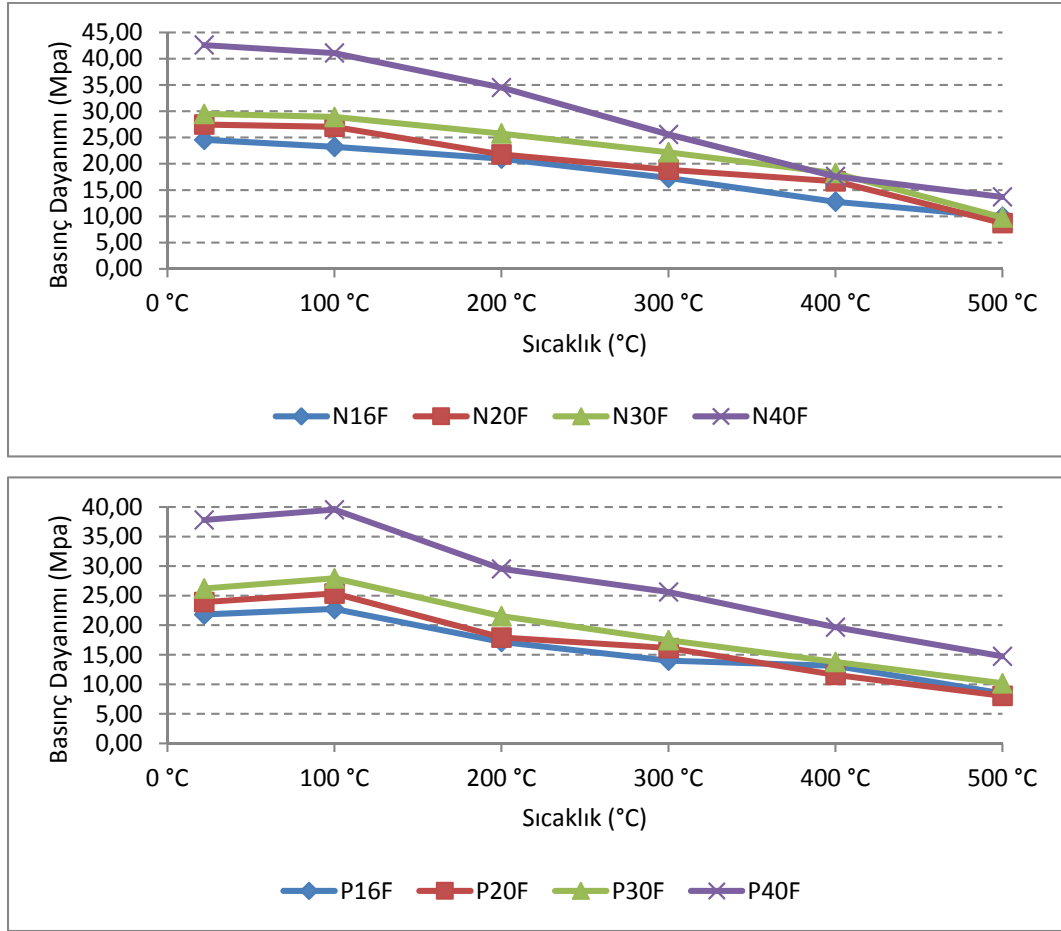
Çizelge 4.26. NF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri

	N16F BD	N16F Standart hata	N20F BD	N20F Standart hata	N30F BD	N30F Standart hata	N40F BD	N40F Standart hata
22 °C	24,560	0,820	27,480	0,346	29,500	1,068	42,624	1,081
100 °C	23,225	1,192	27,045	0,401	28,913	1,347	41,095	0,953
200 °C	20,977	1,303	21,793	0,752	25,769	0,376	34,525	0,922
300 °C	17,316	0,660	18,885	0,828	22,208	0,449	25,601	0,661
400 °C	12,789	0,497	16,675	1,746	18,242	0,642	17,602	0,830
500 °C	9,923	0,695	8,720	0,566	9,790	0,849	13,704	0,721

Çizelge 4.27. PF numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri

	P16F BD	P16F Standart hata	P20F BD	P20F Standart hata	P30F BD	P30F Standart hata	P40F BD	P40F Standart hata
22 °C	21,822	0,498	23,927	0,852	26,234	0,113	37,827	0,022
100 °C	22,754	0,505	25,385	0,580	27,959	0,232	39,574	0,304
200 °C	17,187	0,195	17,939	0,692	21,551	0,063	29,555	0,076
300 °C	14,019	0,213	16,140	0,381	17,486	0,350	25,642	0,033
400 °C	13,108	0,174	11,604	0,476	13,798	0,013	19,674	0,176
500 °C	8,462	0,495	8,057	0,102	10,185	0,020	14,745	0,033

NF ve PF numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. NF ve PF numunelerinin fırın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin grafiksel gösterimi

Tüm NF numune gruplarında 22 °C’de s/ç oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü ve yüksek sıcaklık derecesi arttıkça BD’nın da düştüğü gözlemlenmiştir. En yüksek BD 22 °C’de 42,62 Mpa ile N40F grubunun, en düşük BD ise 500 °C’de 8,72 Mpa ile N20F numune grubunun olmuştur.

Tüm PF numune gruplarında 22 °C’de s/ç oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü ve yüksek sıcaklık derecesi arttıkça BD’nın da düştüğü gözlemlenmiştir. En yüksek BD 22 °C’de 37,83 Mpa ile P40F grubunun, en düşük BD ise 500 °C’de 8,06 Mpa ile yine P20F numune grubunun olmuştur. PF numune gruplarında 22 °C ile 100 °C arasında basınç dayanımlarında küçük bir yükseliş gerçekleşmiştir.

4.6.2. Yangın numunelerinin BD deneyi bulguları

NY ve PY numunelerine yangın yardımıyla yüksek sıcaklık etkisi verilmiştir. NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri ve istatistiksel olarak standart hataları Çizelge 4.28’de ve Çizelge 4.29’da verilmiştir.

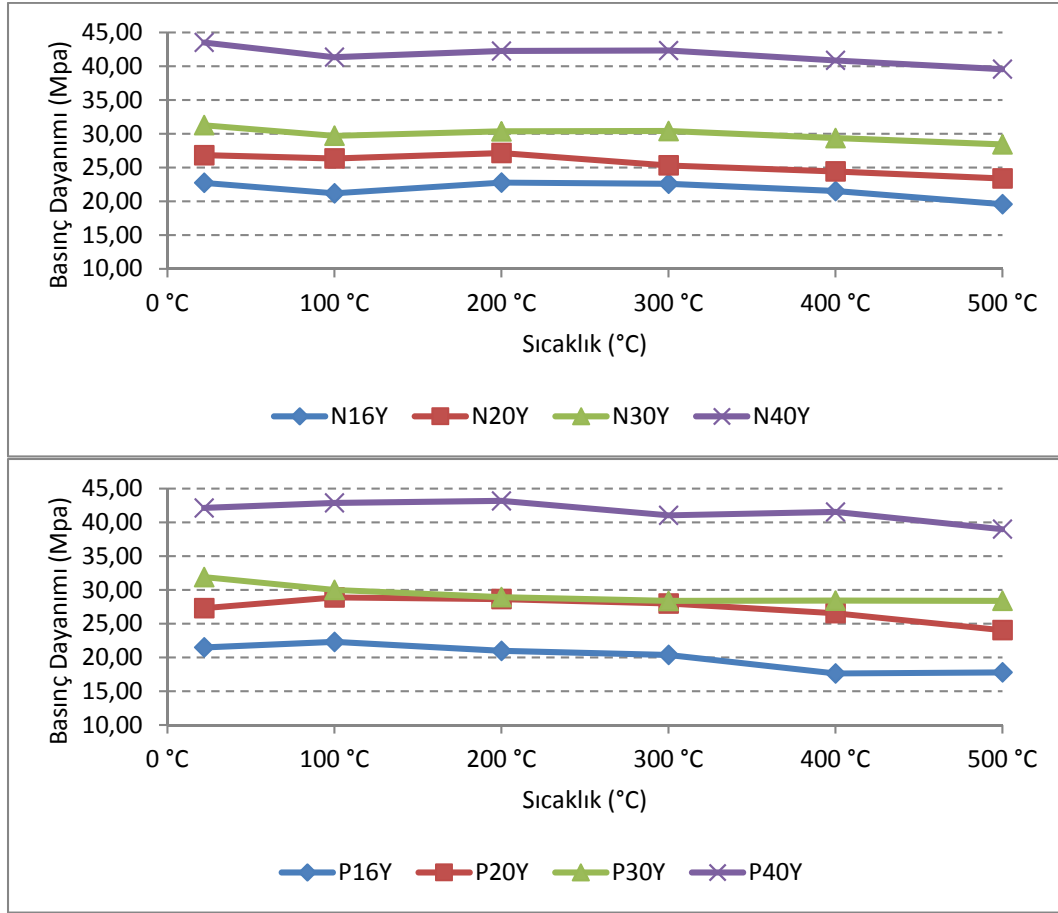
Çizelge 4.28. NY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri

	N16Y BD	N16Y Standart hata	N20Y BD	N20Y Standart hata	N30Y BD	N30Y Standart hata	N40Y BD	N40Y Standart hata
22 °C	22,740	0,820	26,830	0,554	31,270	0,300	43,524	0,811
100 °C	21,186	0,350	26,340	0,525	29,703	0,660	41,343	0,857
200 °C	22,780	0,658	27,150	0,040	30,358	0,613	42,254	0,082
300 °C	22,593	0,725	25,330	0,202	30,409	0,018	42,325	0,340
400 °C	21,517	0,535	24,420	0,064	29,361	0,167	40,867	0,122
500 °C	19,580	0,369	23,380	0,017	28,424	0,408	39,563	1,073

Çizelge 4.29. PY numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerleri

	P16Y BD	P16Y Standart hata	P20Y BD	P20Y Standart hata	P30Y BD	P30Y Standart hata	P40Y BD	P40Y Standart hata
22 °C	21,488	0,495	27,306	0,535	31,900	0,254	42,136	0,695
100 °C	22,300	0,491	28,890	1,114	30,005	0,113	42,885	1,217
200 °C	20,980	0,116	28,642	0,636	28,927	0,556	43,179	0,026
300 °C	20,367	0,394	27,986	1,072	28,369	0,299	41,043	0,615
400 °C	17,634	0,125	26,560	0,629	28,416	0,442	41,546	0,791
500 °C	17,785	1,238	24,047	0,102	28,381	0,237	39,005	0,377

NY ve PY numunelerindeki dört farklı BD sınıfının, yangın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD verilerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. NY ve PY numunelerinin yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD değerlerinin grafiksel gösterimi

Tüm NY numune gruplarında 22 °C’de s/ç oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü ve yüksek sıcaklık derecesi arttıkça BD’nın da düştüğü gözlemlenmiştir. En yüksek BD 22 °C’de 43,52 Mpa ile N40Y grubunun, en düşük BD ise 500 °C’de 19,58 Mpa ile N16Y numune grubunun olmuştur. NY numune gruplarında 100 °C ile 200 °C aralığında numunelerin BD’nda az da olsa bir artış gözlemlenmiştir. Bunun dışında fırın numunelerine göre yüksek sıcaklık etkisi ile NY numune gruplarında daha küçük düşüşler meydana gelmiştir.

Tüm PY numune gruplarında 22 °C’de s/ç oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü ve yüksek sıcaklık derecesi arttıkça BD’nın da düştüğü gözlemlenmiştir. En yüksek BD 200 °C’de 42,14 Mpa ile P40Y grubunun, en düşük BD ise 500 °C’de 17,79 Mpa ile P16Y numune grubunun olmuştur. NY numune gruplarında 100 °C ile 200 °C aralığında numunelerin BD’nda az da olsa bir artış gözlemlenmiştir. Bunun dışında fırın numunelerine

göre yüksek sıcaklık etkisi ile PY numune gruplarında daha küçük düşüşler meydana gelmiştir.

BD deneyi bulgularının değerlendirilmesi

NF ve PF fırın numunelerinin BD değerleri yüksek sıcaklık etkisiyle düzenli olarak düşüş göstermiştir. NF16-20-30-40 numunelerinin 500 °C'deki BD kayıpları (22 °C'ye göre) sırasıyla %59,59-%68,27-%66,81-%67,85'dür. PF16-20-30-40 numunelerinin 500 °C'deki BD kayıpları sırasıyla %61,22-%66,32-%61,18-%61,02'dir. NF ve PF fırın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen BD kaybı ile s/ç oranları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenmemiştir.

NY ve PY yangın numunelerinin yangın etkisi altındaki BD değerleri düşüşleri, fırın numunelerindeki düşüşlere göre çok daha düşük seviyelerdedir. NY16-20-30-40 numunelerinin 500 °C'deki BD kayıpları %13,89-%12,86-%9,10-%9,10 iken PY16-20-30-40 numunelerinin kayıpları ise %17,23-%11,94-%11,03-%7,43'dir. NY ve PY yangın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen BD kaybı ile s/ç oranları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenmemiştir.

Fırın numunelerinin (PF ve NF) 500 °C'deki kayıpları ortalama olarak %60 civarlarındayken, yangın numunelerinin (NY-PY) 500 °C'deki kayıpları %10- %15 civarlarındadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tüm deneyler için toplam 16 adet numune grubu bulunmaktadır. Bu 16 numune grubunun her sıcaklık değeri için üçer adet numune üretilmiştir. 6 adet sıcaklık değeri bulunduğu göre deneyler için toplam 288 adet numune üretilmiştir. Her bir numune grubunun her bir sıcaklık değeri için tüm deney sonuçlarında bu üç değer ortalama alınarak Çizelgeler ve grafikler oluşturulmuş, deney sonuçları irdelenmiştir.

- Genel olarak numune gruplarının ortalama BHA kayıplarına bakıldığında yüksek sıcaklık etkisi arttıkça BHA kayıplarının da arttığı gözlemlenmiştir. BHA deneyi sonuçlarına göre fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kayıpları, yangın etkisiyle verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kayıplarından daha yüksek çıkmıştır. Fırın numune gruplarında (NF-PF) BHA kaybının yüksek sıcaklık etkisinin artmasıyla düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenirken, yangın numune gruplarında ise (NY-PY) bu artışın çok az hatta yer yer yatay seyrettiği gözlemlenmiştir. Bunun sebepleri olarak, yangın etkisinin tek yüzeye verilmesi, yangın aparatının etrafında oluşan ısı kayıpları veya 500 °C'nin numunenin tek yüzüne verilen yangın etkisinde yetersiz kalabileceği gösterilebilir. Ayrıca tüm numune gruplarında GPA'lı numunelerin (PF-PY) BHA kayıplarının GPA'sız (NF-NY) numunelere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda GPA'nın betonlarda karkı olarak kullanıldığı takdirde yüksek sıcaklık etkisi altındaki beton numunelerini BHA kaybına karşı koruduğu sonucuna varılmıştır. BD sınıflarıyla yüksek sıcaklık etkisi altındaki BHA kayıpları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir.
- HSE deneyi sonuçlarına göre yüksek sıcaklık etkisi altında fırın numunelerinin HSE artışları, yangın numunelerinin HSE artışlarından daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca GPA'lı numunelerin (PF-PY) fırın ve yangın ile verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki HSE artışları, GPA'sız numunelerden (NF-NY) daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda GPA'lı numunelerin yüksek sıcaklık etkisinden sonra GPA'sız numunelere göre daha fazla su emdiği sonucuna varılmıştır. Fırın numunelerinde BD sınıflarıyla HSE artışları arasında herhangi bir ilişki gözlenmezken, yangın numunelerinde BD sınıfı arttıkça yüksek sıcaklık etkisi altında numunelerin HSE artış oranlarının azaldığı gözlemlenmiştir.

- KSE deneyi sonuçlarına göre yüksek sıcaklık etkisi altında fırın numunelerinin KSE katsayılarındaki artış yangın numunelerinkinden daha büyüktür. Ayrıca yangın ve fırın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altında GPA'lı numunelerin KSE katsayılarındaki artış GPA'sız numunelerin KSE katsayılarındaki artıştan daha fazladır. Yüksek sıcaklık etkisi altında KSE katsayılarının değişimiyle BD sınıfları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. Sonuç olarak GPA katkısının KSE deneyi sonucunda yangın veya fırın yardımıyla verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki beton numunelerin KSE katsayılarında artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.
- AD deneyi sonuçlarına göre yangın ve fırın numunelerinde BD'ı arttıkça aşınma kayıpları azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi altında fırın numunelerinin aşınma kayıpları yangın numunelerinin aşınma kayıplarından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde yüksek sıcaklık etkisi altında GPA'lı numunelerde meydana gelen aşınma kayıpları GPA'sız numunelerde meydana gelen aşınma kayıplarından daha büyük çıkmıştır. Buna göre beton numunelerde GPA katkısının yüksek sıcaklık etkisi altında AD kayıplarını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- UGH deneyi sonuçlarına göre tüm numunelerde yüksek sıcaklık etkisi altında UGH değerlerindeki değişim ile BD sınıfları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. Fırın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altında UGH değerlerinin düzenli olarak düştüğü, yangın numunelerinde ise yüksek sıcaklık etkisi altında UGH değerlerinin çok az düştüğü, neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde yüksek sıcaklık etkisi altında GPA'lı numunelerin UGH değerleri GPA'sız numunelerin UGH değerlerinden daha az düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum GPA'nın yüksek sıcaklık etkisine karşı betonun boşluk yapısını koruduğu sonucu çıkarılmaktadır.
- BD sonuçlarına göre tüm numunelerde s/ç oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Fırın numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD kayıpları %60'larda seyrederken, yangın numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi altındaki BD kayıpları %10 civarlarında olmuştur. Numunelerin GPA'lı ve GPA'sız olmaları ile BD kayıpları arasında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir. Ayrıca tüm numunelerde yüksek sıcaklık etkisi altında BD kayıp oranlarıyla s/ç oranlarında herhangi bir ilişki gözlemlenememiştir.

Dünyadaki olası perlit rezervlerinin yarısından çoğu ülkemizde bulunmaktadır. Perlit birçok sektöre değerlendirilebilir. Bu sebeple, özellikle perlitin GPA formunun yapı malzemesi

olarak inşaat sektöründe verimli bir şekilde kullanılması, ölkemiz ekonomisine büyük katkıda bulunacaktır.

Yapılacak olan benzer çalışmalar için, yangın etkisiyle verilecek olan yüksek sıcaklık etkisinin daha yüksek derecelere çıkarılması ve yangın etkisinin verileceği düzeneğin ısı kaybına karşı daha iyi korunması tavsiye edilebilir. Ayrıca deney sonuçlarının daha iyi gözlemlenebilmesi için numunelerin iri agregasız harç şeklinde üretilmesi tavsiye edilebilir.

KAYNAKLAR

- Akca A.H. ve Zihnioğlu N.Ö. (2013). High performance concrete under elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 44, 317-328.
- Akman M.S. (2002). Betona gömülü çeliğin korozyonu, riskin saptanması, önlemler. *Sika Teknik Bülten*, 3(4), 3-10.
- Alonso C., Andrade C. ve Khoury G.A. (2003). *Course on Effect of Heat on Concrete*. Porosity and microcracking, International Centre for Mechanical Sciences, Udine/Italy.
- Arı, K. (2009). *Dolgulu Duvar Blokları İmalı ve Isı İletim Katsayılarının Karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 32, 33, 34.
- Aruntaş, Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-196.
- Azizi, S. (2007). *Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-6, 16-18, 63-66.
- Balendran, R. V. ve Martin-Baudes (2000). The influence of high temperature curing on the compressive, tensile and flexural strength of pulverized fuel ash concrete. *Building and Environment*, 35(5), 415-423.
- Bayraktar, D., ve Bayraktar E.A. (2016). Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 59-66.
- Bilgiç, M. (2009). *Yüksek Performanslı Prefabrike Hafif Betonların Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1.
- Bingöl, A. F. (2008). *Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 140-143.
- Chan, Y. N., Luo X., ve Sun W. (2000). Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C. *Journal of Cement and Concrete Research*, 30(2), 247-251.
- Cülfik, M.S. (2001). *Deterioration of bond between cement paste and aggregate at high temperatures*, PhD. thesis, Boğaziçi University, İstanbul, 175.
- Çelik, A.G., Kılıç A.M., ve Akkurt, F. (2014). Yapı malzemesi üretiminde genişletilmiş perlit agregası kullanılabilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 451-458.
- Çelik, A.G., Kılıç, A.M., Çakal, G.Ö. (2013). Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), 689-700.

- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. 2015. Isı Yalıtım Uygulama Kılavuzu; Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 3-8.
- Çiçek, Y. (2002). *Pişmiş Toprak, Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton, Ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 87, 105-108.
- Demir, A. (2008). *Kiremit kırığı agregalı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 60.
- Demirboğa, R., Gül, R., ve Örüng, İ., (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.
- Demirboğa, R., ve Gül, R., (2003). Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy and Building*, 35(11), 1155-1159.
- Devlet Planlama Teşkilatı. 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı: 2617 - ÖİK: 628, 25, 26, 27, 28, 32, 33,34.
- Doğan, H., Şener, F. (2004). Hafif Yapı Malzemeleri (Pomza - Perlit - Ytong - Gazbeton) Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç Ve Öneriler. *Haber Bülteni Dergisi*, 2004(1) Ocak-Mart 2004, 51-53.
- Durmuş, G. (2008). *Çimentolu Harç Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisinin Belirlenmesi ve Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14, 18, 105-109.
- Dündar, B. (2016). *The Effect of Nanosilica on the Properties of Pumice Incorporated Blended Cements*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-8, 75-77.
- Ertün. T., Türker, P. (2004). *Çimento Kimyası*, Ankara: TÇMB Yayını, 39-43.
- Fındık, S. (2007). *Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Mineral Katkılı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Harçların Bazı Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 32, 78-79.
- Gökçe, H.S. (2010). *Hafif Beton Üretiminde Ham Ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26.
- Gandage, A.S., Rao, V.R.V., Sivakumar, M.V.N., Vason, A., Venu, M., ve Yaswanth, A.B. (2013). Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self Compacting Concrete. *Social and Behavioral Sciences*, 104, 188-197.

- Gölce, C. (2009). *Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 5, 10-11,13-15.
- Güler, S. (2010). *Mineral Katkılı Harçlarda Yüksek Sıcaklığın Mekanik Özelliklere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 70-74.
- Hacıemiroğlu, M. (2014). *Yangın Geçirmiş Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105-109.
- Hager, I., Tracz, T., Sliwinski, J., ve Krzemien, K. (2015). The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. *Fire and Materials*, 40(5), 668-682.
- Hager, I. (2014). Colour change in heated concrete. *Fire technology*, 50, 945-958.
- Heo, Y., Lee, G., Lee, G. (2016). Effect of elevated temperatures on chemical properties, microstructure and carbonation of cement paste. *Journal of Ceramic Processing Research*, 17(6), 648-652.
- Huang, Z., Liev, J.Y.R., Li, W. (2017). Evaluation of compressive behavior of ultra-lightweight cement composite after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 148, 579-589.
- Işıkdag, B. (2015). Characterization of lightweight ferrocement panels containing expanded perlite-based mortar. *Construction and Building Materials*, 81, 15-23.
- Kalaycı, F. (2016). *Perlit Esaslı Isı Yalıtım Malzemesi Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 17-18.
- Karaduman, N. (2008). *Farklı Tip Çimentoların Yüksek Sıcaklıklara Direnci*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 107-110.
- Karagöz, H. (2013). *Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Mineral Katkıların Yüksek Sıcaklık Performansına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 55-57.
- Karakoç, M.B. (2010). *Hafif Agreganın ve Hava Sürükleyici Katkı Maddesinin Yüksek Dayanımlı Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisinin İncelenmesi ve Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 20-21.
- Karakoç, M.B. (2013). Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 41, 21-25.
- Karatas M., Balunb, B., and Benli, A. (2017). High temperature resistance of self-compacting lightweight mortar incorporating expanded perlite and pumice. *Computers and Concrete*, 19(2), 121-126.

- Khan M.S., ve Abbas, H. (2015). Effect of Elevated Temperature on the Behavior of High Volume Fly Ash Concrete. *Structural Engineering*, 19(6), 1825-1831.
- Kızılkant, A.B. (2004). *Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 58-61.
- Koçu, N. (2007). Isı Yalıtımsız Yapıların Atmosfer Kirliliğine ve Küresel Isınmaya Etkisi. *Mimarani Dergisi*, Yıl.1, Sayı.2, Yaz, 70-79.
- Kosmatka, S.H., Voigt, G.F., Taylor, P.C. (2007). Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State Of The Practice Manual. *Center for Transportation Research and Education Iowa State University*, 69-104.
- Kurt, A. (2012). *Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisinin Mineral Katkı Çeşitlerine Göre Değişimi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 48-52.
- Lubly, E., Kopecsko, K., Balazs, G.L., Restas, A., Szilagyi I.M. (2017). Improved Fire Resistance by Using Portland-Pozzolana or Portland-Fly Ash Cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(2), 925-936.
- Lubly, E., Kopecsko, K., Balazs, G.L., Szilagyi I.M., ve Madarasz, J. (2016). Improved fire resistance by using slag cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(1), 271-279.
- Mahsanlar, N. (2006). *Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 53-55, 48.
- Midness, S., Young, J.F., ve Darwin, D. (2002). *Concrete-2nd Edition*. NJ, USA: Prentice Hall, 1-100.
- 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, Eskişehir, 25, 71-74.
- Özdenkoş, O. (2010). *Çimento Fabrikalarında Kalite ve Çevre Yönetimi Sistemleri: Sektörde Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 43-46.
- Öztürk, M. (2012). *Pomza ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 37.
- Papayianni I. ve Valliasis Th. (2005). Heat deformation of fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 249-254.
- Peng, G.F., Chan, S.Y.N, Song, Q.M. ve Yi, Q.X. (2006). Effect of high temperature on concrete: A literature review. *Journal of Key Engineering Materials*, 302(303), 138-149.
- Sağlam, G. (2012). *Çimento Üretiminde Atık Mermer Tozu ve Atık Alçının Kullanılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20.

- Sağsöz, A.E. (2007). *Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 4, 38-40.
- Savva A., Manita P. ve Sideris K.K. (2005). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 239-248.
- Scherefleer, B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C.E. ve Pesavento, F. (2002). Concrete at high temperature with application to tunnel fire. *Computational Mechanics*, 29(1), 43-51.
- Seçer, O. (2008). *Yüksek Sıcaklık Etkisinden Hasar Görmüş Liçli, Hava Sürükleyici Katkılı ve Perlit Agregalı Betonların Dayanım Özellikleri ve Gfrp İle Onarımı ve Güçlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 101-103.
- Shaikh, F.U.A., ve Vimonsatit, V. (2014). Effect of cooling methods on residual compressive strength and cracking behavior of fly ash concretes exposed at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 40(2), 335-350.
- Shan, L.W., Zhang, J.L., Wei, L., Liu, Z.J., Wu, Z., Dong, L.M., ve Han, Z.D. (2013). Study on Fire Resistance of Cement. *China Functional Materials Technology and Industry Forum-Applied Mechanics and Materials*, Volume-320, Page-308+.
- Shastri, D., Kim, H.S. (2014). A new consolidation process for expanded perlite particles. *Construction and Building Materials*, Volume-60, Page-1-7.
- Shoaib, M.M., Ahmed, S.A. ve Balaha, M.M. (2001). Effect Of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1533-1538.
- Şafak, A. (2014). *Çimento Minerolojisinin ve Petrografisinin Çimento Teknolojisine Katkısı*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 3.
- Şengül, D., Sayın, B., ve Kaplan, S.A. (2005, 17-19 Kasım). *Su ve ısı yalıtımının yapılarda uygulanmasının gerekliliği ve yalıtımdaki uygulamaların emniyet ve ekonomi açısından değerlendirilmesi*. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresinde sunuldu, İstanbul.
- Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*. London:Thomas Telford, 113-225.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., ve Yeğinobalı, A. (2009). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikler*. Ankara: TÇMB Yayını, 5-89.
- Türkiye Cumhuriyeti Ekonomi Bakanlığı. 2016. İhracat Genel Müdürlüğü Kimya Ürünleri ve Özel İhracat Daire Başkanlığı Sektör Raporları-Çimento Sektörü; TCEB HS No: 2523. *Ankara*, 1-3.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). *Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri (TS EN 197-1)*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 1-29.

- Uçarkoşar, B. (2013). *Pirinç Kabuğu Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonun Yüksek Sıcaklık Performansı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-6.
- Ulus İ. (2007). *Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 70.
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., Yuan, G.L., ve Li, Q. (2017). Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 138, 486-495.
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., ve Li, Q. (2017). An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 148, 148-154.
- Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalikuş, O., Kara, İ., Erdem, Ş., ve Özgür, D. (2015). Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, Sayı: 487, 62-75.
- Yamazaki, N., Yamazaki, M. ve Mocida, T. (1995). Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures. *Nuclear Engineering and Design*, 156(1-2), 121-138.
- Yaşar, S. (2008). *Polipropilen Lifli, Hava Sürükleyici Katkılı ve Yöresel Hafif Agregalarla Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonların Yüksek Sıcaklıklar Altında Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 146-149.
- Yıldırım, A. (2007). *Pomza ve Uçucu Kül Kullanılarak İmal Edilen Hafif Betonların Agresif Su Ortamlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 18-19, 25-28.
- Zhao, R., ve Sanjayan, J.G. (2011). Geopolymer and portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete Research*, 63(3), 163-173.
- Zulkifeli, M.F.H.B., ve Mohamed, H.B.M.S.H. (Nov 02-03, 2016). *Compressive and flexural strength of expanded perlite aggregate mortar subjected to high temperatures*. 2nd International Conference on Applied Physics and Engineering (ICAPE 2016), Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1875 Article Number: UNSP 030006 Published: 2017 Penang, Malaysia.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇELİK, Mehmet
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.02.1988, Kozluk/BATMAN
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 508 78 92
 Faks : 0 (312) 508 77 99
 e-mail : mehmetc1@ilbank.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2012
Lise	Antalya Adem Tolunay Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	İller Bankası A.Ş.	Teknik Uzman
2012-2013	Yalın Kıska Yapı ve San A.Ş.	Saha Mühendisi

Yayınlar

Gökdemir, A., Demirel, C., Yamaç, F.T., Çelik, M., ve Özek, S.S. (2016). Tarihi Akseki evleri (Düğmeli evler) mimarisinin ve yapısal bozulma etkenlerinin incelenmesi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1).

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Basketbol, Bisiklet, Sinema, Tarih



GAZİ GELECEKTİR...